HAL
open science

La qualité des aliments d'origine animale selon les conditions de production et de transformation. Rapport de l'Expertise scientifique collective

Sophie Prache, Véronique Santé-Lhoutellier, Camille Adamiec, Thierry Astruc, Elisabeth Baéza, Pierre-Etienne Bouillot, Jérôme Bugeon, Mireille Cardinal, Isabelle Cassar-Malek, Antoine Clinquart, et al.

To cite this version:

Sophie Prache, Véronique Santé-Lhoutellier, Camille Adamiec, Thierry Astruc, Elisabeth Baéza, et al.. La qualité des aliments d'origine animale selon les conditions de production et de transformation. Rapport de l'Expertise scientifique collective. [0] INRAE. 2020, 1023 p. hal-02986866

HAL Id: hal-02986866

https://hal.inrae.fr/hal-02986866v1

Submitted on 19 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INRAE

La qualité des aliments d'origine animale
selon les conditions de production et de transformation

Rapport de l'Expertise scientifique collective - Mai 2020

Direction de l'expertise scientifique collective, de la prospective et des études (DEPE)
Guy Richard, directeur

Responsables scientifiques :
Sophie Prache, ingénieure de recherche, INRAE Clermont Ferrand, unité mixte de recherche sur les Herbivores, Saint-Genès-Champanelle, France
Véronique Santé-Lhoutellier, directrice de recherche, INRAE Clermont Ferrand, unité de recherche sur la Qualité des produits animaux, Saint-Genès-Champanelle, France

Coordination du projet :
Catherine Donnars, INRAE, DEPE
Mégane Raulet, chargée de mission, INRAE, DEPE

Contacts:
Sophie Prache – sophie.prache@inrae.fr
Véronique Santé-Lhoutellier - veronique.sante-lhoutellier@inrae.fr

Le rapport d'expertise scientifique a été sollicité conjointement par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et FranceAgriMer. Il a été élaboré par un collectif d'experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou d'INRAE. Il n'engage que la responsabilité de ses auteurs. Les documents relatifs à cette expertise sont disponibles sur le site web d'INRAE (www.inrae.fr).

Pour citer ce document :
Prache S. et Santé-Lhoutellier V. (pilotes scientifiques), Adamiec C., Astruc T., Baeza-Campone E., Bouillot PE., Bugeon J., Cardinal M., Cassar-Malek I., Clinquart A., Coppa M., Corraze G., Donnars C., Ellies MP., Feidt C., Fourat E., Gautron J., Girard A., Graulet B., Guillier L., Hocquette JF., Hurtaud C., Kesse-Guyot E., Kerhoas N., Lebret B., Lefevre F., Le Perchec S., Martin B., Médale F., Mirade PS., Nau F., Pierre F., Raulet M., Remond D., Sans P., Sibra C., Souchon I., Touvier M., Verrez-Bagnis V., Vitrac O., 2020, La qualité des aliments d'origine animale selon les conditions de production et de transformation, rapport de l'expertise scientifique collective, INRAE (France), 1023 pages.

Document imprimé en juillet 2020

Rapport de l'Expertise scientifique collective

Qualité des aliments d’origine animale selon les conditions de production et de transformation

Avant-propos

À la demande des ministères en charge de l'Agriculture et de l'Environnement, et de l'Ademe, l'INRA a conduit en 2016 une Expertise scientifique collective (ESCo) sur les impacts environnementaux, économiques et sociaux des élevages européens. Le champ de cette expertise étant très large, il n'avait pas été possible d'approfondir les dimensions plus directement liées à la consommation humaine et notamment à la caractérisation de la qualité des aliments issus des animaux d'élevage.

C'est pourquoi le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et FranceAgriMer ont sollicité une nouvelle ESCo en 2018 pour dresser un état des connaissances sur les dimensions relatives à la qualité des aliments d'origine animale. Les questions centrales étaient d'éclairer, d'une part, la différenciation de la qualité des produits animaux en fonction des conditions d'élevage des animaux dont ils sont issus et, d'autre part, sur la façon dont les caractéristiques des produits sont conservées ou modifiées lors des transformations.

Sommaire

Le collectif d'experts et les contributeurs de l'expertise **12**

Abréviations et sigles **14**

Glossaire **17**

Introduction générale 20

1. La demande d'expertise **20**

1.1 Un contexte charnière pour les aliments d'origine animale 20

1.2 La demande d'expertise 22

2. Les principes et la démarche de l'expertise scientifique collective **23**

2.1 La composition du collectif d'experts 23

2.2 Les sources mobilisées dans l'expertise 23

3. Tendances de consommations des aliments d'origine animale **27**

3.1 Trajectoire de la consommation des protéines d'origine animales dans le monde 27

3.2 Évolution de la consommation des produits d'origine animale en France (1973-2017) 28

3.3 La restauration de la confiance : un enjeu majeur 31

4. Les grandes tendances influençant les choix des aliments d'origine animale **33**

4.1 Les nouveaux rapports aux risques alimentaires 33

4.2 La médicalisation et la nutritionnalisation 33

4.3 La naturalisation de l'alimentation 34

4.4 La santé des animaux, des humains et de la planète 34

Références bibliographiques des sections 3 et 4 36

Annexe 1 : Comment mesure-t-on la consommation des viandes ? 39

Annexe 2 : Requêtes pour la recherche bibliographique exploratoire (Pub Med et WOS) 40

1. Quelle sont les caractéristiques et les propriétés des produits animaux ? 43

1.1 Les 7 volets de la qualité : définition/méthodes de mesure et analyse critique **45**

1.1.1 Définition de la qualité 45

1.1.2 Propriétés et caractéristiques des matières premières d'origine animale prises en compte dans l'évaluation de la qualité 46

1.1.2.1 Propriétés organoleptiques (ou sensorielles) 46

1.1.2.2 Propriétés nutritionnelles 50

1.1.2.3 Propriétés technologiques 61
1.1.2.4 Propriétés sanitaires 72
1.1.2.5 Propriétés d'image. 83
1.1.2.6 Propriété d'usage 84
1.1.2.7 Valeur commerciale 85
Conclusions – perspectives : nouvelles méthodes d'évaluation et de prédiction de la qualité 98
1.2 Les étapes successives de l'élevage à la consommation 102
1.2.1. Trajectoires et procédés de transformations dans les filières viande et poisson 102
1.2.2. Trajectoires et procédés de transformations dans la filière lait 120
1.2.4. Transformation des œufs en ovoproduits 129
1.2.3. L'organisation des contrôles officiels 132
1.3 Diversité et classification des produits animaux transformés 141
1.3.1 La place des aliments transformés dans la diète 141
1.3.2 Panorama des produits transformés à base de produits animaux vendus en grandes surfaces 141
1.3.3. Les classifications des aliments 145
Conclusion 152
Conclusion du chapitre 1 153
Références bibliographiques des parties 1 et 2 154
Annexe 1 : Un modèle de prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine développé en Australie et en cours d'adaptation à l'international 177

2. Variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants 183

Introduction 184
Chapitre 2 - Fichier 1
2.1. Viande et produits de volailles 185
2.1.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 185
2.1.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 189
2.1.3. Produits transformés 207
2.1.4. Impact des pratiques du consommateur 211
2.1.5. Conclusion 211
2.2. Œufs et ovoproduits 216
2.2.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 216
2.2.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 222
2.2.3. Produits transformés 235
2.2.4. Conclusions 241

2.3. Viande ovine **245**

2.3.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 245

2.3.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 246

2.3.3. Produits transformés 264

2.3.4. Impact des pratiques des consommateurs 265

2.3.5. Exemples de tensions entre différentes dimensions de la qualité et acteurs de la chaîne d'élaboration du produit 266

2.3.6. Conclusions 268

2.4. Viande et produits transformés de porc **273**

2.4.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 273

2.4.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des carcasses et viandes fraîches depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 282

2.4.3. Produits transformés 304

2.4.4. Conclusions 324

2.5. Viande bovine **336**

2.5.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 336

2.5.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 336

2.5.3. Produits transformés : le steak haché 349

2.5.4. Conclusions 354

2.6. Chair de poisson **360**

2.6.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 360

2.6.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 361

2.6.3. Conclusions 385

2.7. Le lait et les produits laitiers **389**

2.7.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation par filière dans l'Union Européenne 389

2.7.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits, depuis l'élevage jusqu'à la consommation, et leurs effets 393

2.7.3. Produits transformés 414

2.7.4. Exemples de tensions/antagonismes/synergies entre différentes dimensions de la qualité et acteurs de la chaîne alimentaire 434

2.7.5. Conclusion 437

Références bibliographiques 440

Chapitre 2- Fichier 2

2.8 Analyse des SIQO **533**

2.8.1 Cadre général des SIQO : Règlementation et exemple des cahiers des charges relatifs au jambon sec 533

2.8.2 Comparaison des cahiers des charges Label Rouge : Explicitation de l'importance des liens de leurs engagements avec les propriétés du produit, à partir de l'exemple des LR gros bovins de boucherie 552

2.8.3 Comparaison des cahiers des charges AOP, IGP, STG : Mise en évidence des arguments qualitatifs et explicitation de leurs liens aux propriétés des produits, à partir de l'exemple des fromages 574

2.8.4 Définition et application du cahier des charges de l'Agriculture biologique (AB) en Europe 596

Conclusions 604

Références bibliographiques 606

Chapitre 2 fichier 3

2.9 Authentification analytique de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits animaux 612

2.9.1 Authentification des processus utilisés au cours de la chaine alimentaire 613

Méthodes basées sur les protéines 633

2.9.2 Authentification de l'origine 654

2.9.3 Exemples d'application 658

Conclusions 662

Références bibliographiques 663

Chapitre 2 fichier 4

2.10 Synthèse et conclusions 690

2.10.1 Caractéristiques et importance des différents modes de production et transformation 690

2.10.2 Variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élaboration, de conservation et de consommation 696

2.10.3 Authentification de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits par des méthodes analytiques 726

2.10.4 Verrouillages, freins au changement, tensions entre acteurs de la filière 726

2.10.5 Nouveautés, lacunes, incertitudes, controverses 729

Références bibliographiques 732

3. Consommation de produits animaux et santé 741

3.1. Périmètre du chapitre 743

3.2. La couverture des besoins nutritionnels 744

3.2.1 Les spécificités des produits animaux 744

3.2.2 La couverture des besoins nutritionnels dans des régimes plus ou moins riches en produits animaux 746

3.2.3 Effet des modes d'élevage et des procédés de transformation 749

3.3. Additifs et résidus 751

3.3.1 Utilisation d'additifs dans la formulation de produits alimentaires d'origine animale 751

3.3.2 Résidus de médicaments vétérinaires 755

3.4. Part des produits animaux dans le fardeau des maladies associées à des dangers biologiques 755

3.4.1 Utilisation des données nationales de déclaration des toxi-infections alimentaire collectives (TIAC) 756

3.4.2 Approche descendante basée sur des estimations de l'incidence des maladies 757
3.4.3 Conclusion de la partie sanitaire pour les dangers biologiques 761
3.5. L'épidémiologie nutritionnelle pour étudier la relation entre consommation et santé 761
3.5.1 Niveau de preuve et indicateurs 761
3.5.2 Méthodes en épidémiologie nutritionnelle 764
3.5.3 Mortalité 765
3.5.4 Cancer 769
3.5.6 Maladies cardiovasculaires 774
3.5.7 Diabète de type 2 780
3.5.8 Obésité 782
3.5.9 Sarcopénie 786
3.5.10 Ostéoporose 788
3.5.11 Déficience en fer et anémie 789
3.5.12 MAMA 792
Conclusions 794
Périmètre, lacunes, perspectives 798
Références bibliographiques 801

4. Synergies, antagonismes et compromis dans la chaîne alimentaire entre acteurs et entre volets de la qualité 825

4.1 Prise en compte des critères de durabilité dans les systèmes de production et de transformation des produits animaux 826
4.1.1 Indicateurs environnementaux 826
4.1.2 Indicateurs économiques 829
4.1.3 Indicateurs sociaux 829
4.1.4 Indicateurs nutritionnels 829
4.1.5 Indicateurs sanitaires 830
4.2 Description des outils d'analyse multicritère, d'optimisation multi-objectif et d'aide à la décision 831
4.2.1 Méthodes d'analyse multicritère et méthodes d'optimisation multi-objectif 831
4.2.2 Outils d'aide à la décision 833
4.3 Exemples d'applications dans la chaîne alimentaire en lien avec les produits animaux 835
4.3.1 Durabilité de la chaîne d'approvisionnement des produits 835
4.3.2 Exemples concernant la production de lait et sa transformation en produits laitiers 839
4.3.3 Exemples concernant la production de viande et la transformation en produits carnés 846
4.3.4 Cartographies multicritères : un outil d'aide à la conception de produits plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs – Exemple d'un aliment composite : la pizza 855
4.3.5 Approches multicritères : exemples allant jusqu'à la santé des consommateurs 857
Principales conclusions 859

Références bibliographiques 860

5. La consommation : segmentations sociales et des marchés, déterminants socio-économiques, régulations juridiques 875

5.1. Les qualités principalement identifiées par la législation alimentaire européenne 876

5.1.1. La qualité sanitaire 877

5.1.2. La qualité marchande : les produits animaux soumis au principe de libre circulation des marchandises 878

5.1.3. La prévention des risques : quel équilibre entre la qualité sanitaire et marchande ? 879

5.1.4. L'information du consommateur 883

5.1.5. La qualité des produits animaux et droit du commerce international 887

5.1.6. Conclusion 888

5.2. Déterminants des choix des consommateurs 888

5.2.1. Approche par la théorie économique 888

5.2.2. Révéler les préférences des acheteurs 890

5.2.3. Application à quelques attributs des produits d'origine animale 890

5.2.4. Perception des risques et bénéfices liés aux aliments 893

5.2.5. Gestion du risque par le consommateur 894

Conclusions 896

Références bibliographiques 897

6. Vers des aliments d'origine animale plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs : pistes de réflexion et ouvertures 907

Introduction 908

6.1. Politiques et actions influençant le comportement des consommateurs 908

6.1.1 Agir sur le système réfléchi 909

6.1.2 Agir sur le système automatique/réflexe 912

6.2. Innovations dans les procédés 914

6.2.1. Evolution dans les filières : exemple de la production d'œufs 914

6.2.2. Abattage de proximité 922

6.2.3. Innovations autour des transformations 925

6.2.4 Conditionnement et emballages des produits animaux 930

6.3. Reformulation des produits – « Innovations produits » 934

6.3.1. Pourquoi et comment re-formuler avec un objectif d'amélioration de l'offre et/ou santé 934

6.3.2. Substituts végétaux partiels et totaux dans les produits animaux 939

6.3.3. Reformulation dirigées vers des populations cibles 941

6.3.4. Acceptabilité de reformulation : Vers une évolution du périmètre des arbitrages ? 942

6.3.5. Réglementation européenne par rapport aux innovations dans le domaine de l'alimentation 946

6.4. Innovations au niveau des systèmes de production/transformation 948

6.4.1. Exemples de développement de nouvelles filières 948

6.4.2. Conceptions innovantes 952

6.4.3. Enjeux et limites des approches systèmes centrées sur la santé 955

6.4.4. Limiter les pertes et gaspillage et favoriser la valorisation de la biomasse animale 957

6.5. Conclusions 971

Références bibliographiques 973

Conclusions 1001

1. Les propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale et les méthodes pour les évaluer 1001

2. Variabilité des propriétés des aliments d'origine animale 1003

2.1 Beaucoup de facteurs impliqués tout au long de la chaîne d'élaboration et des antagonismes à gérer 1004

2.2 Des propriétés stables, d'autres variables 1005

2.3 Des étapes majeures où se construit et où s'altère la qualité 1006

3. Authentification des conditions d'élaboration des aliments et de leur origine 1007

4. La recherche de compromis par l'analyse multicritère 1008

5. Les aliments d'origine animale et la santé humaine 1009

5.1. La couverture des besoins 1009

5.2 La question des antibiotiques dans les aliments d'origine animale 1009

5.3 Les études d'épidémiologie nutritionnelle : des risques accrus ou diminués selon les groupes d'aliments d'origine animale et un besoin de meilleure connexion entre communautés scientifiques 1009

5.4 Une consommation de protéines d'origine animale qu'il est possible de réduire pour certaines populations ; des sources protéiques alternatives en développement 1010

6. Les aliments d'origine animale standards et sous signe de qualité : quel équilibre entre les propriétés constitutives de la qualité, et quelle coexistence ? 1011

7. Enseignements pour la recherche et l'action publique 1014

7.1 Consommateurs : évolution des attentes et des comportements, information et formation 1014

7.2 Encourager des pratiques et systèmes d'élevage favorables à la qualité des aliments d'origine animale 1015

7.3 Développer des outils d'évaluation, de prévision, de pilotage et de contrôle de la qualité 1017

7.4 Lien entre la consommation des aliments d'origine animale et la santé humaine 1018

7.5 Inscrire les produits animaux dans une logique d'économie circulaire 1019

Le collectif d'experts et les contributeurs de l'expertise

Pilotes scientifiques

Sophie Prache, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (petits ruminants)

Véronique Santé Lhoutellier, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Quapa (procédés de transformation, produits animaux)

Experts

Camille Adamiec, Université de Strasbourg, Maison Interuniversitaire des Sciences de l'Homme-Alsace (sociologie de l'alimentation)

Thierry Astruc, INRAE Clermont-Ferrand, UR Qualité des Produits Animaux (procédés, viande)

Elisabeth Baeza-Campone, INRAE Tours, UMR Biologie des Oiseaux et Aviculture (volailles)

Pierre-Etienne Bouillot, AgroParisTech, Institut de Recherche Juridique de la Sorbonne (droit de l'alimentation)

Antoine Clinquart, Université de Liège, département des denrées alimentaires (bovins)

Cyril Feidt, ENSAIA Nancy, UR Animal et fonctionnalité des produits animaux (risques alimentaires chimiques)

Estelle Fourat, CNRS/EHESS – Institut de recherches interdisciplinaires sur les enjeux sociaux (sociologue alimentation)

Emmanuelle Kesse-Guyot, INRAE-Paris-Université Paris Sorbonne-Inserm -Cnam, CRESS-Équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle (épidémiologie nutritionnelle)

Joel Gautron, INRAE Tours, UMR Biologie des Oiseaux et Aviculture (œufs)

Laurent Guillier, ANSES (risques alimentaires microbiologiques)

Bénédicte Lebret, INRAE Rennes, UMR Physiologie, environnement et génétique pour l'animal et les systèmes d'élevage (porcs)

Florence Lefèvre, INRAE Rennes, Laboratoire de physiologie et génomique des poissons (poissons)

Bruno Martin, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (produits laitiers)

Pierre-Sylvain Mirade, INRAE Clermont-Ferrand, UR Qualité des Produits Animaux (modélisation, procédés)

Fabrice Pierre, INRAE Toulouse, UMR Toxicologie Alimentaire (toxicologie alimentaire)

Didier Rémond, INRAE Clermont-Ferrand, UMR de Nutrition Humaine (nutrition)

Pierre Sans, ENVT-INRAE Toulouse, UR Alimentation et Sciences Sociales (économie des filières)

Isabelle Souchon, INRAE Grignon, UMR Génie et microbiologie des procédés alimentaires (procédés)

Experts ponctuels

Jérôme Bugeon, Rennes, Laboratoire de physiologie et génomique des poissons (poissons)

Mireille Cardinal, Ifremer Nantes, Laboratoire écosystèmes microbiens et molécules marines pour les biotechnologies (poissons)

Isabelle Cassar-Malek, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (petits ruminants)

Mauro Coppa, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (produits laitiers)

Geneviève Corraze, INRAE Saint Pée, UMR nutrition, métabolisme aquaculture (poissons)

Marie-Pierre Ellies, INRAE Clermont-Ferrand- UMR Herbivores et Bordeaux Sciences Agro (viande de bœuf hachée)

Benoît Graulet, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (produits laitiers)

Jean-François Hocquette. INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (produits laitiers)

Catherine Hurtaud INRAE Rennes, UMR Physiologie, environnement et génétique pour l'animal et les systèmes d'élevage (fromages, camembert)

Nathalie Kerhoas, directrice de l'association Bleu Blanc Coeur

Françoise Médale, INRAE Saint Pée, UMR nutrition, métabolisme aquaculture (poissons)

Cécile Sibra, Vetagro-Sup, INRAE Clermont-Ferrand, UMR Herbivores (produits laitiers)

Mathilde Touvier, INRAE-Paris-Université Paris Sorbonne-Inserm -Cnam, CRESS-EREN (additifs alimentaires)

Véronique Verrez-Bagnis, Ifremer Nantes, Laboratoire écosystèmes microbiens et molécules marines pour les biotechnologies (poissons)

Olivier Vitrac, INRAE – Massy, UMR SayFood (emballages alimentaires)

Équipe projet

Catherine Donnars, INRAE Paris, DEPE (coordinatrice du projet)

Agnès Girard, INRAE Rennes, Laboratoire de physiologie et génomique des poissons (documentaliste)

Kim Girard, INRAE Paris, DEPE (gestionnaire)

Sandrine Gobet, INRAE Paris, DEPE (gestionnaire)

Sophie Le Perchec, INRAE Rennes, DEPE (documentaliste)

Mégane Raulet, INRAE Paris, DEPE (chargée de mission)

PAO : Sacha Desbournes INRAE Orléans (graphiste, figures de la synthèse) et Pascale Inzerillo, INRAE Paris, Dircom (couverture du rapport et de la synthèse)

Les auteurs remercient les relecteurs des documents ainsi que les membres du comité de suivi et les acteurs consultés.

Abréviations et sigles

AB : Agriculture biologique. Les aliments issus d'élevages certifiés en AB sont des produits AB ou bio.

ACV : Analyse du cycle de vie

AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire des aliments (jusque 2008)

AVC : Accidents vasculaires cérébraux

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ADN : Acide désoxyribonucléique

AGMI : Acide gras mono-insaturé

AGPI : Acide gras poly-insaturé

AGPI n-3 et n-6 : (acides gras polyinsaturés) oméga-3 et oméga-6

AGS : Acide gras saturé

AHA : Amines aromatiques (produit néoformé lors de la cuisson d'aliments riches en protéines)

AHC : Amines hétérocycliques (produit néoformé lors de la cuisson d'aliments riches en protéines)

ALA : Acide alpha-linolénique : oméga-3, précurseur des omégas-3 à longue chaîne

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AOP : Appellation d'origine protégée

CCAF : Comportements et consommations alimentaires en France

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CJCE : Cour de justice de l'Union européenne

CLA : Ou ALC, acides linoléiques conjugués

CNA : Comité national de l'alimentation

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

COP21 : Conférence de Paris de 2015 sur le changement climatique

CREDOC : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie

DALY : *Disability adjusted life years*, ou espérance de vie corrigée de l'incapacité (EVCI)

DFD : *Dark Firm Dry* : viandes à coupes sombres, fermes et sèches

DGAL : Direction générale de l'alimentation (au ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation)

DGCCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

DGS : Direction générale de la santé

DHA : AGPI docosahexaénoïque (oméga-3 à longue chaîne)

DJA : dose journalière admissible

EFSA : Agence européenne de sécurité alimentaire, *European Food Safety Authority*

EGA : États généraux de l'alimentation

EHEC : *Escherichia coli* entéro-hémorragique

ENSAIA : École nationale supérieure d'agronomie et des industries alimentaires

EPA : acide eicosapentaénoïque (AGPI oméga-3 à longue chaîne)

ETM : élément trace métallique

ESCo : Expertise scientifique collective

EUROP Classement des carcasses bovines et ovines en Europe selon leur conformation. E étant la meilleure conformation.

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GMS : Grandes et moyennes surfaces

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques (produit néoformé lors de la cuisson d'aliments au contact du gras avec une flamme)

HPP : High pressure processing, traitement par hautes pressions

HR : Impact sur le risque ou « hasard ratio »

HVE : Haute valeur environnementale

IC : Intervalle de confiance

IGP : Indication géographique protégée

INAO : Institut national de la qualité et de l'origine

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

Kg cal : Kilocalorie

Kg ec (ou tec) : Kilogramme équivalent carcasse (ou tonne équivalent carcasse)

LA : Acide linoléique (oméga-6, précurseur de l'acide arachidonique (ARA), AGPI oméga-6 à longue chaîne)

LMR : Limite maximum de résidu

LR : Label Rouge

MAMA : Maladie d'Alzheimer et maladies apparentées

MCV : Maladies cardio-vasculaires

MSA : *Meat standard Australia* (Système de classement des carcasses bovines en Australie)

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

OCO : Organismes certificateurs

ODG : Organisme de défense et de gestion

OGM : Organisme génétiquement modifié

OMS : Organisation mondiale de la santé (*World Health Organization* ()

OQALI : Observatoire de la qualité des aliments

PAC : Politique agricole commune

PAI : Produits alimentaires intermédiaires

PCB : Polychlorobiphényles (Contaminants chimiques, bioaccumulables et persistants dans l'environnement)

PCR : Amplification en chaîne par polymérase *(Polymerase Chain Reaction*)

PME : Petites et moyennes entreprises

PNAN : Programme national de l'alimentation et de la nutrition

PNNS : Programme national nutrition santé

POP : *Persistent organic polluant*

PSE : *Pale, soft, exsudative*, viande pâle, molle, exsudative ou viande pisseuse

R&D : Recherche et développement

RR : Risque relatif

SHS : Sciences humaines et sociales

SIQO : Signes officiels d'identification de la qualité et de l'origine

SPIR : Spectroscopie dans le proche infrarouge

STG : Spécialité traditionnelle garantie

TB : Taux butyreux du lait (matière grasse)

TIAC : Toxi-infection alimentaire

TP : Taux protéique du lait

UE : Union européenne

UFN : Unité fonctionnelle nutritionnelle (contribution de 100 g d'aliment à la couverture, sans excès, des besoins quotidiens en énergie et en nutriments pour l'être humain)

UHT : Ultra haute température (traitement thermique permettant de stériliser, le plus souvent appliqué au lait de consommation)

WCRF : *World Cancer Research Fund International* ou Fonds mondial de recherche contre le cancer (

Glossaire

Terme	Définition
Antibiorésistance	Résistance aux traitements antibiotiques des micro-organismes se développant suite à l'utilisation d'antibiotiques
Antioxydant	Molécule permettant d'éviter l'oxydation et donc d'éviter les effets délétères de celle-ci.
Biodisponibilité	Facilité d'absorption du nutriment fourni par un aliment au cours de la digestion
Bioefficacité	Efficacité des nutriments contenus dans un aliment à couvrir en quantité les besoins nutritionnels de l'être humain
Blockchain	Système de traçabilité basé sur les nouvelles technologies du numérique permettant la transparence sur les modes de production.
Caillebotis	Sol perforé permettant l'écoulement des déjections animales, utilisé en bâtiment d'élevage.
Circuit court	Mode de distribution impliquant au maximum un intermédiaire entre le producteur et le consommateur. Ne correspond pas forcément à approvisionnement local, dont l'aire géographique de référence n'est pas officiellement définie.
Conformation	État de développement musculaire d'une carcasse, permet leur classement dans le référentiel EUROP.
Consommation	Peut être calculée selon la méthode des bilans (production -export + import + variation de stock), la méthode des panels de consommateurs (relevé des achats d'un panel représentatif de consommateurs) ou une évaluation par enquête nutritionnelle.
Cracking	Fractionnement des matières premières alimentaires en différents nutriments et molécules aux fonctionnalités spécifiques.
Écoconception	Conception d'un produit cherchant à respecter les principes du développement durable.
Effet cocktail	Effet résultant de l'interaction d'un contaminant avec un autre contaminant ou avec l'aliment
Egalim	Nom de la loi pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et une alimentation saine et durable promulguée le 30 octobre 2018 publiée à la suite des États généraux de l'alimentation
Essentiel	Macro ou micronutriment ne pouvant être synthétisé par l'être humain et devant être apporté par l'alimentation.
Expertise scientifique collective	État des lieux critique des connaissances scientifiques disponibles et publiées par un collectif d'experts interdisciplinaire.
Fardeau sanitaire	Impact des dangers microbiologiques sur la santé humaine.
Fer héminique	Forme de fer présente dans la viande et les poissons, plus disponible lors de la digestion que le fer non héminique, efficace contre l'anémie.
Flexitarien	Consommateur réduisant sa consommation de viande, dans des proportions pouvant être variables.
Gaping	Défaut de déstructuration de la chair de poisson, correspondant à un détachement des feuillets musculaires, faisant apparaître des trous dans le filet
Gaz à effet de serre	Gaz dont l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère participe au réchauffement climatique
Légumineuse	Plante riche en protéine et fixant l'azote de l'air.
Locavore	Consommateur se fournissant de manière locale.
Maladies chroniques d'origine alimentaire	Maladies comme le cancer, l'obésité, le diabète de type 2, les maladies cardio-vasculaires…, non infectieuses et associées à des comportements alimentaires déséquilibrés.

Méta-analyse	Analyse scientifique reprenant et synthétisant l'ensemble des résultats d'études scientifiques sur un sujet spécifique
Néoformé	Produit se formant au cours de fabrication, transformation ou préparation culinaire ayant des effets potentiellement délétères sur la santé humaine.
Nitrosamine	Composé N-nitrosé formé à partir de nitrite de potassium et de nitrate de sodium, qui est associée au cancer colorectal.
Oméga-3	Acides gras de la famille des acides gras polyinsaturés, favorable à la santé humaine. Teneurs élevée dans les poissons gras et dans les aliments issus d'animaux nourris à l'herbe ou avec des aliments riches en oméga 3.
Oméga-6	Acides gras de la famille des acides gras polyinsaturés. Teneurs élevées dans les œufs et la viande. Nutriment essentiel donc à apporter à travers l'alimentation, mais sans excès
Ovoproduits	Produits issus de la séparation du blanc et du jaune d'œuf et/ou de leur préparation, peut-être de première transformation (destinée aux agro-industriels) ou de seconde transformation (destinée aux consommateurs).
pH ultime (pHu)	Mesuré sur la carcasse après abattage, le pH ultime est un indicateur de qualité de la viande.
Propriétés	Correspondent aux dimensions constitutives de la qualité d'un aliment, au nombre de sept dans l'expertise : propriétés organoleptiques, nutritionnelles, sanitaires, commerciales, technologiques, d'usage et d'image.
Propriétés commerciales	À la base du paiement aux éleveurs
Propriétés d'image	Renvoient aux caractéristiques et évaluations environnementales, culturelles, éthiques et à la provenance des produits.
Propriétés nutritionnelles	Capacité d'un produit à répondre aux besoins nutritionnels des consommateurs
Propriétés organoleptiques	Caractéristiques perçues par les organes des sens (couleur, texture, jutosité, odeur, flaveur).
Propriétés sanitaires	Relatives aux dangers ou aux bénéfices associés à la consommation d'un aliment
Propriétés technologiques	Aptitudes de la matière première à la transformation et à la conservation
Propriétés d'usage	Renvoient à la praticité de l'aliment, c'est-à-dire à la facilité d'utilisation et de consommation.
Qualité	Se définit par l'ensemble des propriétés conférant à un aliment l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites d'un utilisateur
Race (ou souche) mixte	Race sélectionnée à la fois pour la production de viande et pour la production de lait ou d'œuf. Dans l'aviculture ces souches sont aussi appelées « lignées à double finalité ».
Régime alimentaire occidental	Régime alimentaire riche en protéines, matière grasse, sucres et en aliments d'origine animale. Concerne principalement l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Australie.
Séquençage	Identification des caractéristiques génétiques (ADN)
Transformation	Procédé ou suite de procédés technologiques modifiant les propriétés des aliments en vue de leur consommation.
Triploïdie	Présence de trois chromosomes (au lieu de deux chromosomes généralement). La triploïdie est induite sur les poissons de façon à améliorer leurs performances.
Typicité	Caractéristique d'un aliment permettant de le relier à un terroir particulier.

Ultra-transformation	Plus haut degré de transformation d'un produit alimentaire. Au qualificatif « ultra-transformation », les technologues préfèreraient celui d'« ultra formulation » du produit
Végétalien	Consommateur ayant exclu tout aliment d'origine animale, y compris par exemple le miel
Végétarien	Consommateur ayant exclu la viande de son alimentation, et potentiellement les œufs, les produits de la mer et/ou les produits laitiers.
Viande de boucherie	Viande non transformée vendue à la coupe, sous forme brute ou hachée d'espèces bovine, ovine, caprine, chevaline ou porcine. La volaille est exclue de cette catégorie.
Viande transformée	Viandes qui ont été transformées par des procédés de salage, séchage, fermentation ou fumage pour améliorer le goût ou la conservation. Au niveau international les viandes transformées incluent les viandes appertisées alors qu'au niveau français, elles correspondent quasi exclusivement aux charcuteries.
White striping	Défaut de déstructuration du filet de volaille (stries blanches)
Wooden breast	Défaut de déstructuration du filet de volaille (zone dure)

Introduction générale

Auteurs : Catherine Donnars, Agnès Girard, Sophie Le Perchec, Sophie Prache, Véronique Santé-Lhoutellier (sections 1 et 2) ; Camille Adamiec, Estelle Fourat et Pierre Sans (sections 3 et 4).

1. La demande d'expertise

Auteurs : Catherine Donnars, Sophie Prache, Véronique Santé Lhoutellier

1.1 Un contexte charnière pour les aliments d'origine animale

L'expertise intervient alors que les niveaux de consommation des aliments d'origine animale, et de viande en particulier, sont fortement questionnés depuis 15 ans. Auparavant marqueur d'une bonne alimentation et d'une hausse du niveau de vie, cette consommation est dorénavant associée aux excès d'un mode de vie occidental urbain. De nombreux rapports ont ainsi évalué les coûts environnementaux dont climatiques associés au développement de l'élevage. La FAO a alerté en 2006 sur le risque que fait peser la hausse actuelle de la consommation de viande dans le monde sur la sécurité alimentaire mondiale. Elle devrait continuer d'augmenter de 20 à 30 % d'ici dix ans selon les projections (Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO, 2018).

Cette consommation est très différente entre grandes régions du monde. Les Européens, les Américains (nord et sud) ou les Australiens ont doublé leur consommation d'aliments d'origine animale depuis 50 ans et mangent deux fois plus de protéines d'origine animale que la moyenne mondiale. Ce niveau élevé a attiré l'attention sur les régimes occidentaux riches en viandes, sucres et graisses animales et végétales. Or, les travaux de médecine et d'épidémiologie nutritionnelles ont montré, dans les années 1990, l'existence de liens entre ces régimes et les maladies cardiovasculaires, les cancers et l'obésité. Ces maladies chroniques d'origine alimentaire sont devenues des causes majeures de mortalité dans le monde et un enjeu de santé publique dans les pays riches. En 2015, l'OMS a confirmé le lien entre certains cancers et une consommation élevée de viande rouge et de charcuterie, et recommande aux plus gros mangeurs de réduire leur consommation. La même année, la convergence entre enjeux environnementaux et de santé nutritionnelle est affirmée par la COP 21 (*Conference of parties)* lors des négociations de Paris. En 2019, le rapport du Groupe international d'experts sur le climat (GIEC) invite à réduire la consommation de aliments d'origine animale dans les pays occidentaux. Ces expertises scientifiques internationales ont apporté beaucoup d'éléments au débat social et continuent d'éclairer le questionnement sur la « trop grande » place des aliments d'origine animale dans l'alimentation.

Les mouvements de la cause animale jouent aussi un rôle important. En divulguant des vidéos de traitements indignes infligés aux animaux dans les abattoirs ou les élevages, ils ont porté les débats sur la scène médiatique. En quelques années, la promotion d'une « végétalisation » du régime alimentaire, qu'elle soit très souple comme dans le flexitarisme, ou complète comme dans le végétalisme, s'est placée au cœur des débats sur les enjeux alimentaires contemporains. Le contenu « vert » de nos assiettes est devenu le marqueur d'un engagement concret, volontaire, politique, citoyen, individuel et collectif. Réputés stables, les comportements alimentaires ont évolué dans les pays développés au cours de la dernière décennie. Près de la moitié des Français se déclaraient « flexitariens » en 2019 (enquête FranceAgriMer 2019). Cette notion qualifie les personnes qui limitent leur consommation de viande, sans être exclusivement végétariennes. Le terme est la traduction d'un mot-valise anglais réunissant « *flexible* » et « *vegetarian* ». Les végétariens représenteraient, eux, environ 5 % de la population française, 6 % en Allemagne et 8 % en Grande-Bretagne. Les végétaliens et végans avoisineraient plutôt 1 %. L'intérêt et la faisabilité d'une substitution des protéines animales par des protéines végétales ont suscité nombre de travaux scientifiques. Ils ont ouvert sur des modélisations de changements dans les régimes alimentaires et sur des travaux de recherche et des innovations tous azimuts. Des entreprises du secteur de l'industrie de la viande et du lait investissent dorénavant dans des alternatives végétales, et les grands groupes agroindustriels et alimentaires prennent progressivement le relais des startups du départ.

Les professionnels et groupes sociaux proches du monde agricole ont argué de la place naturelle et historique des produits animaux dans notre régime omnivore et dans notre patrimoine culturel. Le débat s'est parfois crispé autour d'un jeu de miroirs disqualifiant d'un côté le jusqu'au-boutisme végan et de l'autre, le productivisme agricole. Cependant, les parties prenantes de ces débats ont aussi exploré beaucoup de sujets ardus (la comptabilité des impacts, la modélisation des futurs, la responsabilité morale envers les animaux…) et dérangeants (manger des insectes ou de la « viande » produite *in vitro*). Les questionnements ont mis en relief les limites d'une approche globalisante de l'élevage et de la consommation qui ne tient pas compte des dimensions culturelles, sociales et économiques de l'alimentation. Des études ont pointé les impacts différenciés entre territoires

et entre modes de production, montrant les marges de manœuvre qu'offrent des échelles plus restreintes pour rediscuter les compromis sociétaux.

L'argumentation a souvent progressé à la manière d'un engrenage, une analyse en enclenchant une autre et reconfigurant ainsi successivement les problèmes. Des controverses sont régulièrement apparues. Elles sont souvent le terrain de confrontations scientifiques entre disciplines et approches méthodologiques. Dans le périmètre de l'expertise, les substitutions végétales, le classement des produits, dont ceux dits ultra-transformés, et le niveau recommandé de consommation de produits animaux font l'objet de controverses. Celles-ci se doublent souvent de polémiques sur les conflits d'intérêts de leurs auteurs ou de leurs détracteurs.

S'appuyant régulièrement sur les travaux scientifiques, les acteurs sociaux ont produit leur propre expertise du sujet. Associations, professionnels, groupes de réflexion, institutions parapubliques et politiques ont publié de nombreux rapports questionnant la consommation de viande ou de produits animaux. La majorité de ces travaux semble privilégier une voie médiane autour de la notion « d'alimentation saine et durable ». C'est aussi l'expression que le Gouvernement français a adoptée dans la loi Egalim du 31 octobre 2018, à la suite des États généraux de l'Alimentation (EGA). Notion encore floue, elle autorise une large gamme d'interprétations, notamment sur la place et la composition des produits animaux dans le régime alimentaire.

Sur la période récente, les pays européens semblent trouver une issue politique à la pression sociale en revalorisant les protéines végétales dans l'alimentation humaine. En France, de nouvelles recommandations nutritionnelles du Programme national nutrition santé (PNNS) ont été publiées par Santé Publique France en janvier 2019, à partir des rapports et avis scientifiques de l'Anses (2017) et du Haut Conseil de la Santé publique (2017). Elles modifient assez radicalement les repères alimentaires sur les produits animaux pour les adultes. Une quantité maximale hebdomadaire est recommandée pour la charcuterie (< 150 g/semaine) et la viande de boucherie hors volailles (< 500 g/semaine). Les repères de consommation en produits laitiers diminuent également, passant de trois produits laitiers par jour à deux. Il est en revanche recommandé de consommer du poisson deux fois par semaine, dont un poisson gras, en variant les espèces ainsi que leurs origines géographiques, afin de limiter l'exposition aux contaminants. Les légumes secs apparaissent comme un nouveau groupe d'aliments recommandés, avec une consommation au moins deux fois par semaine, car ils sont naturellement riches en fibres. Les produits céréaliers complets font également l'objet d'une recommandation spécifique. L'autre nouveauté est d'avoir pris en compte la dimension environnementale dans l'élaboration des repères nutritionnels. Il est ainsi conseillé de privilégier les aliments produits selon des modes de production diminuant l'exposition aux pesticides, et de recourir davantage aux produits de saison et aux circuits courts. Enfin, l'attention est portée sur les produits ultra-transformés, dont il est conseillé de réduire la consommation (objectif d'une baisse de 20 % dans les cinq ans à l'échelle de la population française) au profit des produits bruts. Il est également recommandé de s'aider du Nutri-Score pour choisir entre différents produits, en limitant la consommation de produits moins bien classés (D et E).

Parallèlement, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation anime, depuis 2017, une concertation avec les interprofessions agricoles sur leurs orientations, afin qu'elles prennent mieux en compte les attentes sociétales et les impacts environnementaux des filières animales. Les nouveaux plans des filières animales (rédigés en 2018, pour application à partir de 2019) affichent des objectifs de montée en gamme des produits, qu'ils soient sous signe de qualité (issus de l'agriculture biologique en particulier), ou standards.

Plus largement, les pays européens adoptent progressivement des « plans protéines » qui visent en premier lieu à réorienter l'alimentation des animaux vers un approvisionnement local en cultures oléo-protéagineuses afin de s'affranchir de l'importation de soja brésilien (généralement OGM) qui contribue à la déforestation de l'Amazonie. Au-delà de l'agriculture, certains plans affichent un rééquilibrage des sources végétales/animales dans les régimes alimentaires humains. Les Pays-Bas sont le seul pays européen à avoir fixé un objectif chiffré de parité entre l'apport des protéines animales et végétales dans leur régime alimentaire pour 2030, ce qui correspond aux recommandations de l'OMS. En France, la stratégie nationale sur les protéines végétales (pas encore publié en mai 2020) cherche à diversifier l'offre de légumes secs en restauration collective, et les restaurants scolaires sont dorénavant tenus d'offrir un menu végétarien par semaine.

Outre les végétaux, l'innovation inclut parfois d'autres ressources : algues, insectes... Soutenir ces nouvelles voies offre une marge de manœuvre aux gouvernements européens pour dépasser les blocages politiques. C'est en effet un fait général que promouvoir l'innovation est politiquement plus facile que promouvoir la réduction de la consommation ou de la capacité de production d'un secteur économique. Toutefois, cette stratégie n'affronte pas directement l'accompagnement de la décroissance de l'élevage, ni des filières animales. D'ailleurs seule la filière bovine prend acte de la diminution de la consommation de viande dans son plan de filière.

Ce cadrage montre que si la consommation des aliments d'origine animale a fait l'objet d'intenses débats, peu de travaux ont traité conjointement les différentes dimensions de la qualité de ces aliments, ni appréhendé l'ensemble des maillons de la chaîne d'élaboration des produits. C'est ce que cette expertise tâche d'éclairer.

1.2 La demande d'expertise

La demande d'expertise s'est inscrite dans la suite des États généraux de l'alimentation (EGA), lors de la rédaction des plans de filières, l'adoption de la loi Egalim et l'actualisation du Programme national pour l'alimentation (PNA) articulé, pour la période 2019-2023, avec le nouveau Plan national nutrition santé (PNNS), dans le cadre du Programme national de l'alimentation et de la nutrition (PNAN). Les contributions des acteurs et les attentes du public exprimées au cours des 5 mois de consultation des EGA ont mis en exergue de nombreuses questions sur les produits animaux, portant sur les enjeux sanitaires, nutritionnels, environnementaux et le bien-être animal. En charge de veiller à la sécurité et à la qualité des aliments à tous les niveaux de la chaîne alimentaire, ainsi qu'à la santé et à la protection des animaux, et pilote du PNA, la Direction générale de l'alimentation (DGAL, ministère de l'agriculture et de l'alimentation), était particulièrement intéressée par l'articulation entre les dimensions de la qualité des produits et les conditions d'élevage et de transformation, pour orienter la politique de l'alimentation. Les attentes de FranceAgriMer, établissement national des produits de l'agriculture et de la mer et second commanditaire de l'expertise se situaient également au croisement entre qualité des produits, stratégies de des filières et politiques publiques.
L'expertise a été centrée sur les principaux produits d'origine animale consommés en Europe : viandes fraîches bovines, ovines, porcines et de volaille, chair de poissons, lait (de vache, brebis et chèvre), œufs de poule, ainsi que les viandes et poissons transformés, produits laitiers, ovoproduits, ingrédients et plats composites contenant des produits animaux. Parmi les viandes, les travaux sur la santé humaine distinguent la catégorie 'viandes de boucherie' qui exclut les volailles (bœuf, veau, porc, agneau, mouton, cheval et chèvre) et celle des viandes transformées (par salage, salaison, fermentation, fumage ou appertisation) qui correspond en France à la catégorie 'charcuteries'.
Puisqu'il s'agissait d'examiner les produits au regard des conditions d'élevage et de transformation, n'ont été considérés que les produits issus d'animaux élevés en Europe. Ceux majoritairement importés (crevettes) et issus des gibiers ou de la pêche ont été exclus. L'ont été également les produits moins fréquents dans la diète (mollusques, crustacés, viandes caprine, chevaline, de lapin…) ou s'inscrivant dans des problématiques spécifiques (miel). Les procédés de transformation ont été appréhendés au travers de produits courants ayant subis des traitements thermiques ou de hachage, salage, fumaison, fermentation, tels que le lait ultra-haute-température (UHT), les jambons cuits et secs, la viande hachée de bœuf, les fromages. La grande diversité des produits composites a notamment été illustrée par les nuggets de poulet ou les pizzas, par exemple.
Les aliments peuvent être 'standards' ou bénéficier d'un signe de qualité. L'expertise s'est focalisée sur les Signes officiels d'identification de la qualité et de l'origine (SIQO) lesquels sont au nombre de cinq : l'Agriculture biologique (AB), l'Appellation d'origine protégée (AOP), l'Indication géographique protégée (IGP), la Spécialité traditionnelle garantie (STG) et le Label Rouge (LR), ce dernier étant une spécificité française.

2. Les principes et la démarche de l'expertise scientifique collective

Auteurs : Catherine Donnars, Agnès Girard, Sophie Le Perchec

Une Expertise scientifique collective (ESCo) consiste en un état des lieux critique des connaissances scientifiques publiées. La conduite du travail s'appuie sur une charte dont les principes généraux sont la compétence, l'impartialité, la pluralité et la transparence. L'expertise est conduite par un collectif d'experts pluridisciplinaire. Cette pluralité vise à ce que la diversité des connaissances et des arguments scientifiques soit bien prise en compte. L'expertise ne conclut pas sur des recommandations, mais les experts s'attachent à éclairer la décision publique en dégageant les acquis scientifiques et en pointant les controverses, les incertitudes et les lacunes dans les savoirs. Le présent exercice a mobilisé 20 experts pendant 2 ans.

2.1 La composition du collectif d'experts

Les experts ont été choisis au vu de leurs publications scientifiques et de la complémentarité de leurs domaines respectifs d'expertise. Un peu plus de la moitié des experts avait une entrée par les produits et les filières ($^1/_3$ était spécialiste des productions, ⅕e de la transformation), et l'autre moitié par des enjeux transversaux, soit sanitaires (¼), soit sociaux (⅕e : sociologie, économie, droit). Les recherches publiques sur le sujet relevant, en France, quasiment exclusivement d'INRAE, les experts appartiennent très majoritairement à l'Institut. Néanmoins, un quart des experts sont extérieurs, venant de l'université de Liège en Belgique, de l'Anses, de l'ENSAIA, du CNRS et d'AgroParisTech. Si le choix des experts repose prioritairement sur leur reconnaissance scientifique (nombre de publications et citations), varier les âges permet de mieux couvrir l'évolution des disciplines. Deux tiers des experts ont plus de 20 ans d'ancienneté dans leur domaine, 17 % moins de 10 ans. Enfin, le collectif compte 9 femmes (sur 20 personnes), dont les deux pilotes scientifiques.

Plusieurs règles visent à se prémunir des risques de partialité dans la conduite de l'exercice :

- Les missions dévolues à la maîtrise d'ouvrage (commanditaires : DGAL, FranceAgriMer) et à la maîtrise d'œuvre (INRAE) sont explicitées par une convention.
- Jusqu'à la remise du rapport final, les experts travaillent en comité autonome. Les conclusions sont de leur responsabilité.
- La pluralité des points de vue au sein du collectif s'est exprimée, avec néanmoins un noyau majoritaire de spécialistes des produits animaux et de leur transformation, chercheurs qui entretiennent de nombreuses collaborations (entre eux ou entre leurs co-auteurs).
- Les experts remplissent des déclarations de liens d'intérêts portant sur les cinq dernières années. Celles-ci sont examinées par une commission déontologique. Aucun conflit d'intérêt individuel n'a été repéré. L'absence de liens entre les experts et des partenaires privés n'est pas visée (« scientifique dans sa tour d'ivoire »). En revanche, qualifier ces liens permet d'éclairer des risques potentiels de biais. Plus que l'absence ou l'exclusion d'une catégorie d'acteurs, c'est la diversité de ces catégories qui peut prémunir contre d'éventuels partis pris. Cette analyse a montré que le collectif d'experts entretenait davantage d'interactions avec les acteurs agricoles qu'avec les acteurs de l'aval ou associatifs.
- L'expertise repose sur un dépouillement le plus exhaustif possible de la littérature scientifique internationale afin de garantir la prise en compte de la variété des approches scientifiques. Les publications des experts représentent 8 % des publications du corpus dont 4 % avec un expert en position de leader (premier ou dernier auteur).

Enfin, dans un souci d'information, plusieurs directions des ministères et agences publiques ont été associées à la formulation du cahier des charges de l'expertise et/ou à son suivi (des directions du ministère de l'Agriculture, la direction générale de la Santé, l'Anses et l'Ademe). Une consultation des acteurs a eu lieu dans le cadre du Comité national de l'alimentation (CNA), notamment ceux impliqués dans son groupe de travail « Pour une alimentation favorable à la santé ». Une douzaine de membres de ce groupe a participé à deux réunions, auxquelles ont été associés des acteurs associatifs et des filières aquacoles, qui sont sous-représentés au CNA.

2.2 Les sources mobilisées dans l'expertise

L'exploration bibliographique a été faite dans les bases de données *Web of Science* (WoS), PubMed et EconLit. Les requêtes bibliographiques sont en annexe 1 de l'introduction. Les mots-clés utilisés pour les équations de recherche bibliographique initiales relèvent des champs des animaux, produits animaux et attributs de la qualité. Les mots-clés ont été adaptés par chapitre, sur la base du vocabulaire de la communauté scientifique ciblée. Ont été privilégiées les publications des quinze dernières années dans le WoS, et les méta-analyses et articles de synthèse des 10 dernières années dans PubMed.

Le corpus cité dans le rapport est constitué de 3 500 références et quelque 10 000 auteurs. Environ 80 % des sources sont postérieures à 2002 et 36 % à 2013 (Figure 0.2). Les articles les plus anciens sont des références de base dans les différents domaines. Les sources proviennent principalement d'institutions scientifiques françaises (INRAE en tête : 17 % des sources-), européennes, américaines (USA, Canada, Brésil) et d'Asie du Sud-Est.

Parmi 3 500 références citées, 2 852 sont des articles scientifiques et 92 % d'entre eux sont référencés dans le WoS (Figure 0.3). Environ ⅕e des articles sont des synthèses (*reviews*) ou des méta-analyses, ces dernières étant essentiellement citées dans le chapitre dédié à la santé. Les 178 rapports émanent surtout de l'Anses, FranceAgriMer, INAO, FAO ou l'OMS. Les sources juridiques sont relativement importantes, réparties entre les cahiers des charges des produits sous signe de qualité et la législation française et européenne appliquée aux produits alimentaires d'origine animale. Les chapitres du rapport décrivant la qualité des produits, par espèce animale, mobilisent la majorité des références bibliographiques (60 %) ; puis viennent les domaines scientifiques liés à la santé et les sciences sociales. La répartition entre les principaux domaines scientifiques (Figure 0.4) montre la prééminence des approches relevant des sciences alimentaires et de l'élevage (plusieurs entrées selon les espèces) puis de la nutrition et de la santé. De nombreux autres domaines scientifiques complètent ce triptyque.

Figure 0.2 Répartition temporelle des sources citées

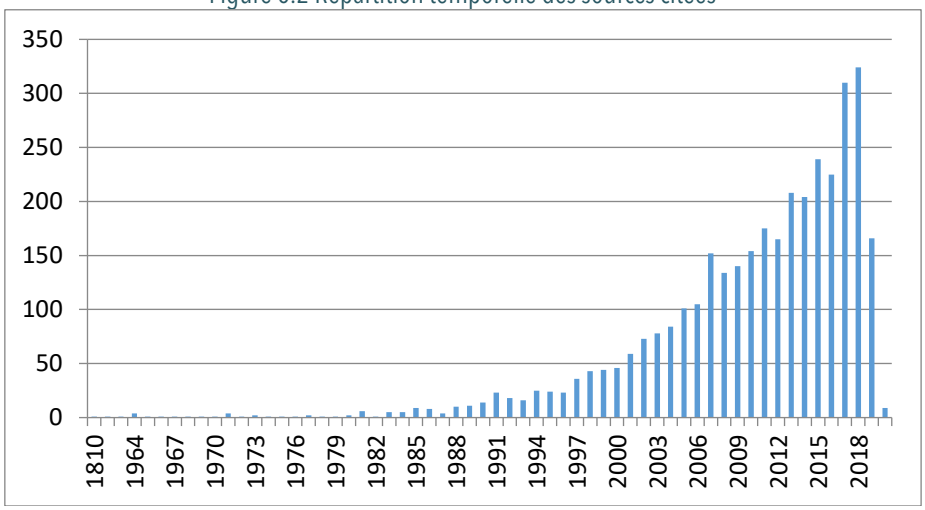


Figure 0.3 Répartition t typologie des documents (droite)

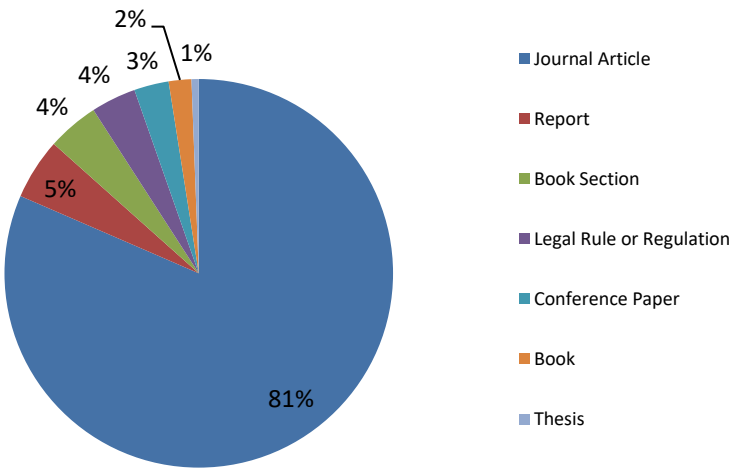
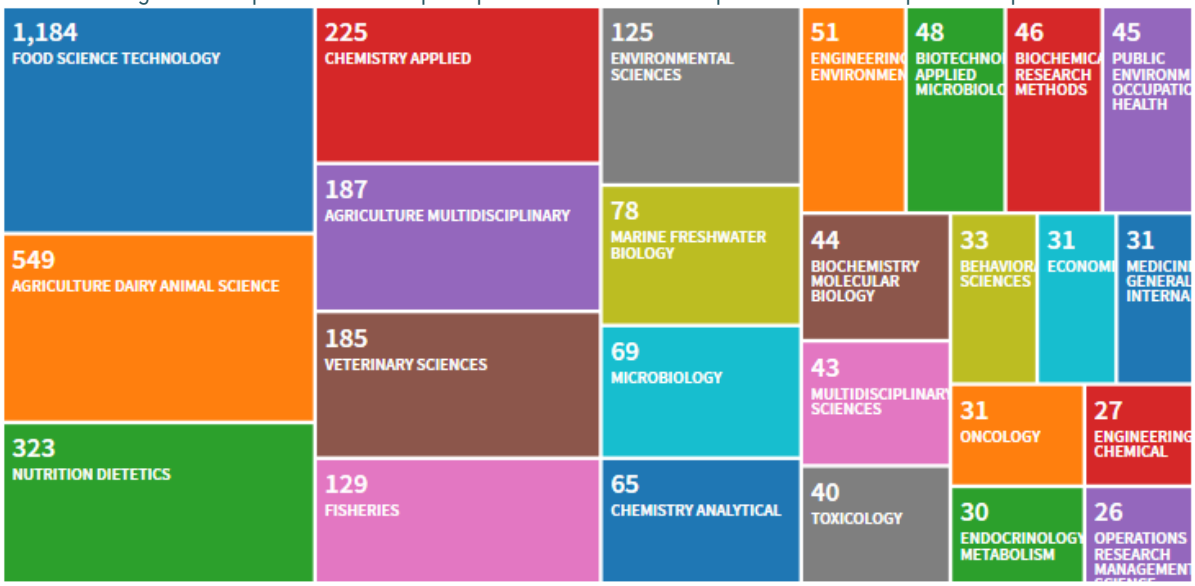


Figure 0.4 Représentation des principaux domaines scientifiques associés au corpus de l'expertise



Le nombre de revues scientifiques citées est particulièrement important (687), ce qui illustre l'ampleur du périmètre de l'expertise. ***Meat Science* est, de loin, la première revue citée** (Tableau 0.1). Elle est axée sur les produits carnés, couvre de l'amont à l'aval des filières et les différents volets des propriétés, ainsi que l'acceptabilité sociale des produits carnés par les consommateurs. Les revues ont généralement une notoriété excellente. La revue française *Inra Productions animales* a édité sur les dernières années plusieurs numéros spéciaux dédiés à la qualité des produits animaux avec des articles de synthèse ce qui explique sa représentation dans cette expertise (tableau 0.1).

Tableau 0.1 Les 10 revues les plus citées dans le rapport

Revue	Nombre d'articles	Pourcentage d'articles	Notoriété à 2 ans (JCR 2018) [1]
Meat Science	290	10 %	Excellente
Journal of Dairy Science	96	3 %	Excellente
Food Chemistry	80	3 %	Excellente
Inra Productions Animales / Productions Animales	75	3 %	Médiocre
Journal of Agricultural and Food Chemistry	68	2 %	Exceptionnelle
Aquaculture	61	2 %	Excellente
Poultry Science	53	2 %	Excellente
Animal	51	2 %	Excellente
Journal of the Science of Food and Agriculture	47	2 %	Excellente
Journal of Food Science	44	2 %	Correcte

1 Notoriété : Données JCR® Thomson Reuters – Traitement INRAE Crebi Noria du 27/04/2020, prise en compte de la meilleure notoriété dans la catégorie WoS

Plusieurs ouvrages de synthèse faisant référence ont été publiés récemment en français :

- Kondjoyan, A. ; Picard, B. 2019. *La viande : de l'élevage à l'assiette*. Clermont-Ferrand : Presses universitaires Blaise Pascal (PUBP), 64 p.
- Ellies-Oury, M.-P. ; Hocquette, J.-F. 2018. *La chaîne de la viande bovine*. Production, transformation, valorisation et consommation. Paris : Lavoisier. 324 p.
- Gillis, J.C. ; Ayerbe, A. 2018. *Le Fromage*. Paris : Tec & Doc Lavoisier, 1 001 p.
- Berthelot, V. 2018. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris : Lavoisier Tec & Doc (*Coll. Agriculture d'aujourd'hui*). 442 p.

La revue française *Inra Productions animales* a édité plusieurs numéros spéciaux sur la qualité des produits animaux avec des articles de synthèse ce qui justifie sa présence dans les 10 revues les plus citées. Près de 50% des articles cités dans le rapport proviennent de numéros spéciaux

Titres des numéros spéciaux de "*Inra Productions animales*"

- Matières grasses alimentaires et qualité des produits (2001)
- Domestication des poissons (2004)
- Bien-être animal (2007)
- "Elevage bio" (2009)
- Les nouveaux enjeux de la nutrition et de l'alimentation du porc (2009)
- Qualité de l'oeuf (2010)
- Bien-être du poulet de chair (2011)
- Élevage caprin (2012)
- La vache et le lait (2013)
- Palmipèdes à foie gras (2013)
- PhénoFinlait : Phénotypage et génotypage pour la compréhension et la maîtrise de la composition fine du lait (2014)
- Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ? (2014)
- Spécificités de l'élevage de ruminants (2014)
- Le muscle et la viande (2015)
- Élevage bovin allaitant (2017)
- L'élevage en Europe : une diversité de services et d'impacts (2017)
- Ressources alimentaires pour les animaux d'élevage (2018)
- De grands défis et des solutions pour l'élevage (2019)

3. Tendances de consommations des aliments d'origine animale

Auteurs ; Pierre Sans (coord), Estelle Fourat et Camille Adamiec

Cette section dresse un rapide panorama des tendances la consommation d'aliments d'origine animale. Le chapitre 5 approfondit les déterminants de cette consommation.

3.1 Trajectoire de la consommation des protéines d'origine animales dans le Monde

L'accès matériel à la nourriture conditionne le développement des sociétés humaines et façonne les modèles alimentaires (quantités d'aliments et structures des rations alimentaires). Grâce à des observations sur une longue période, il est possible de mettre en évidence les différentes phases du changement de ces modèles dans la plupart des pays. Après une phase d'économie de subsistance, cette transition alimentaire se caractérise par une croissance quantitative de la consommation des aliments traditionnellement consommés, essentiellement d'origine végétale, sous l'effet conjugué de l'augmentation des productions agricoles et de la baisse des prix (Combris et Soler, 2011; Grigg, 1995). Puis, s'opère une transition nutritionnelle caractérisée par un changement radical de la structure du régime lorsque la saturation calorique apparaît : des aliments plus coûteux tels que les viandes et les fruits et légumes se substituent partiellement aux produits traditionnellement consommés au fur et à mesure que le revenu moyen par habitant augmente (Popkin, 2006).

De fait, durant les 50 dernières années, la consommation de viande a fortement progressé à l'échelle mondiale, passant de 23,1 kg/hab/an en 1961 à 43,2 kg/hab/an en 2013, selon les données de la FAO. Il en va de même pour les protéines d'origine laitière. Les pays les plus développés ont ainsi atteint, en moyenne, des niveaux de consommation de protéines d'origine animale (POA) qui dépassent leurs besoins en protéines. Différents auteurs ont montré une certaine convergence des modèles alimentaires, en particulier concernant l'essor de la consommation des POA, d'abord sur des groupes de pays à pouvoir d'achat élevé (Blandford, 1984 ; Gil *et al.*, 1995 ; Herrmann et Roder, 1995) puis sur des pays à revenus intermédiaires (Regmi *et al.*, 2008) : lorsque le revenu augmente, la part des dépenses alimentaires destinée à l'achat de protéines croît en même temps que la part des POA dans le régime alimentaire et ce dernier se rapproche de celui des pays développés. Durant les 25 dernières années, les pays émergents ont vu leur consommation de viande, particulièrement celle issue de monogastriques, fortement augmenter (Delgado, 2003 ; Speedy, 2003). Ce constat, qui semble accréditer la thèse d'une convergence des modèles alimentaires, conduit à s'interroger sur les niveaux de consommation de POA qu'atteindront ces pays : peut-on envisager qu'ils se rapprocheront de ceux des pays développés ou atteindront-ils plus tôt un plafond de consommation (Pointereau, 2019 ; Tilman et Clark, 2014) ? Cette question renvoie à la détermination d'un point d'inflexion dans la courbe de consommation (forme en U renversé de la relation entre la consommation de viande et le niveau de revenu). Il existerait ainsi un niveau de revenu au-delà duquel la consommation de POA diminuerait. En utilisant des données issues de 150 pays pour la période 1980-2009, Rivers Cole et McCoskey (2013) confirment l'existence d'un tel point pour la consommation de viandes (bovine, porcine et volaille). Cependant, celui-ci se situe à un niveau de revenu par habitant élevé (estimé à 36 400 USD) que peu de pays dans le monde atteignent. Vranken *et al.* (2014), sur des données portant sur 120 pays pour la période 1970-2007 estiment que ce point d'inflexion se situerait entre 32 et 55 000 USD courants (Vranken *et al.*, 2014). Pour les pays en dessous du point d'inflexion, une augmentation de 1 % du Produit intérieur brut (PIB) induirait une augmentation de 0,5 % de la consommation de viande, alors qu'une baisse de 1 % de ce même PIB génèrerait une réduction de la consommation de 1,2 % pour les pays au-delà du point d'inflexion.

Outre la hausse du revenu par habitant, l'urbanisation, les prix relatifs des aliments, la participation des femmes au marché du travail ainsi que l'adoption d'un mode de vie occidental constituent les principaux moteurs de l'augmentation de la consommation des produits carnés (Guyomard *et al.*, 2012 ; Kearney, 2010 ; Milford *et al.*, 2019). Au sein de cette évolution globale, la place relative des différentes sources de protéines est fortement influencée par des facteurs sociologiques et culturels et par la disponibilité des produits (Mathijs, 2015 ; Sans et Combris, 2015). Ainsi, à l'échelle de l'Union européenne, la part des différents groupes de produits animaux varie fortement d'un pays à l'autre (Tableau 0-1). Il en va de même lorsqu'on analyse la place relative des différentes viandes dans la consommation de quelques pays européens (Tableau 0.2).

Tableau 0.2 : Part des groupes de produits animaux dans la consommation apparente en 2013 (Source : d'après données FAOstat[1])

		Minium observé	Maximum observé
Moyenne U.E	348,6 kg/hab/an	219,7 (Chypre)	554,2 (Finlande)
viandes	*21,9 %*	14 % (Finlande)	34 % (Chypre)
produits de la mer	*6,4 %*	2 % (Hongrie, Roumanie)	15 % (Portugal)
œufs	*3,4 %*	2 % (Finlande)	7 % (Slovaquie)
lait (hors beurre)	*68,2 %*	52 % (Chypre, Espagne)	78 % (Finlande, Roumanie)

L'analyse de l'évolution de la consommation des produits d'origine animale aux échelles mondiale et européenne ayant été largement abordée lors de l'expertise collective sur les rôles, impacts et services issus des élevages européens (Dumont *et al.*, 2016), nous aborderons spécifiquement le cas de la France dans les développements qui suivent.

3.2 Évolution de la consommation des produits d'origine animale en France (1973-2017)

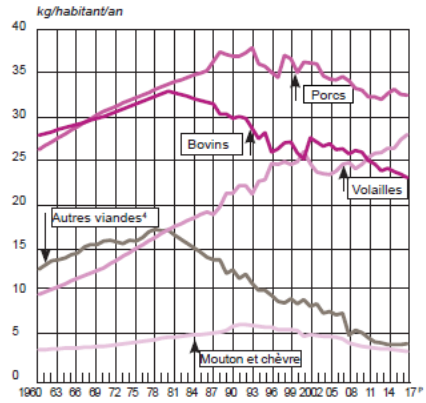
Volumes et structure de la consommation

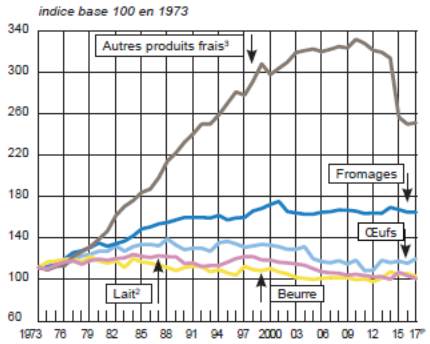
La consommation totale des produits carnés a connu deux périodes bien distinctes :
- la première (1973-1999) se caractérise par une forte croissance (environ +1,5 % par an) : la consommation apparente, mesurée par la méthode des bilans (Encadré 1), passe ainsi de 4,03 millions de tonnes équivalent carcasse (tec) en 1973 à 5,6 millions de tec en 1999. Durant cette période, la consommation croît à un rythme supérieur à celui de la population française, ce qui se traduit par une augmentation très sensible de la consommation par habitant, qui passe de 77,3 kg/hab/an à 93,6 kg/hab/an en 1998, soit le point culminant de la consommation.
- la seconde période (2000-2017) voit la consommation totale stagner, voire régresser certaines années, pour s'établir à 5,56 millions de tec en 2017. La population française continuant à croître, la consommation par habitant diminue de 7,6 kg/hab/an sur cette période (FranceAgriMer, 2018a).

L'évolution de la consommation totale de produits carnés sur la période s'accompagne d'une profonde modification de sa structure en termes d'espèces. Si pour toutes (à l'exception du cheval), les volumes totaux consommés en 2017 sont supérieurs à ceux de 1973, les évolutions diffèrent significativement (Figure 0.5) : elles sont favorables aux viandes de monogastriques (Figure 0-2). Sur l'ensemble de la période, la consommation annuelle de viandes de volailles par habitant progresse de 12,7 kg, celle de porc de 0,8 kg alors que celle de bovin diminue de 5,8 kg.

[1] http://www.fao.org/faostat/fr/

Figure 0.5 : Consommations françaises de viande, d'œuf et de produits laitiers (1973-2017). Source : GraphAgri, 2018





	1990	2000	2010	2016	2017p
Viandes [1-2-3]		kg/habitant/an			
Bovine	29,8	25,7	25,8	23,2	22,8
Porcine	37,1	35,2	33,1	32,6	32,5
Mouton et chèvre	5,4	4,9	3,0	2,5	2,4
Volaille	21,0	24,7	24,4	27,3	27,9
dont poulet	11,0	12,1	14,8	18,0	18,8
dinde	5,5	6,8	5,0	4,8	4,7
canard	1,8	3,3	3,1	2,7	2,6
Autres viandes⁴	12,0	8,0	4,6	3,2	3,3
Total viandes	106,2	98,5	91,0	88,8	88,9

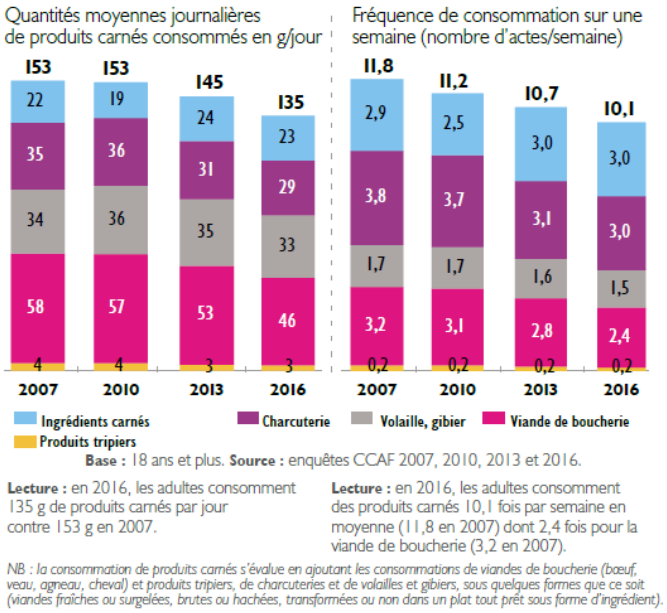
1. En équivalent carcasse, y compris graisses de découpe.
2. La consommation correspond à la consommation humaine.
3. Dans le calcul de la consommation humaine, seuls sont comptabilisés depuis 2000 les abattages dans les abattoirs contrôlés.
4. Viandes d'équidés,de lapin, de gibier, ainsi que les abats destinés à la consommation humaine. En 2008, une modification dans la prise en compte des abattages conduit à une rupture de série.
Champ : France, y compris Dom à partir de 1996.
Source : Agreste - Bilans d'approvisionnement

	1990	2000	2010	2016	2017P
Produits[1]		kg/habitant/an			
Lait de consommation[2]	73,9	76,5	65,7	64,6	62,6
Autres produits frais[3]	26,9	35,1	39,4	29,1	29,2
Beurre	8,8	8,7	7,7	8,2	8,0
Fromage	22,7	24,7	23,7	23,5	23,5
Œufs	14,9	15,5	13,5	13,1	13,7

1. La consommation correspond à la consommation humaine.
2. Lait de consommation, yaourt nature, lait autoconsommé ou vendu à la ferme.
3. Yaourts aromatisés, crème fraîche, desserts lactés frais et fromages frais.
Champ : y compris Dom à partir de 1996 pour les œufs et 1997 pour le lait et les produits laitiers.
Source : Agreste - Bilans d'approvisionnement

Ces tendances sont confirmées par les évaluations de consommation réelle émanant du Crédoc (Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie): elles confirment la baisse de la consommation journalière de produits carnés (essentiellement pour les viandes de boucherie et la charcuterie). Cette baisse se double d'une réduction de la fréquence de consommation des produits carnés.(Figure 0-6 et Encadré 1).

Figure 0-6 : Évolution des quantités de produits carnés consommés et de la fréquence de consommation entre 2007 et 2016. (Source : (Tavoularis et Sauvage, 2018))



Base : 18 ans et plus. **Source :** enquêtes CCAF 2007, 2010, 2013 et 2016.

Lecture : en 2016, les adultes consomment 135 g de produits carnés par jour contre 153 g en 2007.

Lecture : en 2016, les adultes consomment des produits carnés 10,1 fois par semaine en moyenne (11,8 en 2007) dont 2,4 fois pour la viande de boucherie (3,2 en 2007).

NB : la consommation de produits carnés s'évalue en ajoutant les consommations de viandes de boucherie (bœuf, veau, agneau, cheval) et produits tripiers, de charcuteries et de volailles et gibiers, sous quelques formes que ce soit (viandes fraîches ou surgelées, brutes ou hachées, transformées ou non dans un plat tout prêt sous forme d'ingrédient).

La consommation de produits laitiers progresse sur l'ensemble de la période (Figure 0-2 – droite). En 2017, elle est composée de 62,6 kg de lait/hab/an, 23,5 kg de fromage, 8 kg de matière grasse et 29,2 kg d'autres produits frais (yaourts, desserts lactés, fromages frais). La consommation d'œufs est stable sur la période et en légère régression sur les 10 dernières années (Figure 0-2 – droite) : elle s'élève à 13,7 kg en 2017. Enfin, la consommation de produits de la mer (poissons, coquillages, crustacés et céphalopodes) progresse de 5 kg par habitant et par an entre 1999 et 2016, s'établissant à 33,6 kg/hab/an (dont 23,6 kg de poisson) (FranceAgriMer, 2018b).

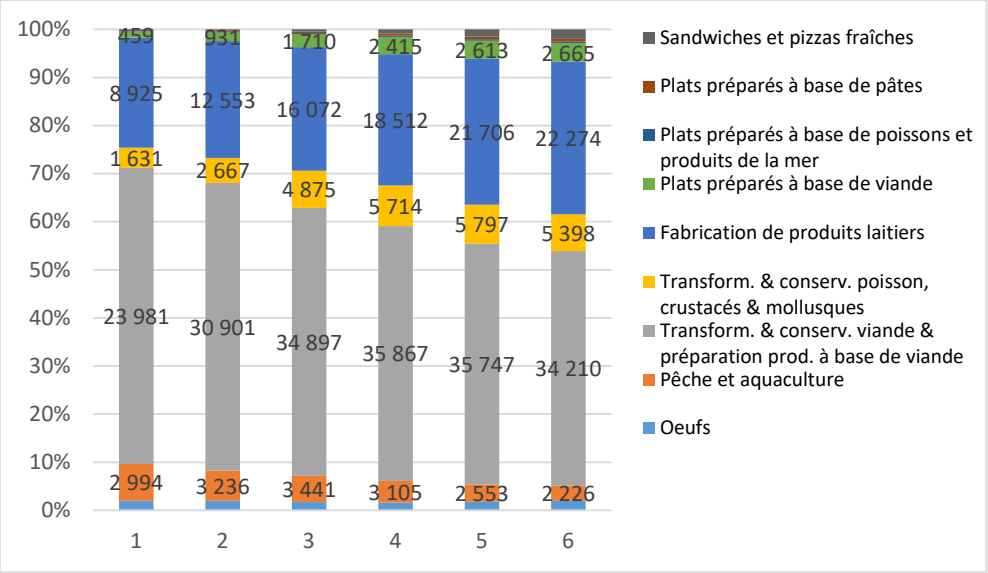
La modification de la structure de la consommation en termes d'espèces (pour les viandes) s'accompagne de profonds changements dans la nature des produits consommés pour les produits carnés et laitiers : à titre d'exemple, pour ces derniers, sur la période 1975- 1995, la consommation de laits écrémés et demi-écrémés se substitue presque complètement à celle de lait entier (Nichele *et al.*, 2008). Sur la période 1973-2017, la consommation de fromages est multipliée par 1,7 et celle des produits frais (yaourts, desserts lactés, fromages frais…) par plus de 2,6 alors que la consommation de lait liquide et de beurre baisse (Figure 0-2).

Les comportements de consommation des ménages changent ainsi sous l'effet des évolutions de la société et des modes de vie : développement de l'emploi des femmes, urbanisation croissante, pause méridienne sur le lieu de travail…. Ces évolutions se traduisent par la demande de produits qui procurent des services divers : durées de conservation permettant de réduire la fréquence des achats, portions correspondant aux usages, préparations culinaires épargnant du temps ou des tâches considérées comme peu agréables, produits préparés palliant la perte des savoir-faire culinaires (Duchene *et al.*, 2017). A titre d'exemple, d'après les données du panel Kantar (Encadré 1), les morceaux entiers à bouillir et à braiser de viande bovine, utilisés pour l'élaboration de bœuf bourguignon ou de pot de feu, se vendent mal en dépit d'un prix relatif favorable, alors que les steaks hachés sont passés de 25 % (1995) à 42 % des achats de bœuf des ménages pour leur consommation au domicile en 2016 et sont plébiscités par les jeunes générations. Par ailleurs, les volailles entières qui représentaient 36 % des achats des ménages en 2000 ne représentent plus que 24 % des volumes achetés en 2017. Sur la même période, la part des découpes est passée de 46 % à 47 % et la part les élaborés de volailles (panés, nuggets...) est passée de 17 % à 29 %.

Le développement du prêt-à-manger

L'offre des industries agro-alimentaires s'est adaptée à cette demande de praticité en proposant des produits-services (Monceau *et al.*, 2002) : elle a ainsi activement contribué à l'émergence d'un marché des plats préparés et du prêt-à-manger au domicile comme en restauration hors foyer, en substitution partielle de la consommation de produits moins transformés et de l'autoconsommation. Cette tendance a contribué à rendre moins visible la consommation des produits animaux ingérés sous la forme d'ingrédients incorporés dans des produits transformés (pizzas, biscuits des protéines d'origine laitière...). L'analyse du volume de dépenses des ménages (en millions d'euros 1994) montre l'émergence sur la période considérée (1973-2017) des marchés des produits laitiers, des plats préparés et des sandwiches et pizzas fraîches et la stagnation des produits bruts (pêche et aquaculture par exemple) (Figure 0.7).
La croissance de la consommation de produits transformés s'accompagne de l'émergence d'inquiétudes quant à leur effet sur la santé (détaillé dans le chapitre 5.) Ainsi, en 2015, seulement 35 % des personnes interrogées considéraient les aliments transformés comme « très » ou « assez sûrs » pour la santé humaine, soit à une baisse de 4 points par rapport à 2011 (Jauneau *et al.*, 2016). Les médias jouent un rôle important quant à la mise en visibilité des risques encourus par la consommation d'aliments industriels et transformés « suspects », c'est-à-dire ne contenant pas ce qu'ils sont censés contenir (lasagnes de bœuf contenant de la viande de cheval) ou contaminés par des intrants chimiques (œufs contaminés au Friponil). Ils se font également le relais de peurs collectives parfois infondées en lien avec les effets potentiels des contaminants présents dans les aliments (Murk *et al.*, 2018; Nicolosi, 2007).

Figure 0.7 : Évolution de la consommation effective des ménages en volume (prix chaînés, base 1994) pour les produits d'origine animale (1973-2017) (Source : d'après Insee ; Comptes de la Nation)



3.3 La restauration de la confiance : un enjeu majeur

La diffusion rapide et massive d'informations, plus ou moins remises dans leur contexte, la multiplication des contrôles et le progrès des méthodes analytiques laissent à penser que l'alimentation n'a jamais été aussi peu sûre. L'émergence d'inquiétudes, souvent protéiformes, et la survenue de crises alimentaires en est le symptôme. Elle se traduit, entre autres, par l'intérêt actuel pour les produits dits « naturels » ou issus de l'agriculture biologique : la recherche de produits moins transformés et/ou issus de modes de production agricole perçus comme plus vertueux traduit la volonté de rassurer.

Ce besoin, pour le consommateur, d'une confiance renouvelée se traduit également par la recherche de formes alternatives de distribution privilégiant les circuits courts ou la consommation de produits locaux. D'après le dernier Recensement général de l'agriculture (2010), 21 % des exploitations agricoles étaient concernées. Cette part est cependant plus faible pour celles impliquées dans des activités d'élevage, à l'exception des productions de caprins laitiers et d'ovins viande (Tableau 0-4).

Tableau 0-4 : Part des exploitations agricoles commercialisant en circuits courts, dont vente directe (Source : Agreste RA 2010 - traitement Idele). Source : Nozieres-Petit et al., 2018

Type d'exploitations agricoles (sans double compte)	Bovins viande	Ovins viande	Ovins lait	Bovins lait	Caprins
Nombre d'exploitations	87 292	11 852	4 879	75 636	6 894
% avec vente directe ou circuits courts pour produits laitiers	ns	ns	16,0 %	4,7 %	42,6 %
% avec vente directe ou circuits courts pour produits viande	10,5 %	20,4 %	9,6 %	4,7 %	12,2 %

Une autre voie classiquement utilisée par les consommateurs pour se rassurer est l'achat de produits élaborés d'après un cahier des charges dont l'application est garantie par les Pouvoirs publics. Dans le domaine de l'alimentation, les Signes d'identification de la qualité et de l'origine (SIQO) répondent à ces caractéristiques. Le niveau de recours à cette solution est très contrasté selon la famille considérée. Elle est faible pour les viandes de boucherie où les SIQO (hors bio) représentent environ 3 % de la production nationale (116 000 tec en 2016 dont 77 000 tec pour le porc frais et la charcuterie) (Agreste, 2018). Il faut y ajouter les 34 000 tec (dont 22 500 tec pour les viandes bovines) issues de l'agriculture biologique (soit 0,9 %

de la production totale). Même si la consommation de ces viandes connaît une forte croissance, elle reste peu développée tant en volume qu'en nombre de ménages concernés ou de fréquence d'achat (Sans et Boizot-Szantaï, 2020).
La place des SIQO est plus importante en aviculture : en 2016, 110 millions de têtes (soit environ 10 % de la production) ont été produites sous SIQO (hors bio) et 513 millions d'œufs (soit 5 % de la production). En 2016, environ 10 millions de poulet de chair et 5 millions de poules pondeuses ont été certifiés bio. La production de viande de volailles bio est évaluée à 14 000 tec (0,7 % de la production) et celle d'œufs évaluée à 1 milliard de pièces (7 % de la production) (Agence Bio, 2017). Enfin, 257 000 t de produits laitiers ont été produits sous SIQO (hors bio) en 2016 : les fromages sous AOP mobilisent environ 10 % de la collecte laitière et représentent 15 % de la consommation de fromage en volume et 25 % en valeur (Nozieres-Petit *et al.*, 2018). Pour les pâtes persillées et pâtes pressées non cuites, leur part dans la production française de ces catégories dépasse les 25 %. Enfin, la collecte de lait biologique croît rapidement (s'établissant à 616 millions de litres en 2017 soit 2,5 % de la collecte totale française).

Au bilan, l'évolution de la consommation alimentaire en général – et de celle de produits d'origine animale en particulier – est traversée par plusieurs tendances qui agissent (et agiront) en combinaison pour la transformer (Oudin et Gassie, 2018) :

- *la personnalisation croissante des consommations, avec une affirmation de l'individu et, en contrepartie, une responsabilisation des mangeurs vis-à-vis des conséquences de leurs pratiques alimentaires ;*
- *le développement des enjeux de santé, en particulier liés aux maladies alimentaires (obésité, diabète de type 2…) ;*
- *l'accélération des rythmes de vie (multiplication des activités, densification des temps sociaux), associée à un nomadisme des urbains, rendant l'alimentation souvent secondaire par rapport à d'autres préoccupations (travail, loisirs, déplacements...)*
- *la distanciation physique et cognitive croissante des mangeurs vis-à-vis des producteurs et des produits alimentaires, qui se traduit par un besoin accru de transparence, d'informations, mais également par une recherche de proximité, de lien social, une volonté de reprendre en main leur alimentation ;*
- *la prégnance croissante des enjeux de durabilité, la recherche de nouveaux rapports à la nature ;*
- *le mouvement de numérisation de nos sociétés ;*
- *des préoccupations de pouvoir d'achat qui restent fortes pour une grande partie de la population* ».

Ces tendances dessinent un panorama actuel et prospectif des principales évolutions des consommations alimentaires des Français.

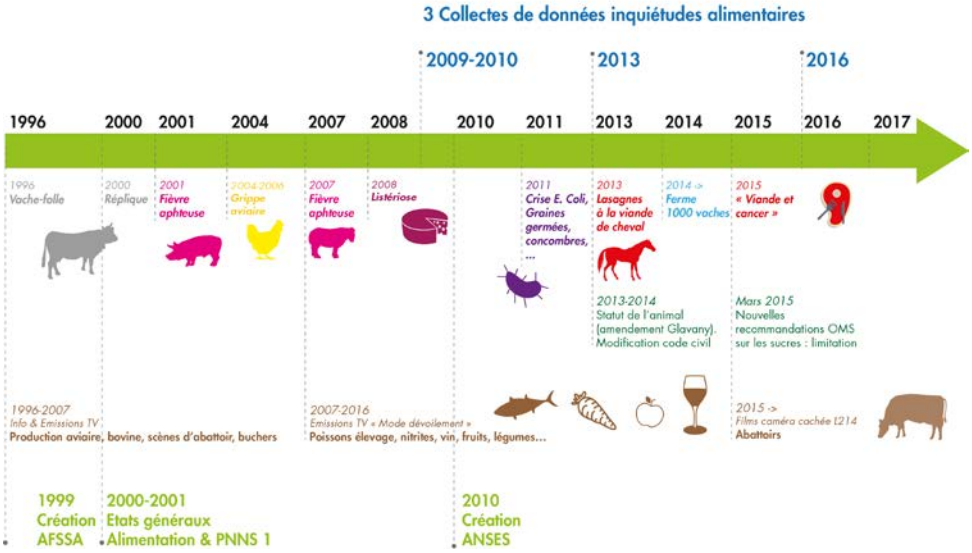
4. Les grandes tendances influençant les choix des aliments d'origine animale

Les choix alimentaires résultent de changements sociétaux (individualisation, féminisation de la société, rapport au temps) qui impactent aussi bien le rapport à l'alimentation (répartition des tâches alimentaires, temps accordé à la cuisine) que les rapports au corps, à la santé, et aux animaux. Nous avons sélectionné les grandes tendances qui nous semblent les plus déterminantes dans la question du choix des aliments d'origine animale : a) les nouveaux rapports aux risques alimentaires b) la médicalisation et la nutritionnalisation de l'alimentation c) la naturalisation de l'alimentation et d) l'importance accordée à la santé des animaux, des humains et de la planète.

4.1 Les nouveaux rapports aux risques alimentaires

Au XIXe siècle, les principaux risques sanitaires étaient situés dans l'environnement naturel. Aujourd'hui, les facteurs qui ont des répercussions sur notre santé et notre alimentation - prions, contaminants chimiques, bactéries multi-résistantes - sont généralement considérés comme le produit et le résultat d'interventions humaines. En nous éloignant progressivement des notions de fatalité ou de destin pour expliquer et comprendre les conséquences de la modernité, nous avons modifié notre rapport au risque et à ses réalités quotidiennes (Armstrong, 1993). Les conséquences directes de ce nouveau rapport au risque sont visibles au travers des prises de conscience politique, citoyenne, collective et individuelle autour des enjeux sanitaires propres à l'alimentation. L'enquête « Inquiétudes » menée en 2016 montre combien les scandales dans le domaine de l'alimentation comme dans celui de la santé (Figure 0-8) érodent progressivement la confiance des individus, comme en témoigne les effets durables des crises de la vache folle (Kilani, 2002; Masson *et al.*, 2003 ; Poulain, 2016). La question de la qualité des produits animaux s'inscrit pleinement dans ce contexte d'inquiétudes collectives à propos de la nourriture qui sera développée dans le chapitre 5 de ce document. Ainsi, l'importance accordée à la qualité des produits alimentaires – par le biais de nos attentions portées à la santé, à la maladie et à la mort - est travaillée par une quête sans cesse renouvelée du meilleur équilibre possible entre bénéfices et risques. Cette quête est notamment visible dans la volonté, propre aux sociétés actuelles, de tendre vers une meilleure santé par la maîtrise toujours accrue de l'alimentation. Pourtant, face aux innovations incessantes des industries alimentaires et confrontés à une multiplicité d'avis ou d'injonctions contradictoires, et d'expertises évolutives, les individus ont du mal à faire le tri dans la multiplicité des informations disponibles afin de choisir en toute confiance.

Figure 0-8 : Frise des évènements marquants pour les filières alimentaires. Source :Poulain, 2016



4.2 La médicalisation et la nutritionnalisation

La recherche d'un équilibre idéal entre bénéfices et risques a favorisé, durant deux décennies, une réflexion sur l'alimentation à travers le prisme de la « médicalisation » (Fischler, 1990 ; Poulain, 2002). Les sociologues et anthropologues de l'alimentation montrent que l'alimentation s'imbrique de plus en plus dans la sphère du médical, exacerbant la dimension santé de la qualité au détriment parfois d'autres dimensions, comme celle du plaisir ou de la culture. Les recherches mettent en lumière les effets d'un contexte qui incrimine de plus en plus souvent l'alimentation dans le développement de différentes

pathologies (obésité, cancers, maladies cardio-vasculaires, diabète) et analysent les tendances actuelles qui lient les problèmes de santé au souci de soi et de son alimentation. Depuis quelques années, suivant une tendance déjà à l'œuvre dans les pays anglo-saxons et au Japon, une nouvelle catégorie d'aliments a fait son apparition en France : les aliments santé. Le terme d'« alicament » – contraction d'aliment et de médicament - désigne des produits déclarés comme possédant des qualités nutritionnelles particulières (allégations santé). Conçus dans le but d'accompagner les politiques nutritionnelles de réduction des risques liés à l'alimentation, ces produits industriels sont accompagnés d'une communication et d'un marketing santé de grande ampleur. Cependant, le terme même d'alicament est polysémique. Il suggère une acception large des différents rapports qu'entretiennent les individus avec l'action de se soigner en mangeant ou de manger tout en se soignant. Les recherches des américains et des anglo-saxons au sujet des *functionnal food*, *organic food*, *healthy food* (Devcich *et al.*, 2007; Szakaly *et al.*, 2012) présentent le rapport complexe que les consommateurs entretiennent avec l'hybridation entre aliment et médicament. Depuis quelques temps, la morale alimentaire médicalisée et égocentrée s'essaie, par de nouveaux qualificatifs, à devenir une éthique alimentaire altruiste et environnementale (Adamiec, 2015).

4.3 La naturalisation de l'alimentation

Le concept de « naturalité » traduit en France les potentialités du champ de recherche ouvert aux États-Unis par les *healthy food* et *organic food* (Debucquet et Merdji, 2008 ; Lepiller, 2010; Mathiot, 2019). Que ce soit dans le discours des consommateurs, dans les représentations collectives autour de l'alimentation ou dans leur usage à des fins de récupération marketing par des groupes industriels, les recherches en sciences humaines montrent la fracture entre les aliments dits « industriels » et les aliments dits « naturels ». Un aliment naturel serait pur, non artificialisé par la main de l'homme : le lait est l'aliment parfait, directement consommable sans nécessité de transformation. Cette opposition est mise à l'épreuve dans bien d'autres cas, notamment pour les végétaux et fruits tels que nous les consommons aujourd'hui, car ils sont aussi le résultat d'interventions humaines alors même qu'ils sont qualifiés de naturels. La rhétorique de la naturalité s'appuie également sur la tradition même si le pain, le fromage, par exemple, sont des aliments transformés participant ainsi à un processus de naturalisation des techniques (Lepiller, 2016). Cette naturalisation se déploie également dans le domaine de l'environnement (standards de durabilité) et de l'éthique animale, en invoquant la nature des animaux. Une naturalisation moins intuitive se fonde sur l'efficacité physiologique des aliments et sur les sciences de la nature. Enfin, un aliment naturel serait « vivant » tandis qu'un aliment industriel serait « mort » (Tetart, 2004). Ce ne sont pas directement les activités humaines orientées sur la production, la conservation et la transformation des aliments qui les dénaturaliseraient mais les modalités d'intervention humaine « de la fourche à la fourchette » susceptibles de sauvegarder ou, à l'opposé, de corrompre leur naturalité (Lamine, 2008 ; Lepiller, 2012). Les représentations du naturel ne suivent cependant pas des logiques taxinomiques similaires selon les acteurs considérés: l'agro-industrie produit par exemple une déclinaison de la naturalité qui ne recouvre que très partiellement les logiques de catégorisation des consommateurs (végétariens, « bio-puristes ») ou des tenants du « manger sain » (Adamiec, 2016). L'opposition formulée par les consommateurs entre le caractère naturel ou industriel des aliments induit une méfiance envers les aliments dits composites.

4.4 La santé des animaux, des humains et de la planète

Un contexte de lutte et de revendications (politique, social, économique) se cristallise autour de la consommation ou de la non-consommation des produits animaux, à partir de domaines très différents (Sorba, 2015). Depuis la critique antisystème à la dissension politique, religieuse, économique et éthique, en passant par la mise en cause des distinctions de genre et à celle de la médecine conventionnelle, on voit apparaître des conflictualités et des dissidences en lien avec l'alimentation (Wolff *et al.*, 2019). Tandis que certains choisissent la voix des urnes, comme le parti animaliste, d'autres privilégient la diffusion de documentaires ou de vidéos « chocs »[2], la mise en scène de performances sur des places publiques ou l'action directe, parfois violente, comme l'attaque de boucheries et d'abattoirs. Dès les années 1990, les pratiques d'alimentation de certaines franges de la population ont été étudiées par les sciences humaines et sociales et les sciences politiques sous l'angle de la revendication sociale vis-à-vis de l'industrialisation, de la mondialisation, de l'écologie ou de la santé (Belasco, 2007). Les liens entre alimentation et santé sont étudiés comme un élément important de contre-cultures émergentes (Guthman, 2003). Aujourd'hui, ces contre-cultures se déploient dans un paysage de consommation contemporaine dans lequel le corps et la santé des consommateurs font l'objet d'un certain nombre de moralismes et de contre-moralismes, d'un appel constant à être acteur et responsable de son corps, de sa santé et de son alimentation (Kristensen *et al.*, 2011). On voit émerger – sur internet comme dans la société - des communautés de consommateurs qui résistent aux injonctions sanitaires ou s'en

[2] Vidéos lors de l'abattage : L214 https://www.l214.com/video. Performances : Collectif 269 Life France – Action mondiale du 26 septembre 2015 https://www.youtube.com/watch?v=YJG_4qQ5o1A

écartent volontairement (anti-lait, pro ou anti-viande) et qui exposent et revendiquent une reconnaissance de leurs expertises en matière de définition de la qualité alimentaire (y compris sur les dimensions éthiques).
Les grandes tendances dégagées dans cette introduction dessinent le monde dans lequel les choix en faveur ou défaveur des aliments d'origine animale se construisent, monde perçu comme de plus en plus incertain, risqué et complexe. Nous poursuivrons dans le chapitre 5 l'analyse de l'influence de ces tendances sur la perception de la qualité des produits animaux et la gestion des risques du point de vue des consommateurs et du législateur.

Références bibliographiques des sections 3 et 4

Adamiec, C., 2015. When Healthful Eating Becomes an Obsession. In: Fischler, C., ed. *Personal Dietary Requirements*. Paris: Odile Jacob, 151-161.

Adamiec, C., 2016. *Devenir sain: des morales alimentaires aux écologies de soi*. Rennes - Tous: Presses universitaires de Rennes - Presses universitaires François-Rabelais, 210 p.

Agence Bio, 2017. *Le marché alimentaire bio en 2016 : estimation de la consommation des ménages en produits alimentaires biologiques en 2016*, p. 48.

Agreste, 2018. Les signes officiels de qualité. *GraphAgri 2018*. Paris: Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, p. 113. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Graf1839_-_Signes_de_qualite.pdf.

Armstrong, D., 1993. Public-health spaces and the fabrication of identity. *Sociology-the Journal of the British Sociological Association*, 27 (3): 393-410. http://dx.doi.org/10.1177/0038038593027003004

Belasco, W.J., 2007. *Appetite for change: How the counterculture took on the food industry*. Cornell University Press, 327 p.

Blandford, D., 1984. Changes in food consumption patterns in the OECD area. *European Review of Agricultural Economics*, 11 (1): 43-64. http://dx.doi.org/10.1093/erae/11.1.43

Combris, P.; Soler, L.G., 2011. Consommation alimentaire: tendances de long terme et questions sur leur durabilité. *Innovations Agronomiques*, 13: 149-160. https://www6.inrae.fr/ciag/content/download/3672/35732/file/Vol13-10-Combris.pdf

Debucquet, G.; Merdji, M., 2008. Manger la nature : le bon et le sain. In: Fischler C. (dir.); Masson E. (dir.), eds. *Manger. Français, Européens et Américains face à l'alimentation*. Paris: Odile Jacob, 210-221.

Delgado, C.L., 2003. Rising consumption of meat and milk in developing countries has created a new food revolution. *Journal of Nutrition*, 133 (11): 3907S-3910S. http://dx.doi.org/10.1093/jn/133.11.3907S

Devcich, D.A.; Pedersen, I.K.; Petrie, K.J., 2007. You eat what you are: Modern health worries and the acceptance of natural and synthetic additives in functional foods. *Appetite*, 48 (3): 333-337. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2006.09.014

Duchene, C.; Lambert, J.L.; Tavoularis, G., 2017. La consommation de viande en France. *Les Cahiers du CIV*: 68 p.

Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p.

Fischler, C., 1990. *L'homnivore : le goût, la cuisine et le corps*. Paris: Odile Jacob, 414 p.

FranceAgriMer, 2018a. *Les marchés des produits laitiers, carnés et avicoles. Bilan 2017, perspectives 2018*. Paris: FranceAgriMer, 144 p. https://www.franceagrimer.fr/content/download/55817/document/BIL-VIA-LAI-Bilan2017-Perspectives2018.pdf

FranceAgriMer, 2018b. *Consommation de produits de la pêche et de l'aquaculture 2017. In Données et bilan FranceAgriMer* Paris: FranceAgriMer.

Gil, J.M.; Gracia, A.; Perez, L.P.Y., 1995. Food-consumption and economic-development in the European-Union. *European Review of Agricultural Economics*, 22 (3): 385-399. http://dx.doi.org/10.1093/erae/22.3.385

Grigg, D., 1995. The nutritional transition in Western-Europe. *Journal of Historical Geography*, 21 (3): 247-261. http://dx.doi.org/10.1006/jhge.1995.0018

Guthman, J., 2003. Fast food/organic food: Reflexive tastes and the making of 'yuppie chow'. *Social & Cultural Geography*, 4 (1): 45-58. http://dx.doi.org/10.1080/1464936032000049306

Guyomard, H.; Darcy-Vrillon, B.; Esnouf, C.; Marin, M.; Russel, M.; Guillou, M., 2012. Eating patterns and food systems: critical knowledge requirements for policy design and implementation. *Agriculture & Food Security*, 1 (1): 13. http://dx.doi.org/10.1186/2048-7010-1-13

Herrmann, R.; Roder, C., 1995. Does food-consumption converge internationally - measurement, empirical tests and determinants. *European Review of Agricultural Economics*, 22 (3): 400-414. http://dx.doi.org/10.1093/erae/22.3.400

Jauneau, P.; Daudey, E.; Hoibian, S., 2016. *Baromètre de la perception des risques sanitaires 2015 : les risques sanitaires préoccupent moins*. Paris: CREDOC, 45 p.

Kearney, J., 2010. Food consumption trends and drivers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 365 (1554): 2793-2807. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2010.0149
Kilani, M., 2002. Crise de la «vache folle» et déclin de la raison sacrificielle. *Terrain*, n° 38: 113-126. http://dx.doi.org/10.4000/terrain.1955
Kristensen, D.B.; Boye, H.; Askegaard, S., 2011. Leaving the milky way! The formation of a consumer counter mythology. *Journal of Consumer Culture*, 11 (2): 195-214. http://dx.doi.org/10.1177/1469540511402449
Lamine, C., 2008. *Les intermittents du bio: pour une sociologie pragmatique des choix alimentaires émergents*. Paris: Quae, 341 p.
Lepiller, O., 2010. Chasser le naturel: l'évolution de la notion de naturalité dans l'alimentation à travers les livres français de diététique "naturelle" depuis 1945. *Le choix des aliments: informations et pratiques alimentaires de la fin du Moyen Âge à nos jours, Rennes, Tours, Presses Universitaires de Rennes, Presses Universitaires François Rabelais de Tours*. Rennes - Tours: Presses Universitaires de Rennes - Presses Universitaires François Rabelais de Tours (Collection "Tables des hommes"), 97-119. https://www.researchgate.net/profile/Olivier_Lepiller/publication/278380400_Chasser_le_naturel_l%27evolution_de_la_notion_de_naturalite_dans_l%27alimentation_a_travers_les_livres_francais_de_dietetique_naturelle_depuis_1945/links/5610f0ba08aec422d115823a/Chasser-le-naturel-levolution-de-la-notion-de-naturalite-dans-lalimentation-a-travers-les-livres-francais-de-dietetique-naturelle-depuis-1945.pdf
Lepiller, O., 2012. *Critiques de l'alimentation industrielle et valorisations du naturel: sociologie historique d'une "digestion" difficile (1968-2010)*. Doctorat en Sociologie. Université de Toulouse II-Le Mirail, Toulouse. 712 p. https://agritrop.cirad.fr/583898/1/LEPILLER-These-2012.pdf
Lepiller, O., 2016. Valoriser le naturel dans l'alimentation. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 51 (2): 73-80. http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2016.02.006
Masson, E.; Fischler, C.; Laurens, S.; Raude, J., 2003. La crise de la vache folle: "psychose", contestation, mémoire et amnésie. *Connexions*, 80 (2): 93-104. http://dx.doi.org/10.3917/cnx.080.0093
Mathijs, E., 2015. Exploring future patterns of meat consumption. *Meat Science*, 109: 112-116. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.007
Mathiot, L., 2019. Préserver le naturel dans l'alimentation. Pratiques de stockage et de conservation du rural à l'urbain. *Revue des Sciences sociales*, (61): 132-141. http://dx.doi.org/10.4000/revss.3667
Milford, A.B.; Le Mouël, C.; Bodirsky, B.; Rolinski, S., 2019. Drivers of meat consumption. *Appetite*, 141: 104313. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2019.06.005
Monceau, C.; Blanche-Barbat, E.; Echampe, J., 2002. La consommation alimentaire depuis quarante ans. De plus en plus de produits élaborés. *INSEE première*, 846: 1-4. https://www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/442/1/ip846.pdf
Murk, A.J.; Rietjens, I.; Bush, S.R., 2018. Perceived versus real toxicological safety of pangasius catfish: a review modifying market perspectives. *Reviews in Aquaculture*, 10 (1): 123-134. http://dx.doi.org/10.1111/raq.12151
Nichele, V.; Andrieu, E.; Boizot-Szantai, C.; Caillavet, F.; Darmon, N., 2008. L'évolution des achats alimentaires: 30 ans d'enquêtes auprès des ménages en France. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 43 (3): 123-130. http://dx.doi.org/10.1016/S0007-9960(08)73712-X
Nicolosi, G., 2007. "Orthorexic Society" and media narrations. Advertising and food labeling. 9 (1): 2-5.
Nozieres-Petit, M.O.; Baritaux, V.; Couzy, C.; Derville, M.; Perrot, C.; Sans, P.; You, G., 2018. Transformations of the French meat and dairy product sectors: the role of breeders. *Inra Productions Animales*, 31 (1): 69-82. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.1.2221
Oudin, B.; Gassie, J., 2018. Anticiper les comportements alimentaires de demain: un outil de sensibilisation destiné aux acteurs de la filière alimentaire. *Notes et études socio-économiques*, 43 (mars): 7-42. http://www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/74313/1/nese43-1_2018.pdf
Pointereau, P., 2019. *Le revers de notre assiette : Changer d'alimentation pour préserver notre santé et notre environnement* Paris: Solagro, 63 p. https://inra-dam-front-resources-cdn.wedia-group.com/ressources/afile/488399-52932-resource-le-revers-de-notre-assiette.pdf
Popkin, B.M., 2006. Global nutrition dynamics: the world is shifting rapidly toward a diet linked with noncommunicable diseases. *American Journal of Clinical Nutrition*, 84 (2): 289-298. http://dx.doi.org/10.1093/ajcn/84.2.289
Poulain, J.P., 2002. *Sociologies de l'alimentation*. Paris: PUF (Coll. Sciences sociales et Sociétés).
Poulain, J.P., 2016. *De la perception des risques à la prise en compte des inquiétudes alimentaires Première analyse des résultats de l'étude «Inquiétudes» 2016 (OCHA-Université de Toulouse-CREDOC)*, 31 p. http://www.lemangeur-ocha.com/wp-content/uploads/2016/12/conference-jean-pierre-poulain-ttem-2016.pdf

Regmi, A.; Takeshima, H.; Unnevehr, L.J., 2008. Convergence in Food Demand and Delivery: Do Middle-Income Countries Follow High-Income Trends? *Journal of Food Distribution Research*, 39 (1): 116-122. http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.55621

Rivers Cole, J.; McCoskey, S., 2013. Does global meat consumption follow an environmental Kuznets curve? *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 9 (2): 26-36. http://dx.doi.org/10.1080/15487733.2013.11908112

Sans, P.; Boizot-Szantaï, C., 2020. Consumption of organic meat products in France: An analysis based on panel data (scanner dataset). *New Medit*, 19 (1): 83-99.

Sans, P.; Combris, P., 2015. World meat consumption patterns: An overview of the last fifty years (1961-2011). *Meat Science*, 109: 106-111. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.012

Sorba, J.M., 2015. Un renouveau par le militantisme associatif, La réappropriation d'un patrimoine : les fromages corses à la Fiera di u casgiu. In: Biancarelli, B.; Sorba, J.-M., eds. *Corse, les fromages. Casgi, furmagli à brocci*. Ajaccio: Éditions Albiana, 190-197.

Speedy, A.W., 2003. Global Production and Consumption of Animal Source Foods. *Journal of Nutrition*, 133 (11): 4048S-4053S. http://dx.doi.org/10.1093/jn/133.11.4048S

Szakaly, Z.; Szente, V.; Kover, G.; Polereczki, Z.; Szigeti, O., 2012. The influence of lifestyle on health behavior and preference for functional foods. *Appetite*, 58 (1): 406-413. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2011.11.003

Tavoularis, G.; Sauvage, E., 2018. Les nouvelles générations transforment la consommation de viande. *Credoc : consommation et modes et de vie*, n°300: 4 p. https://www.credoc.fr/download/pdf/4p/CMV300.pdf

Tetart, G., 2004. *Le sang des fleurs: une anthropologie de l'abeille et du miel*. Paris: Odile Jacob, 288 p.

Tilman, D.; Clark, M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515 (7528): 518-522. http://dx.doi.org/10.1038/nature13959

Vranken, L.; Avermaete, T.; Petalios, D.; Mathijs, E., 2014. Curbing global meat consumption: Emerging evidence of a second nutrition transition. *Environmental Science & Policy*, 39: 95-106. http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2014.02.009

Wolff, V.; Adamiec, C.; Fidolini, V., 2019. Penser les dissidences et les conflictualités « par et dans » l'alimentation. *Revue des Sciences sociales*, 61. http://dx.doi.org/10.4000/revss.3959

Annexe 1 : Comment mesure-t-on la consommation des viandes ?

Il existe trois façons de mesurer la consommation des viandes :

- **la mesure par la méthode des bilans** : c'est la méthode de référence utilisée par les services statistiques pour évaluer la consommation et permettre des comparaisons internationales. Elle part du principe que les utilisations des carcasses abattues (consommation humaine et exportations) s'équilibrent avec les ressources (volumes abattus sur le territoire national et importations), en tenant compte de la variation des stocks entre le début et la fin de l'année. On calcule ainsi une consommation dite apparente qui comprend toutes les viandes mises à la consommation pour un usage par les ménages à domicile, hors foyer ou sous forme de viandes intégrées dans des plats cuisinés. Ces quantités sont exprimées, au niveau individuel, en kg équivalent carcasse (kg ec) : il ne s'agit donc pas de la quantité réellement consommée puisque ce qui arrive dans l'assiette du consommateur est une quantité dite nette, débarrassée de l'essentiel de la graisse et des os présents au niveau de la carcasse. A titre d'exemple, la consommation française de viande bovine en 2014 (24,2 kg ec/hab/an) correspond à un volume de 16,2 kg de viande net.

- **l'évaluation par la méthode des panels de consommateurs** : elle est le fait de sociétés privées (Kantar et Nielsen en France) qui interrogent un échantillon constant de ménages représentatifs de la population française à qui il est demandé de faire un relevé systématique de leurs achats pour la consommation à domicile sur une période de 4 ans. Par définition, cette source ne couvre donc pas la consommation hors foyer : les quantités évaluées par cette méthode sont donc inférieures à celle de la méthode des bilans. A partir des données collectées sur les 13 périodes de 4 semaines au niveau du panel, on extrapole les résultats à l'ensemble de la population française. Cette source présente l'intérêt de pouvoir mesurer rapidement des évolutions des quantités consommées mais aussi de caractériser les ménages acheteurs (taille du ménage, catégorie socio-professionnelle, lieu d'habitation…) et de connaître les prix des produits achetés, et ce pour un niveau fin de nomenclature des produits (viande hachée, produits élaborés…).

- **l'évaluation par des enquêtes nutritionnelles** : le Crédoc réalise tous les 3 ans une enquête sur les Comportements et consommations alimentaires en France (CCAF). Tous les membres d'un échantillon de foyers représentatif de la population française (1 500 ménages en 2016) renseignent pendant 7 jours un carnet de consommation où sont notés les quantités consommées et les lieux de consommation. Les personnes enquêtées estiment les quantités ingérées à partir du portionnaire photographique standardisé SU.VI.MAX où des plats sont présentés. A partir de ces informations, des quantités consommées sont extrapolées pour la population française : elles sont généralement exprimées en g/j.

En raison des différences importantes entre ces méthodes, les quantités évaluées ne sauraient être comparées entre elles.

Annexe 2 : requêtes pour la recherche bibliographique exploratoire (Pub Med et WOS)

Requêtes dans PubMed

User query:
(((meat OR beef OR pork OR chicken* OR poultry OR fish OR fishes OR dairy product* OR milk OR eggs OR cheese OR food-groups) AND ((Meta-Analysis[ptyp] OR Review[ptyp]) AND ("2018/01/01"[PDat] : "3000/12/31"[PDat]) AND Humans[Mesh] AND (English[lang] OR French[lang]))) AND (((Neoplasm* OR Neoplasia* OR Tumor OR tumors OR cancer OR cancers OR cardiovascular diseases OR diabete* AND type 2 OR type 2 diabete* OR diabete* AND mellitus OR mellitus diabete* OR sarcopenia OR anemia OR Alzheimer OR cognition disorders OR osteoporotic fracture* OR osteoporosis OR mortality OR causes of death)) AND ((Meta-Analysis[ptyp] OR Review[ptyp]) AND ("2018/01/01"[PDat] : "3000/12/31"[PDat]) AND Humans[Mesh] AND (English[lang] OR French[lang]))) AND ((Meta-Analysis[ptyp] OR Review[ptyp]) AND ("2018/01/01"[PDat] : "3000/12/31"[PDat]) AND Humans[Mesh] AND (English[lang] OR French[lang]))

meat	"meat"[MeSH Terms] OR "meat"[All Fields]
beef	"red meat"[MeSH Terms] OR ("red"[All Fields] AND "meat"[All Fields]) OR "red meat"[All Fields] OR "beef"[All Fields]
pork	"pork meat"[MeSH Terms] OR ("pork"[All Fields] AND "meat"[All Fields]) OR "pork meat"[All Fields] OR "pork"[All Fields]
poultry	"poultry"[MeSH Terms] OR "poultry"[All Fields]
fish	"fishes"[MeSH Terms] OR "fishes"[All Fields] OR "fish"[All Fields]
fishes	"fishes"[MeSH Terms] OR "fishes"[All Fields]
milk	"milk, human"[MeSH Terms] OR ("milk"[All Fields] AND "human"[All Fields]) OR "human milk"[All Fields] OR "milk"[All Fields] OR "milk"[MeSH Terms]
eggs	"eggs"[MeSH Terms] OR "eggs"[All Fields]
cheese	"cheese"[MeSH Terms] OR "cheese"[All Fields]
Humans[Mesh]	"humans"[MeSH Terms]
Tumor	"tumour"[All Fields] OR "neoplasms"[MeSH Terms] OR "neoplasms"[All Fields] OR "tumor"[All Fields]
tumors	"tumours"[All Fields] OR "neoplasms"[MeSH Terms] OR "neoplasms"[All Fields] OR "tumors"[All Fields]
cancer	"neoplasms"[MeSH Terms] OR "neoplasms"[All Fields] OR "cancer"[All Fields]
cancers	"neoplasms"[MeSH Terms] OR "neoplasms"[All Fields] OR "cancers"[All Fields]
cardiovascular diseases	"cardiovascular diseases"[MeSH Terms] OR ("cardiovascular"[All Fields] AND "diseases"[All Fields]) OR "cardiovascular diseases"[All Fields]
sarcopenia	"sarcopenia"[MeSH Terms] OR "sarcopenia"[All Fields]
anemia	"anaemia"[All Fields] OR "anemia"[MeSH Terms] OR "anemia"[All Fields]
Alzheimer	"alzheimer disease"[MeSH Terms] OR ("alzheimer"[All Fields] AND "disease"[All Fields]) OR "alzheimer disease"[All Fields] OR "alzheimer"[All Fields]
cognition disorders	"cognition disorders"[MeSH Terms] OR ("cognition"[All Fields] AND "disorders"[All Fields]) OR "cognition disorders"[All Fields]
osteoporosis	"osteoporosis, postmenopausal"[MeSH Terms] OR ("osteoporosis"[All Fields] AND "postmenopausal"[All Fields]) OR "postmenopausal osteoporosis"[All Fields] OR "osteoporosis"[All Fields] OR "osteoporosis"[MeSH Terms]
mortality	"mortality"[Subheading] OR "mortality"[All Fields] OR "mortality"[MeSH Terms]
causes of death	"cause of death"[MeSH Terms] OR ("cause"[All Fields] AND "death"[All Fields]) OR "cause of death"[All Fields] OR ("causes"[All Fields] AND "death"[All Fields]) OR "causes of death"[All Fields]

Équations de recherche dans le WOS

# 19	51,576	#15 AND #5 **Refined by: DOCUMENT TYPES:** (ARTICLE OR REVIEW OR BOOK CHAPTER) AND **LANGUAGES:** (ENGLISH OR FRENCH) AND **WEB OF SCIENCE CATEGORIES:** (AGRICULTURE DAIRY ANIMAL SCIENCE OR FOOD SCIENCE TECHNOLOGY OR AGRICULTURE MULTIDISCIPLINARY OR ENVIRONMENTAL SCIENCES OR FISHERIES OR MARINE FRESHWATER BIOLOGY OR NUTRITION DIETETICS OR MULTIDISCIPLINARY SCIENCES) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 18	70,747	#15 AND #5 **Refined by: DOCUMENT TYPES:** (ARTICLE OR REVIEW OR BOOK CHAPTER) AND **LANGUAGES:** (ENGLISH OR FRENCH) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 17	76,323	#15 AND #5 **Refined by: DOCUMENT TYPES:** (ARTICLE OR REVIEW OR BOOK CHAPTER) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 16	82,186	#15 AND #5 *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 15	28,674,444	#14 OR #13 OR #12 OR #11 OR #10 OR #8 OR #7 OR #6 *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 14	1,289,155	TS=(Consumer* OR "consumer* acceptance*" OR "Consumer* behavio?r" OR "consumer* attitude*" OR "consumer* preference*" OR "consumption trends" OR "Consumption patterns" OR "fair consumption" OR "diet acceptability" OR preferences OR attitudes OR "food behavio?r" OR " food choice*" OR comitted OR "Shared consumption" OR vegatar* OR vegan* OR flexitar* OR " Meat lovers" OR "Social representation*" OR "Meat eating culture" OR "Dietary change" OR "dietary patterns" OR habits OR "meat-eating habits" OR motivation OR domestic cooking OR "home food preparation" OR "Eating out" OR "out-of-home catering" OR "collective catering") *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 13	2,678,526	TS=((Ethics near/4 production) OR ethic OR ethics OR cruelty OR slaughter OR green OR Healthy OR "organic food" OR "organic farm*" OR "natural food" OR label OR GMO or antibiotics OR "controlled origin food" OR "labeling requirement*" OR "enriched product*" OR Taste OR hedonism OR hedonic OR (Animal near/2 right*) OR (animal NEAR /2 welfare) OR "Functional value*" OR "functional food" OR "functional meat*" OR "livestock feeding" OR "battery farming" OR "natural way" OR "Sustainable food" OR AMAP OR Market place OR "Farm house" OR Butcher OR retail* OR supermark* OR "Meat substitute*" OR "vegan product*" OR "Veggie milk" OR spirulina OR "Vegetable proteins*" OR "B12 vitamin") *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 12	14,064,354	TS=("Willingness-to-pay" OR WTP OR "Willingness to pay" OR preferences OR attitudes OR behavior OR consum* OR choices OR "diet acceptability" OR acceptance OR "Food culture" OR health OR welfare OR Vegetar* OR vegan* OR flexitar* OR substitut* OR cue OR cues OR concern* OR free OR price OR prices OR demand OR demands OR environment* OR retail* OR supermark* OR "meat processor*" OR "meat industry" OR industry OR cutting) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 11	8,745,827	TS =(livestock OR farming OR husbandry OR feeding OR forage OR concentrate* OR supplement* OR grass OR maize OR breed OR breeding OR selection OR genetic OR genetics OR phenotype OR genotype OR environment* OR stall OR building OR barn OR "milking parlo?r" OR milking OR herd OR season OR diet OR "rearing system*" OR "organic production" OR "organic system*" OR "free range" OR "label rouge" OR certified OR slaughter) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 10	11,002,933	TS=("Technological propert*" OR "technological qualit*" OR "technological yield" OR "post mortem pH" OR "acid meat" OR (meat NEAR/3 physico-chemical) OR "meat conductivity" OR yield OR "drip loss" OR ph OR post-mortem OR PSE OR exudative OR gaping OR freshness OR water holding capacity OR oxidation susceptibility OR drying OR smoking OR processing OR packaging OR storage OR cooking OR heating OR process OR "high pressure processing" OR fermentation OR preservation OR homogeni?ation OR salting OR pasteuri?ation OR marinating) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 9	2,445,217	TS=("Sanitary qualit*" OR safe* OR EHEC OR contaminant* OR nitrosocompounds OR nitrosamine OR microorganism* OR antibiotic* OR residue* OR pesticide* OR PCB OR PCBs OR DL-PCB OR NDL-PCB) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 8	5,377,156	TS=("Nutritional qualit*" OR "nutritional value*" OR "nutritional composition" OR proteins OR "essential amino acid*" OR myoglobin OR "heam iron" OR digestibility OR digestion OR (fatty acid* NEAR/2 composition) OR "fatty acid*" OR "anti-ox?dant*" OR vitamin* OR carotenoid* OR polyphenol* OR "superoxide dismutase" OR lipid OR lipids OR pufa OR "omega 3" OR omega3 OR minerals OR " lipid* ox?dation" OR TBARS OR MDA OR "protein* ox?dation" OR thiols OR carbonyles OR bioavailability OR "nutritional recommendation*") *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 7	2,101,604	TS=("Sensor* qualit*" OR "sensor* analysis" OR "sensor* propert*" OR odo$r OR flavo$r OR off-flavo$r OR colo$r OR tenderness OR juiciness OR texture OR fibrousness OR firmness OR flouriness OR taste OR "organoleptic qualit*" OR marbling OR "eating quality" OR "soft pigment" OR "intramuscular fat" OR adiposity OR "aromatic compound*" OR "shear force" OR appearance OR stringiness OR rancid OR oxidation) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 6	69,622	TS=(Typicitiy OR traceability OR typicality OR authentication OR "typical product*" OR adulteration) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 5	90,818	#4 AND #3 *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 4	2,502,049	TS=(Quality OR "quality trait" OR "quality traits" OR (meat NEAR/2 quality)) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 3	1,582,133	#1 NOT #2 *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 2	515,060	TS=(("guinea pig*") OR (pig NEAR/1 iron) OR ("fluoresc* in situ hybrid*") OR hunt* OR ovocyte* OR oocyte* OR camel OR vegetable* OR "Coconut milk" OR shark OR yak OR cuttlefish OR ham-in-casing OR "cocoa butter" OR "Soya milk" OR potatoe*) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*
# 1	1,681,640	TI=((Animal NEAR/2 product*) OR (meat NEAR/2 product*) OR animal origin OR carcass* OR muscle OR meat OR meatball OR flesh OR livestock OR animal husbandry OR ruminant OR ruminants OR beef OR steers OR boar OR boars OR heifer OR veal OR cow OR cows OR culled cow OR cattle OR bull OR bulls OR bullock OR bovidae OR bos OR calf OR calfs OR mutton OR lamb OR lambs OR sheep OR sheeps OR ewe OR ewes OR ram OR rams OR goat OR goats OR hog OR porcin* OR pork OR pigs OR pig OR piglet Or piglets OR sow OR sus OR swine OR suidae OR Stewed pork OR loin OR sausage* OR ham OR bacon OR salami OR offals OR broiler OR chicken OR chickens OR hen OR hens OR goose OR geese OR duck or ducks OR pullet OR pullets OR poultry OR fowl OR Gallus OR egg OR eggs OR "egg near/2 product*" OR ovoproduct* OR (turkey NEAR/2 meat) OR rabbit OR rabbits OR fish OR fishes OR salmonid* OR trout OR salmo OR oncorhynchus OR dicentrarchus OR seabass OR sea-bass OR sparus aurata OR gilthead OR seabream OR sea-bream OR solea OR sole OR turbot OR meagre OR Scophthalmus OR roe OR roes Or caviar Or Cod OR gadus OR "Argyrosomus regius" OR tuna OR thunnus OR perch OR perca OR carp OR cyprinus OR sandre OR sander OR esox lucus OR tinca tinca oR tench Or sturgeon OR acipender OR milk OR (milk NEAR/2 product) OR (dairy NEAR/2 product) OR (milk NEAR/2 products) OR (dairy NEAR/2 products) OR butter OR Yogurt OR yoghurt OR Yogurts OR yoghurts OR Fresh cream OR Cheese OR Dairy dessert OR Ice cream) *Indexes=SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, BKCI-S, BKCI-SSH, ESCI, CCR-EXPANDED, IC Timespan=1955-2020*

Chapitre 1 : Quelle sont les caractéristiques et les propriétés des produits animaux ?

Auteurs : Thierry Astruc (coord), Véronique Santé-Lhoutellier, Elisabeth Baeza-Campone, Pierre-Etienne Bouillot, Antoine Clinquart, Cyril Feidt, Joel Gautron, Laurent Guillier, Bénédicte Lebret, Florence Lefevre, Bruno Martin, Sophie Prache, Mégane Raulet, Didier Remond, Isabelle Souchon. Experte ponctuelle : Mireille Cardinal (poissons).

Sommaire

1.1 Les 7 volets de la qualité : définition/méthodes de mesure et analyse critique 45

1.1.1 Définition de la qualité 45

1.1.2 Propriétés et caractéristiques des matières premières d'origine animale prises en compte dans l'évaluation de la qualité 46

1.1.2.1 Propriétés organoleptiques (ou sensorielles) 46

1.1.2.2 Propriétés nutritionnelles 50

1.1.2.3 Propriétés technologiques 61

1.1.2.4 Propriétés sanitaires 72

1.1.2.5 Propriétés d'image. 83

1.1.2.6 Propriété d'usage 84

1.1.2.7 Valeur commerciale 85

Conclusions – perspectives : nouvelles méthodes d'évaluation et de prédiction de la qualité 98

1.2 Les étapes successives de l'élevage à la consommation 102

1.2.1. Trajectoires et procédés de transformations dans les filières viande et poisson 102

1.2.1.1 Abattage 105

1.2.1.2 Réfrigération 111

1.2.1.3 Découpe-Piéçage-Conditionnement-Fragmentation 111

1.2.1.4 Congélation-surgélation 111

1.2.1.5 Fragmentation, viandes hachées 111

1.2.1.6 Salage 113

1.2.1.7 Marinage 114

1.2.1.8 Fermentation 114

1.2.1.9 Fumage 114

1.2.1.10 Séchage et affinage des produits carnés 116

1.2.1.11 Cuisson 116

1.2.2. Trajectoires et procédés de transformations dans la filière lait 120

1.2.4. Transformation des œufs en ovoproduits 129

1.2.3. L'organisation des contrôles officiels 132

1.3 Diversité et classification des produits animaux transformés 141
1.3.1 La place des aliments transformés dans la diète 141
1.3.2 Panorama des produits transformés à base de produits animaux vendus en grandes surfaces 141
1.3.3. Les classifications des aliments 145
Conclusion 152
Conclusion du chapitre 1 153

- **Références bibliographiques des parties 1 et 2 ..... 154**
- **Annexe 1 : Un modèle de prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine développé en Australie et en cours d'adaptation à l'international 177**

1.1 Les 7 volets de la qualité : définition/méthodes de mesure et analyse critique

Ce chapitre dresse un cadrage des propriétés et des méthodes d'évaluation des propriétés des aliments d'origine animale.

Regard sur la bibliographie du chapitre 1

Le chapitre de cadrage a été rédigé sur la base de 344 références dont 74 % de revues et chapitres de livres et ouvrages scientifiques, 12% de rapports de filières et 11 % de textes réglementaires. La **thématique viande est de loin la plus couverte** avec la revue **« Meat Science » la plus citée** (30 fois). Beaucoup de revues de bonne notoriété, plus « généralistes » en science des aliments (Journal of Agricultural and Food Chemistry, International Journal of Food Microbiology, Journal of Food Science, Food Research International) et quelques revues d'aquaculture. Moindre proportion de revues scientifiques spécifiques au lait et produits laitiers dans le Chapitre 1, plus documenté par des revues scientifiques généralistes et des documents filières. Dans l'ensemble, **bonne représentativité de revues internationales** avec tout de même une forte fréquence de citation de 2 revues Françaises : « INRA productions Animales » (14 fois) et « Viandes et Produits carnés » (7 fois). Le **taux d'autocitation** en premier auteur est de **5 %**, et le taux de **citations avec premiers auteurs INRAE de 13 %**.

Environ la moitié de **références citées ont moins de 10 ans.** La proportion élevée de **citation de « rapports »** (12 %) s'explique par l'utilisation de littérature grise pour accéder à des données économiques et technologiques récentes et clairement présentées.

1.1.1 Définition de la qualité

La qualité est l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites d'un utilisateur.

La qualité d'un produit alimentaire peut être considérée comme l'interaction de 7 caractéristiques (ou 7 volets) dont le poids varie selon l'acteur de la filière, selon qu'il s'agisse du producteur, du transformateur ou du consommateur (Figure 1-1)

Figure 1-1 : Les volets de la qualité d'un aliment

1.1.2 Propriétés et caractéristiques des matières premières d'origine animale prises en compte dans l'évaluation de la qualité

1.1.2.1 Propriétés organoleptiques (ou sensorielles)

Les propriétés organoleptiques (ou sensorielles) correspondent aux caractéristiques perçues par les organes des sens **(Figure 1-2)**. La vue permet d'apprécier les critères de couleur, de taille, de forme et d'état de l'aliment. L'odorat et les organes du goût permettent d'apprécier les arômes, l'odeur la saveur et la flaveur. Le toucher permet d'apprécier la texture, la forme, la taille de l'aliment. L'ouïe permet de percevoir les sons émis lors de la mastication comme le croustillant.

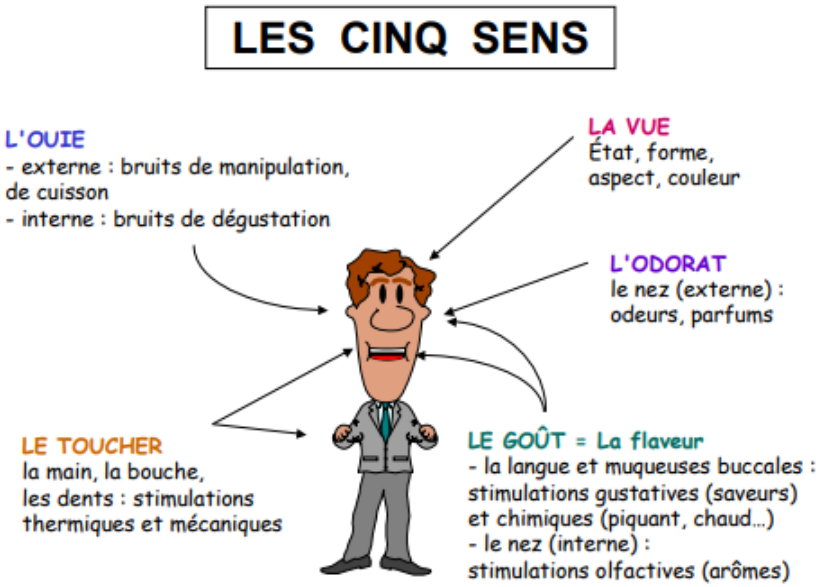


Figure 1-2 : Les cinq sens (d'après Evrat-Georgel 2008)

« *La **couleur** est la première qualité perçue par le consommateur. Elle guide son choix. La **texture** peut se définir comme la manifestation sensible et fonctionnelle des propriétés structurales et mécaniques des aliments, détectées par les sens de la vision, de l'ouïe, du toucher et de la kinesthésie* » (Szczesniak, 1998). Les caractéristiques ***de texture*** recouvrent l'ensemble des propriétés mécaniques, géométriques et de surface d'un produit perceptibles par les mécano-récepteurs, les récepteurs tactiles et éventuellement par les récepteurs visuels et auditifs (ISO 5492).

- les propriétés mécaniques sont celles liées à la réaction du produit à une contrainte. Elles sont divisées en cinq caractéristiques : fermeté, cohésion, viscosité, élasticité et adhérence ;
- les propriétés géométriques sont celles liées aux dimensions, à la forme et à l'arrangement des particules dans un produit (p. ex : granuleux, fibreux) ;
- les propriétés de surface sont celles liées aux sensations telles que celles produites par l'eau et/ou les matières grasses. Dans la cavité buccale, cela correspond aussi à la façon dont ces constituants sont libérés (p. ex : humidité, exsudation, gras).

L'**odeur** peut être définie comme l'émanation volatile perçue par les organes de l'odorat. La **flaveur** est un ensemble complexe formé des **saveurs** perçues par les papilles de la langue et des **arômes** perçus par voie rétro-nasale, une fois le morceau en bouche. Dans le langage courant, la **flaveur est assimilée au goût**. La **jutosité** dépend de la quantité de jus libéré dans la bouche au début de la mastication de produits riches en eau. Elle est accentuée par la stimulation de la salivation, due en particulier à la présence de lipides. Les propriétés organoleptiques peuvent être décrites par analyse sensorielle à l'aide de jurys composés de dégustateurs ou par des mesures instrumentales.

Méthodes de caractérisation des propriétés organoleptiques

Appréciation par un opérateur

Sur le terrain, certaines propriétés organoleptiques des matières premières d'origine animale sont encore appréciées par un opérateur.

Par exemple, « la pression du pouce », qui permet d'apprécier la texture, s'appuie sur le savoir-faire de l'opérateur qui la pratique. Cette méthode est encore appliquée dans l'industrie de la viande pour évaluer le degré de tendreté de la viande avant découpe, le degré de fermeté du gras de couverture sur les carcasses ovines et pour prédire le taux de fonte des foies gras. Cette méthode est subjective et imprécise mais elle permet d'estimer la résistance mécanique de façon simple et rapide sur le terrain (Evrat-Georgel, 2008) et d'orienter la matière première vers les transformations les plus adaptées.

La couleur de la viande et des gras, des salmonidés et du jaune d'œuf reste à ce jour souvent appréciée par un opérateur qualifié sur la base d'un nuancier. Simple et rapide, cette méthode est appliquée dans les abattoirs pour évaluer la qualité des carcasses (voir section qualité commerciale des viandes).

L'analyse sensorielle a été développée pour réduire la part de subjectivité et accéder à des données plus robustes.

Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle est l'examen des propriétés d'un produit par les organes des sens (définition de l'AFNOR - NF ISO 5492) (AFNOR, 2009). Il s'agit donc d'une méthode subjective d'analyse des aliments utilisant l'être humain comme instrument de mesure en mettant à profit ses capacités olfactives, gustatives, visuelles, auditives et tactiles pour caractériser et évaluer des produits (Idele, 2012[1] ; Evrat-Georgel, 2008).

L'analyse sensorielle permet une évaluation de l'ensemble des critères sensoriels et même de leurs interactions. Elle se fait à travers :

- un **jury d'analyse sensorielle**. Selon les objectifs poursuivis, les testeurs ou juges, peuvent être des experts, entraînés à l'évaluation des produits concernés qui doivent répondre aux critères de sensibilité, exactitude et fidélité, ou des sujets novices.
- un **environnement adapté** à la pratique de l'analyse sensorielle. Les séances doivent avoir lieu dans des locaux adaptés, comprenant une zone de préparation (cuisson des produits, présentation pour uniformiser les échantillons) et une zone de dégustation en box individuels pour assurer l'isolement des juges afin de les préserver de bruits et d'odeurs parasites.
- des **méthodes strictes** encadrant la dégustation et la notation des produits. Divers tests sont utilisés pour apprécier les qualités organoleptiques des aliments (AFNOR, 2010) :
    - **les tests discriminatifs** : l'objectif est de repérer la différence entre 2 ou plusieurs produits
    - **les tests descriptifs** : qui permettent de décrire les différences sensorielles entre 2 ou plusieurs produits. L'approche se base sur une liste de 5 à 20 descripteurs clairement définis, capables de qualifier les produits concernés, de manière fiable et reproductible.
    - **les tests hédoniques** : contrairement aux tests précédents qui visent à une évaluation objective du produit, les tests hédoniques s'attachent à la dimension "plaisir" et aux ressentis personnels des testeurs de façon à accéder à la dimension de satisfaction par rapport au produit.

[1] IDELE, 2012. L'analyse des qualités sensorielles des viandes : http://idele.fr/services/laboratoire-idele/publication/idelesolr/recommends/lanalyse-des-qualites-sensorielles-des-viandes.html [consulté le 17/01/2019]

Approche analytique	Approche hédonique
Jugement objectif qui ne dépend que du produit	jugement essentiellement subjectif qui dépend de celui qui consomme le produit
Jury entraîné (au moins 10 personnes) = instrument de mesure - ne représente aucune population de consommateurs - non questionné sur des aspects hédoniques	Jury de consommateurs naïfs (au moins 60 personnes) = approche de l'opinion d'une population cible - aucune autre méthode envisageable - difficulté d'échantillonnage pour assurer une bonne précision
Juges sélectionnés sur leur capacité à comprendre la signification des descripteurs utilisés et leur aptitude à les évaluer et à détecter des différences (seuil de détection supérieur à celui d'un jury non averti)	Juges sélectionnés de façon à être représentatifs de la population
Réalisation en laboratoire dans des conditions contrôlées	Réalisation dans des conditions proches de la réalité
Résultat objectif relativement indépendant des juges et du moment de réalisation. Possibilité de relier à des mesures instrumentales.	Résultat dépendant des juges et à remettre en cause régulièrement dans le temps. Difficile à relier à des mesures instrumentales

Tableau 1-0. Comparaison des méthodes d'analyse sensorielle (Evrat-Georgel, 2008)

À ces méthodes d'analyse sensorielle « classiques » peuvent être associées des méthodes d'analyses sensorielles temporelles qui permettent de prendre en compte la texture de l'aliment dans son ensemble au cours de la mastication, incluant la notion de durée de mastication. Parmi les méthodes temporelles, on distingue « le time-intensité » et « l'électromyographie ».

Le time-intensité est réalisé a l'aide d'un jury d'experts qui doit apprécier la force nécessaire pour mastiquer le morceau, de la première à la dernière bouchée.

L'électromyographie consiste à enregistrer l'activité électrique générée par la contraction des muscles masticatoires (Evrat-Georgel, 2008).

Méthodes de mesure instrumentales

Les différents critères d'appréciation des propriétés organoleptiques sont souvent appréhendés à l'aide d'outils qui permettent des mesures objectives pour des coûts bien moindres que ceux associés aux analyses sensorielles.

- **Couleur**

Bien que la couleur soit encore appréciée visuellement par comparaison avec un nuancier (juge, jury), des outils permettent une mesure objective à l'aide d'instruments optiques. Il existe en effet une importante variabilité de perception de la couleur par les individus et les périphériques d'affichage (écrans d'ordinateurs, smartphones, appareils photos…) modifient plus ou moins la couleur originale des objets. Ce constat a conduit la Commission internationale de l'éclairage (CIE) à développer le modèle colorimétrique L* a*b* (aussi connu sous le nom de *CIELab*). Dans ce système, la couleur est exprimée dans l'espace de couleur caractérisé par les trois dimensions suivantes :

- L*, la luminance, exprimée en pourcentage (0 pour le noir à 100 pour le blanc)
- a* et b* deux axes de couleur allant respectivement du vert au rouge et du bleu au jaune avec des valeurs allant de -120 à +120.

Les indices L*, a*, b* sont acquis à l'aide de chromamètres portables préalablement étalonnés. Ils sont couramment utilisés en recherche et en industrie pour caractériser objectivement la couleur des produits.

- **Odeur**

Une odeur est décrite par comparaison à un ou des objets odorants, comme une épice ou une fleur et un critère temporel décrivant au fil du temps la variation de son intensité et de sa qualité. Elle est caractérisée par son intensité. Elle est décrite par des juges en analyse sensorielle.

L'odeur peut être caractérisée à l'aide d'un olfactomètre (ou nez artificiel). Ces équipements sont équipés de capteurs (capteurs à oxydes métalliques, polymères conducteurs ; capteurs à quartz piézoélectrique, capteurs à effet de champ ; spectrométrie de masse par empreinte ; chromatographie gazeuse ultra-rapide ; cellules électrochimiques ; détecteur à photo-ionisation).

Contrairement au nez humain, les olfactomètres ne peuvent décrire une nouvelle odeur, mais ils peuvent détecter des différences d'odeur par rapport à un échantillon de référence.

Les viandes de porcs mâles entiers libèrent à la cuisson une odeur désagréable associée à la présence d'androstérone, de scatole et d'indole dans le gras (Parois *et al.*, 2018). Les ovins sont également concernés par des odeurs et flaveurs désagréables liées au scatole et à l'indole (Devincenzi *et al.*, 2014 ; 2019). La détection de ces odeurs sur la chaine d'abattage est réalisée par des opérateurs entrainés, mais une méthode biochimiques basée sur une extraction des molécules et leur dosage par spectrométrie de masse vient d'être développée et fait l'objet d'un brevet (Lund *et al.*, 2018).

- **Texture**

La texture peut être décrite par un jury d'experts ou instrumentalement à l'aide d'équipements qui permettent de faire des mesures mécaniques (Scher, 2014).

Les méthodes de mesure mécanique objectives de la texture sont réalisées à l'aide de texturomètres qui reproduisent partiellement les contraintes subies par les aliments au cours de la mastication. Les tests mécaniques permettent d'acquérir des informations sur la résistance ou l'amplitude de la déformation du produit soumis à différents types de forces.

La **force de cisaillement** est mesurée par un capteur de force lors d'une épreuve de cisaillement d'un échantillon. Pour la viande et le poisson, le cisaillement est réalisé perpendiculairement au sens des fibres musculaires. L'équipement le plus couramment utilisé actuellement est la cellule de Warner-Bratzler.

La **force de compression** représente la force nécessaire pour comprimer l'échantillon jusqu'à un seuil préalablement défini. Le test permet de déterminer le module d'élasticité qui correspond au rapport de la contrainte appliquée à la déformation de l'échantillon. La compression peut s'effectuer entre deux plaques, par air comprimé ou par une bille. Le test de compression permet par exemple de mesurer la résistance mécanique de la viande, la fermeté de fromages et d'autres produits laitiers.

Pour la viande, la méthode INRA consiste à comprimer l'échantillon à 20 et 80 % de son épaisseur initiale sur un cycle de compression. La résistance à 20 % reflète la résistance des myofibrilles, alors que la résistance à 80 % reflète la résistance du tissu conjonctif intramusculaire. La méthode TPA (en anglais, *Texture Profile Analysis*) consiste à comprimer l'échantillon, de 60 à 90 % de sa hauteur, sur 2 cycles consécutifs pour simuler la mastication. L'échantillon est généralement comprimé entre 2 plaques striées parallèles. Cette analyse permet de recueillir différents paramètres physiques tels que la dureté, la force de rupture, l'élasticité, la masticabilité et l'adhésivité.

Les tests d'extension et de torsion permettent de mesurer la **force d'étirement,** ce qui permet d'accéder à la viscoélasticité de l'échantillon. Dans la viande, cette mesure est plutôt relative à la composante conjonctive. Cette mesure est réalisée au moyen d'un rhéomètre en mode oscillatoire. D'autres tests rhéologiques sont disponibles tels que les tests de mastication, les tests de pénétration, les tests de hachage et d'extrusion qui sont réalisés à l'aide d'équipements spécifiques (Evrat-Georgel, 2008).

La texture de la viande dépend de la teneur et du degré de réticulation du collagène intramusculaire qui peuvent être appréciés respectivement par dosage biochimique de l'hydroxyproline et par sa stabilité thermique (Bailey et Light, 1989;

Petracci et Baeza, 2011). Hormis les caractéristiques du collagène intramusculaire, le degré de contraction du muscle, reflété par la longueur des sarcomères (mesurés en microscopie ou par diffraction de lumière), affecte la texture de la viande : si les sarcomères sont contractés (< 1,4 µm) la viande restera dure même après maturation.

La spectroscopie électromagnétique a été utilisée pour tenter de prédire la tendreté de la viande. Les résultats essentiels sont développés dans la conclusion relative aux méthodes de caractérisation d'avenir. Brièvement, la spectroscopie de fluorescence frontale a été investiguée pour caractériser le degré de maturation des viandes (Clerjon *et al.*, 2011 ; Damez et Clerjon, 2013 ; Dufour et Frencia, 2001 ; Frencia *et al.*, 2003 ; Lebecque *et al.*, 2003).

La spectroscopie de réflectance dans le visible et le proche infrarouge (VISNIR) a été utilisée pour évaluer la texture des muscles encore positionnés sur la carcasse, ce qui permet d'orienter vers des usages spécifiques les carcasses dont la viande est dure. Cette technologie est utilisée en routine aux Etats-Unis par la société Cargill, mais son utilisation n'est pas envisageable en France à cause de l'hétérogénéité du cheptel (Gicquel *et al.*, 2016).

- **Flaveur et jutosité**

La flaveur et la jutosité sont caractérisées uniquement à l'aide de jurys sensoriels. La jutosité est un critère sensoriel dont la mesure ne présente d'intérêt que pour certains produits animaux, comme la viande et les poissons.

Le pouvoir de rétention d'eau, qui peut être mesuré de façon objective (voir la rubrique propriétés technologiques), est partiellement responsable de la jutosité. Cette dernière est un critère plus vaste qui reflète la sensation de libération de jus en bouche, également dépendante de la composition de l'aliment ingéré.

Analyse critique des méthodes d'appréciation des propriétés organoleptiques

Points forts	Points faibles
Analyse sensorielle	
Permet d'accéder à l'ensemble des critères organoleptiques et à leurs interactions.	Nécessite un jury, complexité de l'organisation des analyses et coût élevé. Basé sur une appréciation subjective
Analyses instrumentales	
Permet d'apprécier chaque critère individuellement. Mesures objectives, peu onéreuses mis à part l'investissement de l'équipement.	Pas toujours représentatif du ressenti humain Nécessite des compétences dans le traitement du signal. Méthodes invasives la plupart du temps Peu de méthodes prédictives

D'une façon générale, les méthodes d'analyse permettent de caractériser les propriétés organoleptiques d'un aliment. Le couplage d'une analyse sensorielle (juges) avec des analyses instrumentales (outils) permet d'accéder à une caractérisation presque exhaustive des propriétés organoleptique et d'identifier des molécules responsables de certains arômes. Selon les objectifs scientifiques et/ou commerciaux de l'étude, les analyses sensorielles sont réalisées par des jurys entrainés ou par des jurys naïfs non entrainés. Il convient de bien prendre en compte la méthode d'analyse lors de la comparaison de résultats issus de différentes études pour comparer des données acquises dans des conditions similaires. L'analyse sensorielle reste très utilisée dans l'industrie agroalimentaire malgré son coût élevé. Il est nécessaire de tenir compte de la culture et des habitudes des consommateurs auxquels ces produits sont destinés. Par exemple, une viande de mouton au goût prononcé sera plus appréciée dans les pays herbagés du nord de l'Europe (ex. Irlande, Royaume-Uni) que dans les pays du sud de l'Europe (Espagne, Italie, Grèce).

1.1.2.2 Propriétés nutritionnelles

Les propriétés nutritionnelles des produits sont évaluées sur la base de leur composition en nutriments (protéines, lipides, glucides, vitamines et minéraux) et de leur potentialité à participer à la couverture des besoins des individus.

Les besoins nutritionnels

Les références nutritionnelles pour une population sont basées sur la connaissance des besoins nutritionnels, au sens large, définis comme la quantité minimale d'un nutriment devant être consommée par un individu pour favoriser sa bonne santé. La terminologie des références nutritionnelles est en cours d'évolution : les Apports nutritionnels conseillés (ANC) sont remplacés par les Références nutritionnelles pour la population (RNP) estimées à partir du Besoin nutritionnel moyen (BNM) de la population auquel on ajoute 2 écarts-types. Quand le BNM ne peut pas être correctement estimé par manque de connaissances, on utilise la notion d'Apport satisfaisant (AS). Les références nutritionnelles diffèrent selon l'âge des individus. C'est notamment le cas pour les besoins énergétiques et la répartition entre lipides, glucides et protéines dans cet apport énergétique (Anses, 2016a). Ainsi, l'apport protéique doit représenter 6-15 % de l'Apport énergétique total (AET) de 0 à 3 ans, 10-20 % chez l'adulte et 15-20 % chez la personne âgée. De même, les lipides doivent représenter 45-55 % de l'AET de 0 à 3 ans, puis 35-40 % chez l'adulte quel que soit l'âge.

Pour les protéines et les lipides apparaît également la notion de caractère indispensable de certains acides aminés et acides gras qui ne peuvent pas être synthétisés en quantité suffisante par l'organisme et doivent donc être obligatoirement apportés par l'alimentation. Par exemple pour les lipides, il s'agit de l'acide linoléique, de l'acide alfa-linolénique et de l'acide docosahexaénoïque (DHA), pour lesquels des ANC ont été établis sur la base du besoin physiologique minimal connu (Anses, 2011a). Ingérés en excès, certains nutriments peuvent avoir des effets délétères pour la santé, c'est notamment le cas des acides gras saturés, pour lesquels une limite supérieure a été fixée. Pour les protéines, l'approche retenue est un peu différente dans la mesure où il n'y a pas d'ANC spécifique pour chacun des Acides aminés indispensables (AAI). Sur la base des besoins en chacun de ces acides aminés, un profil de référence a été établi. Par comparaison avec ce profil de référence, la qualité nutritionnelle d'une protéine alimentaire sera ainsi évaluée sur sa capacité à couvrir l'ensemble des besoins en AAI des individus, sur la base d'un apport en protéines satisfaisant les ANC. Différents scores de qualité ont ainsi été proposés. Le plus simple est l'index chimique. Pour calculer celui-ci, la teneur de chaque AAI dans la protéine concernée est exprimée en pourcentage par rapport à la teneur de cet acide aminé dans la protéine de référence. Le plus faible pourcentage, c'est-à-dire celui de l'acide aminé dit « limitant », constitue l'indice chimique du produit. La présence des AAI dans les aliments n'est cependant pas suffisante, il faut que ceux-ci soient biodisponibles. C'est la raison pour laquelle le score PD-CAAS (en anglais, *Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score*) a été développé en 1990 par la FAO. Pour calculer celui-ci, l'indice chimique est multiplié par la digestibilité de la protéine. Ce critère souffre cependant d'imprécisions. La digestibilité utilisée est le plus souvent celle mesurée sur l'ensemble du tube digestif et non dans l'intestin grêle. Et elle ne tient pas compte du fait que la digestibilité peut différer selon les acides aminés. Aussi, en 2013, la FAO a proposé un nouvel indice, le DIAAS (en anglais, *Digestible Indispensable Amino Acid Score*) non plus calculé sur la base du seul acide aminé limitant mais à partir de la composition et de la digestibilité dans l'intestin grêle de chacun des acides aminés indispensables. Ce score est conceptuellement le plus satisfaisant, cependant en raison de la lourdeur de sa mesure, les données sont encore peu nombreuses.

Les références nutritionnelles pour les adultes sont présentées dans le tableau 1-1. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux pour les autres classes d'âge sont en cours de réactualisation par l'Anses.

Tableau 1-1 : Récapitulatif des références nutritionnelles pour les adultes

Nutriment	Sexe	IR	BNM	RNP	AS	Observations
Protéines (%AET)	H-F	10-20				
Glucides (% AET)	H-F	40-55				
Lipides Totaux (% AET)	H-F	35-40				
Acide linoléique (% AET)	H-F			4		
Acide a-linolénique (% AET)	H-F			1		
Acide docosahéxaénoïque (DHA ; mg/j)	H-F			250		
Acide eicosapentaénoique (EPA ; mg/j)	H-F			250		
Acide laurique + acide myristique + acide palmitique (% AET)	H-F			≤ 8		
AG saturés totaux (% AET)	H-F			≤ 12		
Acide oléique (% AE)	H-F			15-20		
Vitamine A (µg ER/j)	H		570	750		

	F		490	650		
Vitamine B1 (mg/j)	H				1,5	
	F				1,2	
Vitamine B2 (mg/j)	H				1,8	
	F				1,5	
Vitamine B3 (mg/j)	H		14,4	17,4		
	F		11,4	14		
Vitamine B5 (mg/j)	H				5,8	
	F				4,7	
Vitamine B6 (mg/j)	H				1,8	
	F				1,5	
Vitamine B9 (µg EFA/j)	H		250	330		
	F		250	330		
Vitamine B12 (µg/j)	H				4	
	F				4	
Vitamine C (mg/j)	H		90	110		
	F		90	110		
Vitamine D (µg/j)	H		10	15		
	F		10	15		
Vitamine E (mg/j)	H				10,5	
	F				9,9	
Calcium (mg/j)	H		860 750	1 000 950		< 25 ans > 25 ans
	F		860 750	1 000 950		< 25 ans > 25 ans
Cuivre (mg/j)	H		1	1,3		
	F		0,8	1		
Fer (mg/j)	H		6	11		
	F		6	11 ou 16		
Iode (µg/j)	H				150	
	F				150	
Magnésium (mg/j)	H				420	
	F				360	
Manganèse (mg)	H				2,8	
	F				2,5	
Phosphore (mg/j)	H				700	
	F				700	
Potassium (mg/j)	H					Na/K équimolaire
	F					
Sélénium (µg/j)	H				70	
	F				70	
Sodium (mg/j)	H					Non consensuel
	F					Non consensuel
Zinc (mg/j)	H		7,5 9,3 11	9,4 11,7 14		Phytates : 300 mg/j Phytates : 600 mg/j Phytates : 900 mg/j
	F		6,2 7,6 8,9	7,5 9,3 11		Phytates : 300 mg/j Phytates : 600 mg/j Phytates : 900 mg/j

IR : intervalle de référence ; BNM : besoin nutritionnel moyen ; RNP : référence nutritionnelle pour la population (ancien ANC) ; AS : apport de sécurité ; H : homme ; F : femme

AET : Apport énergétique total

ER : équivalent rétinol selon les formules suivantes : 1 µg rétinol = 1 µg ER , 1 µg β-carotène = 1/12 µg ER

EFA : équivalents folates alimentaires, 1 µg d'EFA équivaut à 1 µg de folates alimentaires et à 0,6µg d'acide folique

Les phytates limitent la biodisponibilité du zinc. Les données indiquées dans le tableau correspondent aux apports journaliers en phytates.

Les aliments ont des compositions en nutriments qui peuvent être très différentes selon leur source (viande, poisson, lait, œufs, légumes, fruits). C'est la variété du régime alimentaire qui permet d'accéder à l'ensemble des nutriments pour garantir un bon équilibre nutritionnel. Les aliments d'origine animale ne font pas exception et leurs compositions et caractéristiques peuvent être très différentes. La composition des principales matières premières d'origine animale (viande, poisson, lait, œuf) est déclinée dans la suite du document.

Composition nutritionnelle des produits animaux

A titre d'exemple la composition de quelques produits animaux (pour 100 g de produits), extraite de la base nationale CIQUAL, est présentée dans les tableaux 1-2, 1-3, 1-4 et 1-5.

Viande et poisson

La viande et le poisson sont issus de la transformation du muscle squelettique après l'abattage. Ils sont composés d'environ 70-75 % d'eau, 15-20 % de protéines, 3-10 % de lipides et de micronutriments. Ce sont des aliments de haute valeur nutritionnelle. Le profil en acides aminés est relativement constant entre muscles et espèces alors que les autres constituants musculaires — lipides, micronutriments et vitamines – varient avec l'espèce et les conditions d'élevage. Les protéines musculaires contiennent tous les acides aminés indispensables (Culioli *et al.*, 2003 ; Medale, 2004 ; Tome, 2008), à l'exception du collagène intramusculaire qui ne contient pas de tryptophane (Bailey et Light, 1989; Culioli *et al.*, 2003 ; Lebret et Picard, 2015 ; Rémond *et al.*, 2010).

Les lipides de la viande sont essentiellement composés de triglycérides (0,5 à plus de 5 % selon les muscles et les espèces), de phospholipides (0,5 à 1 %), et de cholestérol (0,05 à 0,1 %) (Culioli *et al.*, 2003). Ces lipides sont constitués en partie d'acides gras répartis en trois classes : les acides gras saturés, les monoinsaturés et les polyinsaturés (AGPI). Parmi les AGPI, on distingue les AGPI n-6 (ou omega 6) et les AGPI n-3 (ou omega 3). La teneur en lipides totaux et leur composition en acides gras sont très dépendantes de l'espèce et du muscle considéré. Pour une même espèce et un muscle donné, la teneur et la composition lipidique varient avec le type d'animal (sexe, âge, race), son alimentation et son mode d'élevage (Bauchart et Thomas, 2010; Culioli *et al.*, 2003 ; Geay *et al.*, 2002 ; Lebret *et al.*, 1999 ; Lebret et Picard, 2015 ; Medale, 2004). Le poisson se caractérise par sa teneur élevée en AGPI n-3 à longue chaîne (Medale, 2004) (Tableau 1-2).

La viande constitue une très bonne source de micronutriments comme le fer contenu dans les muscles rouges (bovins, ovins, thon …), le zinc et le sélénium, dont la biodisponibilité est très élevée par rapport à d'autres ressources alimentaires (Biesalski et Nohr, 2009; Rock, 2002) (Tableau 1-3). Ainsi le fer héminique, présent dans le muscle au niveau de la myoglobine (transporteur d'oxygène qui pigmente le muscle en rouge), est beaucoup mieux assimilé par l'homme que le fer minéral apporté par les végétaux. Comme pour le fer, la biodisponibilité du zinc des produits animaux est supérieure à celle des végétaux, lorsque ceux-ci contiennent des phytates qui chélatent le zinc et empêchent son absorption (Rock, 2002). La viande et le poisson sont également très riches en sélénium. Par ailleurs, la chair de poisson est riche en iode et en fluor (Medale, 2004).

Outre les oligo-éléments, la viande apporte des vitamines liposolubles A et E et des vitamines hydrosolubles du groupe B. La vitamine A, essentielle à la croissance et au développement tissulaire, est présente en quantité élevée dans les abats, un apport excédentaire étant néfaste à la santé. Les précurseurs de la vitamine A sont aussi présents en quantité élevée dans la chair des salmonidés (Medale, 2004). À l'inverse, la vitamine E, aux propriétés anti-oxydantes, est contenue en quantité réduite dans la viande par rapport aux apports nutritionnels recommandés (Rock, 2002). La vitamine D, liposoluble, est présente dans les poissons gras (Medale, 2004). Les vitamines du groupe B (B2, B3, B6, B9 et B12) sont également présentes en quantité non négligeable dans la viande rouge et le poisson. Elles interviennent dans de nombreux processus biologiques et voies métaboliques où elles sont associées à des coenzymes. En particulier, la vitamine B12, exclusivement d'origine animale, intervient dans la synthèse de l'ADN, la formation des cellules nerveuses et des globules rouges. La vitamine B9 (acide folique) est nécessaire au développement embryonnaire. Or, les apports alimentaires sont généralement inférieurs aux besoins dans la population européenne féminine. Cette vitamine est présente dans le foie avec une biodisponibilité élevée (Biesalski et Nohr, 2009). Outre les niveaux individuels, l'intérêt nutritionnel de la viande réside dans l'apport

simultané en vitamines du groupe B. Toutefois, si les teneurs en oligo-éléments et vitamines des viandes et poissons sont favorables à leur qualité nutritionnelle, une teneur élevée en sodium d'origine exogène, parfois observée dans certains produits de charcuterie, est plutôt néfaste (Rock, 2002).

Tableau 1-2 : Composition nutritionnelle du filet de 2 poissons (Anses - Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual 2017) [2]

Constituant	Filet de saumon	Filet de truite
Energie, Règlement UE n°1169/2011 (kcal/100 g) (Union européenne, 2011)	194	133
Eau (g/100 g)	66,5	73,9
Protéines brutes, N x 6,25 (g/100 g)	20,5	19,3
Glucides (g/100 g)	traces	traces
Lipides (g/100 g)	12,4	6,22
Sucres (g/100 g)	0	0
Cendres (g/100 g)	1,22	1,28
AG saturés (g/100 g)	2,15	1,25
AG monoinsaturés (g/100 g)	4,9	2,22
AG polyinsaturés (g/100 g)	4,17	2,45
AG 12:0, laurique (g/100 g)	0,008	0,002
AG 14:0, myristique (g/100 g)	0,4	0,19
AG 16:0, palmitique (g/100 g)	1,25	0,81
AG 18:0, stéarique (g/100 g)	0,31	0,19
AG 18:1 9c (n-9), oléique (g/100 g)	2,56	1,43
AG 18:2 9c,12c (n-6), linoléique (g/100 g)	1,15	0,73
AG 18:3 c9,c12,c15 (n-3), alpha-linolénique (g/100 g)	0,32	0,28
AG 20:5 5c,8c,11c,14c,17c (n-3) EPA (g/100 g)	0,62	0,29
AG 22:6 4c,7c,10c,13c,16c,19c (n-3) DHA (g/100 g)	0,88	0,66
Cholestérol (mg/100 g)	53,6	54,8
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	0,16	0,1
Calcium (mg/100 g)	5,84	17,1
Cuivre (mg/100 g)	< 0,1	< 0,1
Fer (mg/100 g)	0,48	0,5
Iode (µg/100 g)	8,21	9,23
Magnésium (mg/100 g)	27,4	27,5
Manganèse (mg/100 g)	< 0,1	< 0,1
Phosphore (mg/100 g)	181	188
Potassium (mg/100 g)	358	410
Sélénium (µg/100 g)	16,5	9,75
Sodium (mg/100 g)	45,4	41,8
Zinc (mg/100 g)	0,36	0,44
Rétinol (µg/100 g)	4,27	13,5
Beta-Carotène (µg/100 g)	< 0,008	< 0,008
Vitamine D (µg/100 g)	3,69	5,92

[2] https://ciqual.anses.fr/#/cms/la-table-ciqual-2017/ [consulté le 23/02/2020]

Vitamine E (mg/100 g)	1,89	1,94
Vitamine K1 (µg/100 g)	0,3	-
Vitamine K2 (µg/100 g)	0,5	-
Vitamine C (mg/100 g)	1,8	-
Vitamine B1 ou Thiamine (mg/100 g)	0,21	0,14
Vitamine B2 ou Riboflavine (mg/100 g)	0,076	0,1
Vitamine B3 ou PP ou Niacine (mg/100 g)	8,25	5,54
Vitamine B5 ou Acide pantothénique (mg/100 g)	0,95	1,51
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,58	0,34
Vitamine B9 ou Folates totaux (µg/100 g)	20,8	9,23
Vitamine B12 (µg/100 g)	3,95	2,54

Tableau 1-3 : composition nutritionnelle de différentes viandes (Anses - Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual 2017)

	Poulet		Porc		Bœuf	
Constituant	Filet sans peau	Cuisse	Filet	Côte	Tende de tranche	Paleron
Energie (kcal/100 g)	108	114	117	164	116	144
Eau (g/100 g)	74,3	76	74,4	69,5	74,8	72,3
Protéines brutes, N x 6.25 (g/100 g)	23,5	19,3	21,2	19,8	23,1	21,2
Glucides (g/100 g)	0,45	0	0	0,38	0,57	0
Lipides (g/100 g)	1,34	4,05	3,6	9,3	2,34	6,54
Sucres (g/100 g)	0,2	0	0	0	0	0
Cendres (g/100 g)	1,92	0,98	1,1	0,98	1,05	1,19
AG saturés (g/100 g)	0,39	1,03	1,43	3,75	0,8	2,59
AG monoinsaturés (g/100 g)	0,61	1,3	1,56	4,3	0,82	2,61
AG polyinsaturés (g/100 g)	0,34	0,98	0,4	1,01	0,19	0,35
AG 10:0, caprique (g/100 g)	0,014	0	0,001	0,0094	0,004	0
AG 12:0, laurique (g/100 g)	0,0033	0,015	0,002	0,0073	0	0,0044
AG 14:0, myristique (g/100 g)	0,0086	0,023	0,052	0,15	0,044	0,15
AG 16:0, palmitique (g/100 g)	0,27	0,71	0,83	2,12	0,47	1,42
AG 18:0, stéarique (g/100 g)	0,094	0,26	0,46	1,22	0,23	0,81
AG 18:1 (n-9), oléique (g/100 g)	0,58	1,02	1,36	3,39	0,64	2,05
AG 18:2 (n-6), linoléique (g/100 g)	0,31	0,62	0,36	0,81	0,068	0,13
AG 18:3 (n-3), ALA (g/100 g)	0,013	0,025	0,02	0,043	0,058	0,031
AG 20:5 (n-3) EPA (g/100 g)	0,0029	0,008	0	0	0,004	0
AG 22:6 (n-3) DHA (g/100 g)	0,012	0,028	0	0,002	0,002	0
Cholestérol (mg/100 g)	65	81	63,3	56,4	61,5	67
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	0,13	0,23	0,18	0,12	0,078	0,12
Calcium (mg/100 g)	8	10,3	6,38	7,05	7,93	7,45
Cuivre (mg/100 g)	0,038	0,061	0,095	0,087	0,061	0,087
Fer (mg/100 g)	0,63	0,99	0,93	0,66	2,75	2,5
Magnésium (mg/100 g)	26,5	22,3	27,1	22,2	17	25
Manganèse (mg/100 g)	0,014	0,019	0,014	0,011	0,006	0,012

Phosphore (mg/100 g)	218	173	237	463	196	223
Potassium (mg/100 g)	293	229	416	350	329	343
Sélénium (µg/100 g)			8,48	< 40	10,1	10,2
Sodium (mg/100 g)	54,6	92	72,3	49,2	31,1	49
Zinc (mg/100 g)	0,67	1,8	2,53	2,31	3,46	5,51
Rétinol (µg/100 g)	7,5	16,7	0	3	3	3
Beta-carotène (µg/100 g)	0	0	0	0	0	0
Vitamine D (µg/100 g)	0	0	0,36	0,6	0,4	0,1
Vitamine E (mg/100 g)	0,39	0,2	0,16	0,13	0,23	0,2
Vitamine K1 (µg/100 g)	1,3	2,53	0	0	1,5	1,5
Vitamine K2 (µg/100 g)	8,9	34,3	3,7	3,22	0	0
Vitamine B1 (mg/100 g)	0,08	0,079	0,98	0	0,06	0,08
Vitamine B2 (mg/100 g)	0,13	0,18	0,28	0,18	0,18	0,21
Vitamine B3 (mg/100 g)	9,91	5,9	5,8	4,99	5,21	3,67
Vitamine B5 (mg/100 g)	1,17	1,2	0,81	0,81	0,63	0,86
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,68	0,35	0,58	0,41	0,51	0,27
Vitamine B9 (µg/100 g)	6,5	7,67	2,35	0	5,5	3
Vitamine B12 (µg/100 g)	0,3	0,42	0,58	0,35	1,16	2,77

Lait

Le lait est composé de 87-88 % d'eau, et 12-13 % de matière sèche. Cette matière sèche est composée majoritairement de lipides, glucides et protéines en proportions très variable selon l'espèce (Tableau 1-4). Elle renferme également de nombreux minéraux et composés mineurs comprenant notamment des pigments, des vitamines, des enzymes, des cellules somatiques et des microorganismes.

Les protéines du lait sont hautement digestibles (> 95 %) et leur composition en acides aminés indispensables est en adéquation avec les besoins de l'homme.

Les matières grasses laitières, constituées essentiellement de triglycérides apportent des acides gras saturés laurique, myristique et surtout palmitique (environ 38 % de l'ingestion des adultes) (Tableau 1-4). Ces acides gras font l'objet d'une recommandation visant à en limiter les quantités ingérées au quotidien, car leur consommation en excès accroît le risque de maladies cardiovasculaires (Anses, 2011a). Les matières grasses laitières sont également riches en acides gras monoinsaturés de configuration cis (acide oléique notamment), dont l'effet sur la santé humaine est jugé positif ou neutre. Les teneurs en acides gras polyinsaturés sont nettement plus faibles. Les acides linoléique (oméga-6) et linolénique (oméga 3) apportés par les produits laitiers représentent 5 et 10 % respectivement des apports totaux de la diète des adultes. Le rapport des acides gras oméga-6 / oméga-3 des produits laitiers est en accord avec les recommandations alimentaires actuelles. Le lait contient aussi des acides gras insaturés de forme trans, dont il est conseillé de limiter la consommation car ils sont supposés accroître le risque de maladies cardiovasculaires (Anses, 2011a). Une distinction est cependant clairement établie entre les acides gras trans issus de l'hydrogénation des huiles végétales par des procédés industriels, et ceux naturellement contenus dans les produits de ruminants. La consommation de ces derniers n'est pas associée à l'augmentation du risque d'apparition de maladies (Ferlay *et al.*, 2017). Parmi les acides gras trans du lait, les acides linoléiques conjugués (ou CLA pour conjugated linoleic acid) et, en particulier, l'acide ruménique, ont des effets anticarcinogènes démontrés sur des modèles animaux mais ces effets positifs n'ont pas été validés chez l'homme (Ferlay *et al.*, 2017).

Le lait et les produits laitiers sont d'autre part des sources très significatives de minéraux. Ils procurent en particulier du calcium, du phosphore et du magnésium, qui sont les trois principaux minéraux des os. Ils contribuent respectivement à hauteur de 40, 24 et 9 % des apports chez l'adulte (Anses, 2017b). Le lait et les produits laitiers apportent également 17 % du zinc (métabolisme des protéines, des lipides et de certaines hormones), 22 % de l'iode (élément essentiel de la

composition des hormones thyroïdiennes) et 8 % du sélénium (antioxydant). Le lait et les produits laitiers contiennent l'ensemble des vitamines, mais ils sont surtout des sources importantes de vitamines A (sous forme de rétinol, 32 % des apports par les produits laitiers et de ses précurseurs, les caroténoïdes), D (calciférols, 29 %), B2 (riboflavine, 27 %), B5 (acide pantothénique, 16 %), B8 (biotine), B9 (folate, 13 %) et B12 (cobalamine, 17 %).

Tableau 1-4 : composition nutritionnelle du lait entier (Anses - Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual 2017)

Constituant	Vache	Chèvre	Brebis
Energie (kcal/100 g)	65,1	56,1	103
Eau (g/100 g)	87,5	87	82,2
Cendres (g/100 g)	0,7	0,8	0,96
Protéines (g/100 g)	3,32	3,39	5,68
Glucides (g/100 g)	4,85	4,35	4,5
Sucres (g/100 g)	4,2	4,35	4,5
Lipides (g/100 g)	3,63	2,83	6,97
AG saturés (g/100 g)	2,4	1,8	4,8
AG monoinsaturés (g/100 g)	0,92	0,76	1,6
AG polyinsaturés (g/100 g)	0,11	0,12	0,3
AG 4:0, butyrique (g/100 g)	0,075	0,096	0,2
AG 6:0, caproïque (g/100 g)	0,058	0,071	0,15
AG 8:0, caprylique (g/100 g)	0,038	0,072	0,14
AG 10:0, caprique (g/100 g)	0,093	0,2	0,4
AG 12:0, laurique (g/100 g)	0,12	0,1	0,25
AG 14:0, myristique (g/100 g)	0,41	0,25	0,65
AG 16:0, palmitique (g/100 g)	1,19	0,68	1,53
AG 18:0, stéarique (g/100 g)	0,32	0,33	0,9
AG 18:1 9c (n-9), oléique (g/100 g)	0,73	0,76	1,26
AG 18:2 9c,12c (n-6), linoléique (g/100 g)	0,062	0,087	0,18
AG 18:3 c9,c12,c15 (n-3), alpha-linolénique (g/100 g)	0,014	0,029	0,073
AG 20:4 5c,8c,11c,14c (n-6), arachidonique (g/100 g)	0,0034	0	0
AG 20:5 5c,8c,11c,14c,17c (n-3) EPA (g/100 g)	< 0,0034	0	0
AG 22:6 4c,7c,10c,13c,16c,19c (n-3) DHA (g/100 g)	< 0,0034	0	0
Cholestérol (mg/100 g)	12,5	11	27
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	0,11	0,13	0,11
Calcium (mg/100 g)	120	134	199
Chlorure (mg/100 g)	98	157	101
Cuivre (mg/100 g)	< 0,01	0,05	0,011
Fer (mg/100 g)	0,01	0,05	0,46
Iode (µg/100 g)	< 20	15,3	23,3
Magnésium (mg/100 g)	9,8	14	17,1
Manganèse (mg/100 g)	< 0,01	0,0053	0,018
Phosphore (mg/100 g)	97	111	158
Potassium (mg/100 g)	160	204	103
Sélénium (µg/100 g)	< 50	2	3
Sodium (mg/100 g)	44,2	50	44
Zinc (mg/100 g)	0,37	0,3	0,54

Rétinol (µg/100 g)	31,4	35,2	20,3
Beta-Carotène (µg/100 g)	21,9	0	0
Vitamine D (µg/100 g)	< 0,25	0,06	0,2
Vitamine E (mg/100 g)	0,089	0,04	0,15
Vitamine C (mg/100 g)	< 0,5	1,3	4,2
Vitamine B1 ou Thiamine (mg/100 g)	0,041	0,048	0,057
Vitamine B2 ou Riboflavine (mg/100 g)	0,17	0,14	0,34
Vitamine B3 ou PP ou Niacine (mg/100 g)	< 0,1	0,28	0,42
Vitamine B5 ou Acide pantothénique (mg/100 g)	0,43	0,31	0,41
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,02	0,046	0,06
Vitamine B9 ou Folates totaux (µg/100 g)	< 2,5	1	9,19
Vitamine B12 (µg/100 g)	0,24	0,07	0,71

Oeuf

Conçu pour nourrir l'oiseau à l'état embryonnaire, l'œuf compte moins de 100 kilocalories pour 60 grammes dont 75 % d'eau, 12,5 % de protéines et 10,5 % de lipides (Nau *et al.*, 2010b).

Les protéines sont équitablement réparties dans le blanc et le jaune, elles sont riches en acides aminés essentiels dans des proportions équilibrées par rapport aux besoins de l'homme. Peu digestible lorsque l'œuf est cru, les protéines sont très digestibles lorsque l'œuf est cuit (Evenepoel *et al.*, 1998).

Les lipides de l'œuf sont riches en Acides Gras Insaturés (AGI), et en phospholipides, notamment en phosphatidylcholine, indispensable au développement du cerveau (Zeisel, 1992) et par ailleurs précurseur de l'acétylcholine, impliquée dans l'apprentissage et la mémoire. Associées à la bonne digestibilité des triglycérides (98 %), et des phospholipides (90 %) de l'œuf, ces différentes caractéristiques font de l'œuf une source de lipides à forte valeur nutritionnelle. L'œuf est riche en cholestérol (1,6 %, soit environ 210 mg par œuf). Le cholestérol est un précurseur des sels biliaires, des hormones sexuelles et corticales chez l'homme et il est un composant majeur des membranes cellulaires, jouant un rôle essentiel pour la croissance des nourrissons (Juneja, 1997). Contrairement à la croyance populaire, la quantité de cholestérol ingéré influence peu la cholestérolémie (Kritchevsky, 2000).

L'œuf est hyposodé et pauvre en calcium, mais un apport de 100 g d'œuf entier permet de couvrir respectivement 20, 25, 33 et 42 % des apports nutritionnels en potassium, phosphore, iode et sélénium recommandés chez l'homme adulte (tableau 1-5). L'œuf entier contient plusieurs vitamines pour lesquelles 100 g de produit apportent en effet une part significative (20 % et plus) des besoins journaliers de l'homme (tableau 1-5) (Nau *et al.*, 2010a).

L'œuf contient de la lutéine et de la zéaxanthine qui sont des pigments xanthophylles qui pourraient avoir des propriétés anti-carcinogène, anti-athérosclérose et immunostimulante qui réduiraient le risque de dégénérescence maculaire liée à l'âge (Mares-Perlman *et al.*, 2002). Ils ne peuvent pas être synthétisés par l'homme ou les animaux qui dépendent totalement dépendants de leur apport alimentaire.

Tableau 1-5 : composition nutritionnelle de l'œuf de poule cru (Anses - Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual 2017)

Constituant	Teneur moyenne	Min	Max
Energie, Règlement UE n°1169/2011 (kcal/100 g) (Union Européenne, 2011)	140		
Eau (g/100 g)	76,3	70	80
Cendres (g/100 g)	0,96	0,7	1,33
Protéines (g/100 g)	12,7	11,3	14,3
Glucides (g/100 g)	0,27		
Sucres (g/100 g)	0,27		0,4

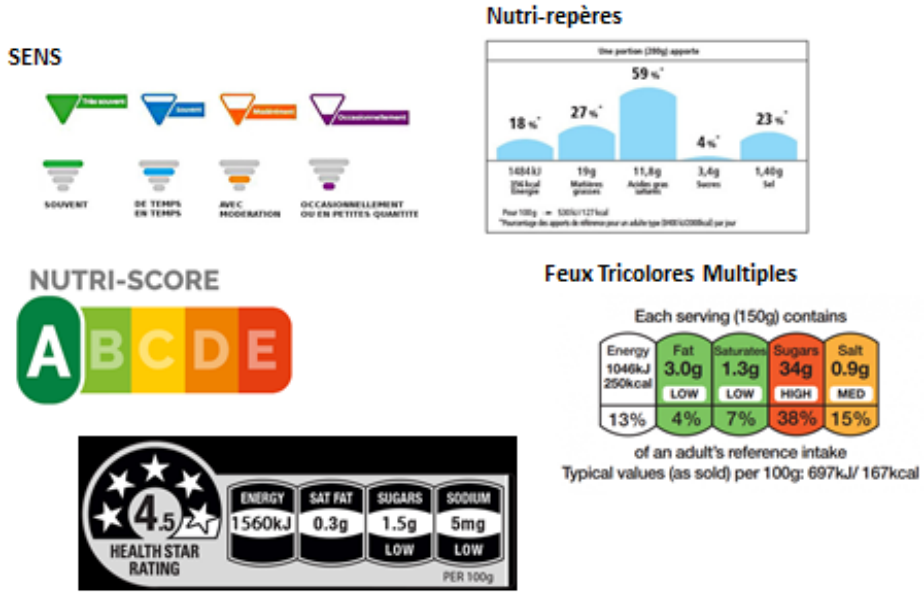
Lipides (g/100 g)	9,83	0,05	10,3
AG saturés (g/100 g)	2,64	0,05	3,13
AG monoinsaturés (g/100 g)	3,66	0,05	6,73
AG polyinsaturés (g/100 g)	1,65	0,05	3,39
AG 4:0, butyrique (g/100 g)	< 0,05	0	
AG 6:0, caproïque (g/100 g)	< 0,05	0	
AG 8:0, caprylique (g/100 g)	< 0,05	0	
AG 10:0, caprique (g/100 g)	< 0,05	0	
AG 12:0, laurique (g/100 g)	< 0,05	0	
AG 14:0, myristique (g/100 g)	0,024	0	0,038
AG 16:0, palmitique (g/100 g)	1,96	0,05	2,43
AG 18:0, stéarique (g/100 g)	0,65	0,05	0,89
AG 18:1 9c (n-9), oléique (g/100 g)	3,51	3,03	3,65
AG 18:2 9c,12c (n-6), linoléique (g/100 g)	1,38	1,18	2,7
AG 18:3 c9,c12,c15 (n-3), alpha-linolénique (g/100 g)	0,061	0,02	0,58
AG 20:4 5c,8c,11c,14c (n-6), arachidonique (g/100 g)	0,12		0,13
AG 20:5 5c,8c,11c,14c,17c (n-3) EPA (g/100 g)	0		0,003
AG 22:6 4c,7c,10c,13c,16c,19c (n-3) DHA (g/100 g)	0,09	0,045	0,18
Cholestérol (mg/100 g)	398	344	423
Sel chlorure de sodium (g/100 g)	0,31	0,29	0,41
Calcium (mg/100 g)	76,8	40	92,8
Cuivre (mg/100 g)	0,055	0,048	0,075
Fer (mg/100 g)	1,88	1,63	2,34
Iode (µg/100 g)	21		
Magnésium (mg/100 g)	11	10,4	14
Manganèse (mg/100 g)	0,027	0,019	0,055
Phosphore (mg/100 g)	204	193	210
Potassium (mg/100 g)	134	120	150
Sélénium (µg/100 g)	< 2,58	2,2	32,6
Sodium (mg/100 g)	124	115	163
Zinc (mg/100 g)	1,01	0,85	1,5
Rétinol (µg/100 g)	182	139	204
Beta-Carotène (µg/100 g)	0		
Vitamine D (µg/100 g)	1,88	1,75	2
Vitamine E (mg/100 g)	1,43	0,77	1,8
Vitamine K1 (µg/100 g)	0,3		
Vitamine C (mg/100 g)	0		
Vitamine B1 ou Thiamine (mg/100 g)	0,055	0,03	0,07
Vitamine B2 ou Riboflavine (mg/100 g)	0,45	0,34	0,62
Vitamine B3 ou PP ou Niacine (mg/100 g)	0,063	0,05	0,08
Vitamine B5 ou Acide pantothénique (mg/100 g)	1,57	1,4	1,7
Vitamine B6 (mg/100 g)	0,15	0,088	0,19
Vitamine B9 ou Folates totaux (µg/100 g)	34	15,5	47
Vitamine B12 (µg/100 g)	1,45	0,65	2

Méthodes de mesure des propriétés nutritionnelles

Les méthodes de mesure des propriétés nutritionnelles sont très normalisées. Pour la viande de volailles, il est possible de se référer à Petracci et Baéza (2011). Il est possible aussi de consulter le site de l'AFNOR pour le lait et les produits laitiers[3] et la viande[4].

Les systèmes d'information nutritionnelle

Dans un but d'information pour les consommateurs différents systèmes ont été développés pour caractériser le profil nutritionnel d'un aliment, expression globale de sa qualité nutritionnelle. Certains sont purement descriptifs (information factuelle sur la composition en nutriments), par exemple le « Nutri-repère »[5], ceux qui sont interprétatifs (attribution d'une lettre ou couleur à l'aliment en fonction de sa composition), par exemple le « Nutri-score »[6] ou le « SENS » (Darmon *et al.*, 2015). D'autres tels que le « Health Star Rating »[7] (Australie, Nouvelle-Zélande) et les « Feu Tricolore Multiple » (MTL, Royaume-Uni) (Hawley *et al.*, 2013) combinent description et interprétation.



Le « Nutri-Score » conçu par Santé publique France, est l'étiquetage nutritionnel qui a été retenu par le gouvernement français dans le cadre de la loi de modernisation du système de santé. Il résulte de la différence entre une composante dite négative (énergie, acides gras saturés, sucres simples, sel) et une composante dite positive (protéines, fibres, et pourcentage de fruits et légumes, légumineuse et fruits à coque). L'obligation d'étiquetage nutritionnel s'applique à tous les produits préemballés. En sont exemptés les produits non-transformés (ou ayant, pour toute transformation, été soumis à une maturation) et qui comprennent un seul ingrédient ou une seule catégorie d'ingrédients.

Les limites des systèmes d'information nutritionnelle actuels ont fait l'objet d'une saisine de l'Anses (2017a). Outre les réserves émises sur leur efficacité à orienter les décisions d'achat ou le comportement alimentaire des consommateurs, la saisine souligne 2 faiblesses : la prise en compte d'un nombre insuffisant de paramètres nutritionnels au regard des connaissances actuelles (notamment en ce qui concerne les acides gras, mais aussi les vitamines et minéraux), et l'antagonisme de ces systèmes avec la complexité fondamentale des relations entre l'alimentation et la santé qui s'apprécie en considérant simultanément le régime alimentaire pris dans sa globalité.

---

[3] https://www.boutique.afnor.org/recueil/lait-et-produits-laitiers/article/819974/rec000412#info (consulté le 23/02/2020)
[4] https://www.boutique.afnor.org/recherche/resultats/mot/viande/categorie/normes (consulté le 23/02/2020)
[5] https://www.youmeal.io/en/nutri-repere-visual-food-information/ (consulté le 23/02/2020)
[6] https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/nutri-score (consulté le 23/02/2020)
[7] https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/nutri-score (consulté le 23/02/2020)

Analyse critique des méthodes d'appréciation des propriétés nutritionnelles

Points forts	Points faibles
Méthodes exhaustives de caractérisation de la composition en nutriments et de l'apport calorique.	Pour les produits non transformés, la caractérisation nutritionnelle ne prend pas en compte l'impact de leur mode de préparation avant consommation ; La caractérisation nutritionnelle des produits ne prend pas en compte la biodisponibilité des nutriments ; Complexité d'atteindre un message nutritionnel global qui soit simple à appréhender par le consommateur ; Non prise en compte de la complexité des repas/régimes alimentaires au sein desquels les aliments peuvent se compléter ou avoir des effets antagonistes.

Les propriétés nutritionnelles sont basées sur la composition des aliments caractérisées par des analyses chimiques et biochimiques fiables. Néanmoins, l'impact de la transformation susceptible de modifier la composition et certaines caractéristiques structurales sont actuellement insuffisamment pris en compte. Les données scientifiques récentes montrent en effet que la structure macromoléculaire des protéines évolue avec les transformations technologiques, ce qui affecte leur bioaccessibilité et leur biodisponibilité. Par ailleurs, les interactions entre les divers aliments d'un même repas ou d'un même régime et leurs effets sur la digestibilité et la santé du consommateur demeurent encore mal connues.

1.1.2.3 Propriétés technologiques

Les propriétés technologiques relèvent de l'aptitude à la transformation et à la conservation de la matière première. Elles préoccupent essentiellement les industriels de l'agroalimentaire. Les critères varient en fonction du type de produit animal (ex. rétention d'eau pour les viandes, rendement fromager pour le lait…). Par conséquent, les critères d'appréciation des propriétés technologiques seront déclinés par classe de produit.

Viande

Critères de caractérisation des propriétés technologiques

Les propriétés technologiques des viandes sont souvent associées à des notions de rendement. Dans la majeure partie des cas, elles dépendent de la capacité des viandes à retenir l'eau au cours des transformations technologiques. Le pH du muscle en fin de chaine d'abattage (ou pH1 ou pHi pour pH initial) et le pH ultime (ou pH24 pour pH mesuré à 24 h *post mortem* ou encore pHu pour pH ultime) sont des prédicteurs du pouvoir de rétention d'eau des viandes et donc du rendement de cuisson. D'une façon générale, une chute de pH rapide (qui est reflété par la valeur du pH1 et/ou un pH24 bas) se traduit par des pertes d'eau à la cuisson plus intenses. Un pH24 élevé (supérieur à 6 à 6,5, dépendant des muscles) améliore la rétention d'eau mais dégrade les propriétés organoleptiques (couleur sombre) et les aptitudes à la conservation (développement bactérien accéléré comparativement à une viande à pH normal (5,4-6,0, dépendant des muscles). Le pH influence par ailleurs le développement des microorganismes et donc la durée de vie microbiologique de la viande (date limite de consommation ou DLC).

Dans le foie gras, la qualité technologique se mesure à sa capacité à retenir, non pas l'eau, mais les lipides (Theron *et al.*, 2011). Il est pour l'instant difficile de prédire le taux de fonte des foies. Quelques indicateurs comme le poids du foie et la texture appréciée au toucher suggèrent le niveau de fonte mais avec une marge d'erreur très élevée.

Cependant des défauts de la matière première peuvent entraîner des dégradations du produit fini et de sa valeur commerciale. C'est le cas des viandes déstructurées, de propriétés technologiques médiocres, dont la transformation conduit à des variations de couleur et des déchirements lors du tranchage du produit fini en particulier dans le contexte de la diminution de la teneur en sel et de la diminution de l'utilisation des polyphosphates (IFIP, institut du porc). Les muscles atteints ont perdu leur aspect fibreux et se caractérisent par une structure désorganisée d'apparence molle. Les mécanismes à l'origine de ce défaut sont encore mal connus mais seraient associés à une dénaturation et ou une dégradation des protéines musculaires. Un lien a été observé entre le pHu et l'incidence de ce défaut (Minvielle *et al.*, 2005).

La qualité technologique peut également dépendre de la composition des tissus biologiques. Du gras de porc riche en lipides saturés sera plus adapté à la production de saucissons et saucisses sèches car il est plus dur et moins oxydable que du gras riche en acides gras polyinsaturés. Des gras riches en acides gras polyinsaturés seront plus sensibles à l'oxydation réduisant ainsi les aptitudes à la conservation.

Méthodes de mesure et d'appréciation des propriétés technologiques des viandes

- **pH**

Le pH est l'un des critères d'appréciation des qualités technologiques les plus importants dans la filière viande. Le pH est en effet corrélé avec le pouvoir de rétention d'eau et permet de prédire le rendement de cuisson avec une précision satisfaisante. Le pH de la viande est le plus souvent mesuré à l'aide d'un pH-mètre/thermomètre muni d'une électrode de pénétration qui permet une mesure instantanée du pH corrigé de la température du muscle. Cette méthode est très adaptée à la mesure du pH ultime, qui est stable (voir paragraphe abattage) et généralement mesuré 24 h *post mortem*. En revanche, pour la mesure du pH en fin de chaine d'abattage (environ 45 min *post mortem*), le pH n'étant pas stabilisé, sa mesure avec une électrode de pénétration est plus aléatoire. Dans ce cas, le broyage d'un prélèvement (1 g) dans une solution de iodoacétate de sodium bloque l'évolution de pH qui peut être mesuré de façon plus fiable dans la suspension.

- **Couleur**

La couleur est également un critère d'évaluation de la qualité technologique des viandes. Sa mesure à l'aide d'un chromamètre et du système de mesure L*, a*, b* est identique à celle décrite dans le paragraphe relatif aux qualités organoleptiques.

- **Rendement**

Le pouvoir de rétention d'eau est mesuré par pesée selon la formule (poids après traitement * 100)/poids avant traitement. Le traitement peut être la réfrigération, un cycle congélation/décongélation, une cuisson…

Diverses méthodes ont été décrites pour apprécier objectivement le pouvoir de rétention d'eau des viandes (Font-i-Furnols *et al.*, 2015a; Petracci et Baeza, 2011). Certaines méthodes consistent à laisser la viande s'égoutter, sans contrainte mécanique. La mesure peut être accélérée en pressant la viande ou en la centrifugeant en conditions contrôlées. Le rapport de poids après et avant pressage ou centrifugation renseigne sur la capacité de rétention d'eau de la viande fraîche.

- **Evaluation du niveau d'oxydation**

L'oxydation des lipides est le plus souvent évaluée par la mesure de l'indice TBARS (en anglais*, ThioBarbituric Acid Reactive Substances*) ou le dosage du MDA (malondialdéhyde) qui est l'aldéhyde majoritairement produit. Ces produits secondaires de l'oxydation des acides gras sont des indicateurs du rancissement oxydatif des lipides associés à une altération de la flaveur de la viande et produits carnés. L'oxydation des protéines est évaluée par le dosage des groupements carbonyles et thiols.

- Evaluation de l'activité de l'eau (Aw)

L'activité de l'eau est l'un des principaux paramètres influençant la conservation des aliments. Les micro-organismes ont besoin d'eau « libre » pour se développer. L'activité de l'eau ne représente pas la teneur en eau (ou humidité) mais la disponibilité de cette eau. Plus l'activité de l'eau est élevée, plus la quantité d'eau libre est grande (1 étant le maximum) et plus les micro-organismes se développeront. Les champignons ont habituellement besoin d'une Aw d'au moins 0,7 et les bactéries d'au moins 0,91. L'eau a aussi un impact sur la texture de l'aliment. Afin de diminuer cette activité, on peut sécher le produit ou ajouter un soluté qui va fixer l'eau et la rendre non-utilisable par les micro-organismes : c'est par exemple, la salaison des produits de charcuterie.

Sur un plan théorique, l'activité de l'eau peut se définir comme un rapport de pressions de vapeur. L'activité de l'eau est égale à la pression partielle de vapeur d'eau d'un produit humide divisée par la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la même température : $Aw = p(T) / p0(T)$

Cette mesure est réalisée à l'aide d'Aw-mètres (AFNOR, (2005).

Poisson

Chez le poisson, un critère supplémentaire de qualité technologique est la fraicheur

La fraîcheur est l'indicateur de la qualité des produits aquatiques le plus important. En effet, à la différence de la viande, l'une des spécificités du poisson est sa dégradation rapide. La fraîcheur pourrait se définir comme l'ensemble des caractéristiques du produit les plus proches de celles à son état vivant. L'évolution *post mortem* du produit se traduit par une contraction musculaire (*rigor mortis*) qui consommeles réserves énergétiques du muscle (glycogène, composés phosphorylés) et par un catabolisme des protéines (dégradation des protéines de structure de la chair), des lipides (dégradation et oxydation des lipides) et des composés nucléotidiques (Fauconneau, 2004). Cette dégradation de la qualité peut, selon les espèces de poisson ou les conditions d'entreposage, prendre place très rapidement après la mort de l'animal. Cette altération est le résultat de modifications chimiques ou enzymatiques, de phénomènes d'autolyse et de développements bactériens.

La fraîcheur peut être exprimée par plusieurs paramètres sensoriels, microbiologiques, (bio)chimiques et physiques, et peut donc être définie par des caractères objectifs. Selon Hüss (1999), les méthodes d'évaluation de la fraîcheur se divisent en deux catégories, sensorielles et instrumentales. La plupart des méthodes instrumentales (microbiologiques, chimiques et physiques) sont validées par des résultats sensoriels avant d'être appliquées par les laboratoires de contrôle et l'industrie.

Quelle que soit la destination finale du produit, l'évaluation de l'état de fraîcheur de la matière première initiale est une étape incontournable. Les procédures mises en œuvre pour évaluer la fraîcheur du poisson cru ont connu quelques évolutions depuis les premières grilles de cotation utilisées. Elles sont basées sur la cotation de caractéristiques externes ou internes du poisson, selon un barème plus ou moins détaillé.

Les critères

Critères externes à l'état cru

- Peau : la couleur de la peau, l'aspect brillant et irisé, l'apparence et l'importance du mucus, l'adhérence des écailles, font partie des critères externes qui permettent d'apprécier la fraîcheur du poisson.
- Œil : une pupille très noire et brillante, une cornée transparente, une forme très bombée de l'œil sont des indicateurs déterminants de la fraîcheur.
- Branchies : un poisson sortant de l'eau présente des branchies dont la couleur est d'un rouge profond avec une odeur marine ou neutre ; l'entreposage va conduire à une décoloration progressive (couleur grisâtre, beige-marron).
- Chair et paroi abdominale : l'appréciation de la fermeté de la chair et de la forme de l'abdomen sont des éléments complémentaires pris en compte dans les tableaux de cotation.

Critères internes à l'état cru

- Péritoine : le péritoine initialement intègre se déchire progressivement au cours d'un entreposage en glace et devient de moins en moins adhérent.
- Colonne vertébrale : la chair le long de la colonne vertébrale, qui est de la même couleur que le reste de la chair lorsque le poisson est très frais, prend progressivement une teinte rouge-brun et la colonne vertébrale adhère de moins en moins à la chair.

Critères d'examen à l'état cuit

L'odeur et le goût permettent de préciser les caractéristiques et de noter l'éventuelle apparition de notes liées à une dégradation du produit.

Les méthodes

En France, l'évaluation du niveau de fraîcheur d'un poisson s'est pratiquée pendant longtemps à partir d'un tableau de cotation établi par l'Institut scientifique et technique des pêches maritimes (ISTPM) qui permettait d'attribuer, en fonction du degré d'altération observé, une note de 0 à 6, à chacun des critères décrits précédemment. La moyenne des notes attribuées aux critères permettait alors de classer le poisson dans une catégorie de fraîcheur.

Au niveau européen, le règlement CEE n°2455/70 du 30 novembre 1970 a fait référence pour l'évaluation du degré de fraîcheur jusqu'en 1996, date à laquelle il a été modifié (Union européenne, 1970). Les deux tableaux ISTPM et CEE ne diffèrent que par le nombre de points utilisés pour la cotation et par l'interprétation de l'échelle ; dans le premier cas il s'agit d'une évaluation du degré d'altération, dans l'autre du degré de fraîcheur. Ces tableaux étaient utilisés quel que soit le poisson contrôlé, sans adaptation particulière des critères aux spécificités de l'espèce, et par conséquent ne se révélaient pas toujours adéquats pour décrire les caractéristiques spécifiques de certains poissons. Des travaux menés par la *Torry Research Station* (Howgate *et al.*, 1992) ont permis de proposer une adaptation des tableaux de cotation et d'aboutir au règlement européen CE n°2406/96 du Conseil du 26 novembre 1996 (Commission européenne, 1996) qui classe les poissons en quatre catégories selon le niveau de fraîcheur : Extra, A, B et non admis. Cette cotation est établie par famille de poissons. Cette grille est utilisée par les inspecteurs vétérinaires sur les zones de débarquement du poisson.

A titre d'exemple, cette grille est utilisée comme référence pour évaluer la fraîcheur du saumon Label Rouge (LR) ; un lot de saumon Label Rouge doit obligatoirement être dans la catégorie « extra »

Plus récemment, sous l'impulsion des Pays-Bas, du Danemark et de l'Islande, par le biais de leurs instituts de recherche spécialisés dans le domaine de la mer, une nouvelle méthode d'évaluation de la fraîcheur a été proposée. Celle-ci, développée à l'origine par l'Unité de recherche Alimentaire de Tasmanie (Bremner, 1985), utilise un système de cotation de défauts du poisson cru, de 0 à 3 points (Jónsdóttir *et al.*, 1991). La méthode, baptisée Quality Index Method (QIM), se différencie des grilles de cotation précédentes non pas par le mode d'évaluation mais par l'adaptation des critères qui est proposée en fonction de l'espèce. En effet, une grille est proposée par type de poisson. Les caractères pris en compte ne sont pas tous les mêmes selon le poisson examiné et l'échelle des points de dépréciation peut être différente. De plus, la corrélation linéaire mise en évidence entre cet indice de qualité et le nombre de jours d'entreposage en glace, permet d'avoir une évaluation de la durée de vie restante du poisson matière première.

Tableau 1-6 Paramètres de la qualité des poissons (https://www.qim-eurofish.com/default.asp?ZNT=S0T1O-1P68 ; consulté le 12/03/2020)

Paramètre de Qualité		Descripteurs	Points QIM
Peau	Couleur	Couleur brillante sur toute la surface	0
		Moins brillante	1
		Jaunâtre, principalement dans la région abdominale	2
	Mucus	Clair, non coagulé	0
		Laiteux, coagulé	1
		Jaune et coagulé	2
	Odeur	Odeur d'algues fraîches, neutre	0
		Concombre, métallique, de foin	1
		Aigre, de linge mouillé	2
		Altérée, putride	3
	Texture	Ferme, élastique (en *rigor)*	0
		La marque du doigt disparaît rapidement	1
		La marque du doigt reste pendant plus de 3 secondes	2
Œil	Pupille	Noire et brillante, transparente	0
		Gris sombre	1
		Terne, grise	2
	Forme	Convexe	0
		Plate	1
		Affaissée	2
Branchies	Couleur	Rouge / brun sombre	0
		Rouge pâle, rose / brun	1
		Gris brun, brune, grise, verte	2
	Mucus	Transparent	0
		Laiteux, coagulé	1
		Brun, coagulé	2
	Odeur	Odeur fraîche d'algues	0
		Métallique, de concombre	1
		Aigre, de moisi	2
		Altérée, putride	3
Abdomen	Sang	Sang bien rouge ou absent	0

		Sang plus brun ou jaunâtre	1
	Odeur	Neutre	0
		De concombre, de melon	1
		Aigre, aigrelet, de fermentation	2
		Altérée, putride, de chou	3
TOTAL			0-24

Grille QIM de cotation du saumon d'élevage (*Salmon salar*)

L'utilisation du QIM n'est cependant pas très répandue en France comme outil de contrôle de la fraîcheur malgré son intérêt pour prédire une durée de stockage restante.

Critères microbiologiques

La flore microbienne des poissons

Il est généralement admis que la flore des poissons d'eaux tempérées est composée de bactéries à Gram négatif, psychrotolérantes, dont la croissance est possible aux températures de réfrigération (entre 0 et 4° C), l'optimum se situant aux alentours de 25°C.

Parmi ces bactéries, la majorité appartient à la sous-classe γ des proteobacteria : *Pseudomonas, Shewanella, Acinetobacter, Aeromonas, Vibrio, Moraxella, Psychrobacter, Photobacteriu*m, etc., et dans une moindre mesure au groupe CFB (Cytophaga-Flavobacter-Bacteroides) (Huber *et al.*, 2004 ; Wilson *et al.*, 2008). Cependant, des bactéries à Gram positif comme Micrococcus, Bacillus, Lactobacillus, Clostridium ou Corynéformes, peuvent également être présentes, dans des proportions variables (Gennari *et al.*, 1999 ; Gram et Huss, 1996 ; Hobbs, 1983 ; Mudarris et Austin, 1988; Shewan, 1971 ; 1977 ; Wilson *et al.*, 2008). Certains genres comme Vibrio, Photobacterium et Shewanella nécessitent une concentration en sel pour se multiplier et sont donc typiquement retrouvés dans le milieu marin alors que Aeromonas est plus typique de l'eau douce, même s'il est fréquemment isolé de produits de la mer (Hanninen *et al.*, 1997). Chez les poissons tropicaux, la flore a globalement la même composition (Al-Harbi et Uddin, 2005 ; Emborg *et al.*, 2005), mais souvent avec une proportion plus grande de bactéries à Gram positif (Micrococcus, Bacillus, Corynéformes) et d'entérobacteries (Devaraju et Setty, 1985 ; Huss, 1999; Liston, 1992).

La microflore indigène du tractus gastro-intestinal du poisson a été beaucoup plus étudiée que celle du mucus et de la peau en raison de son importance supposée ou avérée dans la digestion, le métabolisme et la croissance ou l'immunité et le contrôle des maladies en aquaculture (Askarian *et al.*, 2012; Ringø *et al.*, 1995 ; Spanggaard *et al.*, 2000). Même si différents microorganismes, comme les levures, peuvent être présents, les bactéries constituent la composante majeure du microbiote gastro-intestinal des poissons (Denev *et al.*, 2009). Bien que l'environnement soit partiellement anaérobie, la plupart des travaux ont conclu à la prédominance des germes aérobies également présents dans l'eau environnante, et aptes à survivre et à se multiplier dans le milieu particulier du tractus intestinal (Cahill, 1990). Cette prédominance des bactéries aérobies est peut-être due aux techniques de récupération des germes qui n'étaient pas adaptées aux anaérobies stricts (Burr *et al.*, 2005). Cependant, (Huber *et al.*, 2004) ont montré par des méthodes moléculaires que la flore aérobie de l'intestin de truite arc-en-ciel représentait en général 50 à 90 % de la flore totale. Les données bibliographiques indiquent que les bactéries à Gram négatif dominent la flore intestinale. En général, Aeromonas, Pseudomonas et des membres du groupe Flavobacterium/Cytophaga sont les micro-organismes les plus rencontrés dans l'intestin des poissons d'eau douce alors que Vibrio, Acinetobacter, et les Enterobacteriaceae sont plus souvent présents dans les poissons marins (Ringo et Birkbeck, 1999 ; Ringø *et al.*, 1995). Ce sont des bactéries fermentatives qui se développent rapidement dans le tractus gastro-intestinal bénéficiant d'un faible pH, du manque d'oxygène et de l'abondance de nutriments. Bien que non majoritaires, des bactéries lactiques (Lactobacillus, Carnobacterium, Streptococcus, Leuconostoc, Lactococcus, Vagococcus) ont souvent été isolées du tractus gastro-intestinal de poisson (Balcazar *et al.*, 2007) (pour une revue, voir Ringø et Gatesoupe (1998)). Les carnobactéries ont même été citées comme étant le genre dominant du tractus gastro-intestinal de juvéniles de saumon Atlantique et de morue (Ringø *et al.*, 1997; Seppola *et al.*, 2006).

Contamination microbienne de la chair et évolution au cours de la conservation

A la mort du poisson, le système immunitaire s'effondre et les bactéries peuvent envahir la chair en se déplaçant entre les fibres musculaires. Cependant, les bactéries à la surface de la peau sont toujours en bien plus grand nombre que celles retrouvées dans les tissus et il est probable que l'altération du poisson entier soit surtout le fait d'enzymes bactériennes qui ont migré dans les tissus. En revanche, les étapes de transformation (éviscération, étêtage, filetage, parage…) contribuent à répandre les bactéries naturellement présentes dans le poisson vivant sur les tissus musculaires, accélérant ainsi la dégradation. Chaque manipulation du poisson depuis l'abattage jusqu'à l'assiette du consommateur peut avoir une influence sur la composition de la microflore du produit final (Lyhs *et al.*, 2001).

Après une phase de latence dont la durée, généralement courte chez les poissons d'eau tempérée, peut varier selon la composition et l'état du poisson, la température de conservation et l'espèce bactérienne, les germes entrent en phase exponentielle de croissance. La multiplication est évidemment plus ou moins rapide selon les facteurs cités précédemment. A titre d'exemple, dans des conditions classiques de conservation à l'air, la flore totale peut passer de de 10^2 - 10^3 à 10^7 - 10^8 Unité formant Colonie/g (UFC/g) en 14 jours sur de la morue conservée à 0° C, et il n'est pas rare d'atteindre des niveaux de 10^9 UFC/g (Vogel *et al.*, 2005). Sur du saumon frais à 4°C, on peut atteindre ces mêmes niveaux en 7 à 10 jours (Sivertsvik *et al.*, 2003). En général, chez les poissons tropicaux conservés sous glace, la phase de latence est plus longue (1 à 2 semaines) que celle observée chez les poissons d'eau tempérée et la croissance au cours de la phase exponentielle est plus lente (Gram *et al.*, 1990; Huss, 1995), probablement parce que les germes sont moins adaptés aux températures de conservation réfrigérées (Devaraju et Setty, 1985).

L'altération sensorielle n'est pas toujours corrélée avec le nombre total de germes. Dans la plupart des produits de la mer, que ce soit dans le poisson frais (Koutsoumanis et Nychas, 1999), le poisson emballé sous-vide (Donald et Gibson, 1992) ou sous atmosphère modifiée (Dalgaard *et al.*, 1993) ou encore dans les produits légèrement transformés type saumon fumé (Leroi *et al.*, 2001), le rejet organoleptique arrive bien après que la flore totale ait atteint son maximum. Si une flore variée est présente sur le poisson, seuls certains germes, les bactéries spécifiques d'altération, participent réellement à la production d'odeurs et flaveurs désagréables (Gram et Dalgaard, 2002 ; Gram et Huss, 1996 ; Lyhs *et al.*, 2001).

<u>Méthodes microbiologiques d'évaluation de la fraîcheur</u>

De 1979 à 2004, la France était dotée de différents critères microbiologiques, essentiellement relatifs à la sécurité sanitaire, auxquels devaient satisfaire les denrées alimentaires, dont les produits marins. Les critères microbiologiques pour évaluer la qualité quant à eux étaient très restreints puisqu'ils se limitaient à l'évaluation de la flore mésophile totale sur milieu PCA (Plate Count Agar) à 30°C. Depuis 2005, ce critère a été supprimé et les industriels s'organisent pour tenter de mettre en place des guides de bonnes pratiques de transformation (Commission européenne, 2005). A défaut de règles précises, le dénombrement de la flore mésophile totale est encore utilisé même s'il présente pourtant bien des faiblesses :

- d'une part, il sous-estime souvent la population microbienne majoritairement psychrotrophe qui est beaucoup mieux dénombrée sur milieu de Long et Hammer inoculé en surface et incubé à 15°C (Van Spreekens, 1974),
- d'autre part, il ne permet pas de quantifier les germes spécifiquement responsables de l'altération et son utilité reste donc assez restreinte pour évaluer la qualité du produit lui-même.

Dans les laboratoires de recherche, des méthodes adaptées au dénombrement spécifique des germes altérants ont été développées et sont parfois utilisées par les industriels. Il s'agit du milieu Iron Agar pour quantifier la flore productrice d'H^2S, critère très pertinent pour évaluer la qualité des poissons frais réfrigérés. Les colonies produisant de l'H^2S à partir des tryptones, du thiosulfate de sodium ou de la cystéine forment un complexe avec le citrate de fer présent dans le milieu et apparaissent colorées en noir. Certains outils ont également été proposés pour quantifier Ph. phosphoreum, germes d'altération des poissons frais emballés sous atmosphère modifiée. Il s'agit d'un milieu de culture gélosé sélectif avec incubation à 15°C en présence de CO_2, ou d'une technique par impédancemétrie (Dalgaard *et al.*, 1996). Ces outils fonctionnent relativement bien pour des produits où la diversité microbienne est faible, comme dans les poissons non transformés et conservés sous vide ou sous atmosphère modifiée. En revanche, ils ne sont pas assez sélectifs pour des produits type saumon fumé.

- Critères chimiques d'évaluation de la fraicheur

Le poisson est une matrice particulièrement favorable au développement microbien. En effet, bien que pauvre en glucides (ou hydrates de carbone) (0,2 à 1,5 % selon les espèces), la chair de poisson est riche en composés azotés non protéiques de petits poids moléculaires rapidement métabolisables par les bactéries. Parmi ces composés on retrouve des acides aminés libres, de la créatine, des nucléotides, de l'urée et de l'oxyde de triméthylamine (OTMA). Par ailleurs, le pH *post-mortem* de la chair est élevé (> 6) et la faible acidification au cours de la conservation, liée à la faible quantité d'hydrates de carbone, permet la croissance rapide de certains germes psychrotrophes, très sensibles au pH, qui jouent un rôle dans l'altération du poisson, comme *Shewanella putrefaciens*. Enfin, les poissons gras sont riches en acides gras polyinsaturés rapidement oxydables, tant par des phénomènes chimiques de réaction en chaîne que par la lipolyse qui résulte d'activités enzymatiques autolytiques ou bactériennes.

En aérobiose, les hydrates de carbone (ribose et lactate) peuvent être métabolisés en CO_2 et H_2O. En anaérobiose et en présence d'un accepteur d'électron, comme l'OTMA par exemple, certains germes sont capables de pratiquer la respiration anaérobie qui aboutit à la production d'acide acétique. Cependant, la concentration en hydrates de carbone dans la chair étant faible, il est assez rare que l'altération d'un poisson frais soit liée uniquement à la production d'acides organiques. En revanche, l'OTMA, dont la concentration varie en fonction de l'espèce, joue un rôle extrêmement important dans l'altération car il permet la respiration anaérobie de certains micro-organismes comme *Shewanella*, *Photobacterium* et *Aeromonas*. Il est alors réduit en triméthylamine (TMA) [$(CH_3)_3N$], molécule très malodorante qui donne cette odeur aminée typique du poisson avarié. Bien qu'il soit parfois retrouvé dans certains poissons d'eau douce (Anthoni *et al.*, 1990), l'OTMA [$(CH_3)_3NO$] est un composé typique des poissons marins (Seibel et Walsh, 2002).

- Dosage de l'ABVT / TMA

Des critères chimiques réglementaires existent pour mesurer la fraîcheur des poissons marins mais ils se limitent à l' ou azote basique volatil total (ABVT). Ce critère ABVT, , est aussi appelé amines basiques volatiles totales. L'ABVT est un terme général qui comprend la triméthylamine (TMA) (produite par les bactéries d'altération), la diméthylamine (DMA) (produite par les enzymes autolytiques pendant le stockage du poisson congelé), l'ammoniac (produit par la désamination des acides aminés et des catabolites de nucléotides) et d'autres composés azotés volatils associés à l'altération (Huss, 1999). Les teneurs en ABVT reflètent surtout les dernières étapes de l'altération. Selon les espèces, l'ABVT ne doit pas dépasser 25, 30 ou 35 mg N/100 g de chair (Union européenne, 2008). Ce critère est applicable pour les produits commercialisés en frais mais pas pour ceux emballés sous vide ou sous atmosphère modifiée, ni pour les produits transformés. Par ailleurs, il n'est pas pertinent pour certaines espèces de poisson comme les Thonidés, par exemple, par contre il est particulièrement utile pour mesurer la qualité des céphalopodes tels que les encornets (Leblanc et Gill, 1984). La méthode de référence pour quantifier l'ABVT est celle d'entraînement à la vapeur (méthode de Billon). Certains laboratoires utilisent la méthode de Conway (Conway et Byrne, 1933), une relation linéaire existe entre les valeurs obtenues par ces deux méthodes (Malle *et al.*, 1996).

La TMA n'est pas réglementée, mais est également souhaitable pour confirmer les conclusions fournies par l'ABVT. Généralement, la qualité est satisfaisante au-dessous de 6 mg N/100 g, moyenne entre 6 et 14 mg-N/100 g et dégradée au-delà. Cet indicateur n'est utile que pour les produits riches en OTMA, ce qui n'est pas le cas des Sélaciens par exemple. Les valeurs brutes de TMA sont malgré tout souvent difficiles à interpréter et il est conseillé de les rapporter aux quantités d'ABVT, en utilisant le facteur P qui est égal au rapport TMA/ABVT en % (Malle et Poumeyrol, 1989). Ce facteur permet de préciser la composition de l'ABVT et il subit de façon plus atténuée l'incidence des divers paramètres qui affectent les mesures d'AVBT et de TMA. Si P est de l'ordre de 40-45 %, le produit est en voie d'altération, et on peut considérer qu'il est putréfié si P est supérieur à 55 %. Les principaux inconvénients des dosages de teneur en TMA sont qu'ils ne reflètent pas les stades précoces d'altération (et donc de diminution de la fraîcheur) et ne sont fiables que pour certaines espèces de poisson.

La DMA est produite par autolyse pendant l'entreposage du poisson à l'état congelé. En effet, certaines espèces de poissons, dont l'importante famille sur le plan commercial des gadidés (cabillaud, lieu, églefin, merlan…), contiennent une enzyme, l'OTMA diméthylase (OTMA-ase) qui transforme l'OTMA en quantités équimolaires de DMA et de FA. Le dosage de la DMA est un indicateur fiable de l'agrégation des protéines musculaires durant un entreposage congelé, mais n'est pas un critère permettant d'évaluer la fraîcheur du poisson conservé à des températures positives.

Comme Huss (1999) le rapporte, l'ammoniac est formé non seulement par la dégradation bactérienne mais aussi lors de la dégradation autolytique de l'adénosine monophosphate (AMP). Dans le cadre de l'évaluation de la fraîcheur, l'ammoniac pourrait être utilisé comme un indicateur objectif de qualité pour les poissons qui se dégradent de façon autolytique. En ce qui concerne les autres espèces de poissons telles que la morue commune (Le Blanc, 1987) il s'agit plutôt d'un indicateur de la dégradation bactérienne, et donc de l'altération.

- Dosage des amines biogènes

La plupart des bactéries d'altération possédant une activité décarboxylase décarboxylent les acides aminés en réaction au pH acide afin de l'augmenter. La décarboxylation des acides aminés conduit à la formation d'amines biogènes, qui, bien que sans avoir d'odeurs particulières dans le produit (Jorgensen *et al.*, 2000a), sont souvent corrélées à l'altération (Veciana-Nogues *et al.*, 1997). La tyrosine est le précurseur de la tyramine et de la cadavérine. L'arginine peut être dégradée en putrescine par la voie de l'agmatine, en présence de l'arginine décarboxylase comme c'est le cas pour *Photobacterium* (Jorgensen *et al.*, 2000b). Mais la putrescine peut également être produite par la décarboxylation de l'ornithine, comme en sont capables certaines entérobactéries telles que Hafnia alvei et *Serratia liquefaciens* (Grimont et Grimont, 1992 ; Sakzaki et Tamura, 1992). L'histamine est une amine biogène issue de la dégradation de l'histidine. Cette amine peut provoquer des réactions de type allergique plus ou moins fortes (rougeurs de la peau, gonflement, maux de tête). Sa concentration est réglementée dans les poissons à forte teneur en histidine (Scombroidés et Clupéidés, (Commission européenne, 2005)). Dans le poisson, les principaux producteurs sont les entérobactéries mésophiles comme *Morganella morganii, Hafnia alvei* ou *Klebsiella pneumoniae* (Kim *et al.*, 2002 ; Kim *et al.*, 2005) mais plus récemment des germes psychrotolérants tels que *Photobacterium phosphoreum* et certaines souches de *M. morganii* ont été clairement incriminés dans des cas d'intoxication à l'histamine (Dalgaard *et al.*, 2006; Emborg *et al.*, 2005).

Bien que de nombreux auteurs aient montré qu'il existait souvent une bonne corrélation entre la teneur en putrescine, histamine, cadavérine et tyramine et l'altération sensorielle des produits de la mer (Jorgensen *et al.*, 2000a; Mietz et Karmas, 1977 ; Veciana-Nogues *et al.*, 1997), le dosage des amines biogènes n'est pas utilisé en routine pour mesurer la qualité des produits.

Cependant, étant donné que l'histamine a été associée à des incidents d'empoisonnement (par les Scombridés en particulier), l'histamine est un critère réglementaire de sécurité associé aux poissons riches en histidine tels que les Scombridés (thon, bonite, maquereaux…), les Dlupéidés (sardine, hareng) et Engraulidés (anchois).

- Autres indicateurs chimiques

D'autres indicateurs tels que l'ammoniac, l'éthanol, l'indole, le potentiel d'oxydoréduction ou encore l'indice thiobarbiturique pour mesurer l'oxydation des lipides, ont retenu l'attention des chercheurs mais sont rarement utilisés en routine.

Les poissons tels que le saumon, la truite étant riches en acides gras polyinsaturés sont très sensibles à l'oxydation. Un indice, l'indice thiobarbiturique est parfois déterminé pour évaluer les produits d'oxydation secondaire. En effet, certains des produits aldéhydiques d'oxydation secondaire réagissent avec l'acide thiobarbiturique pour former un composé coloré pouvant être dosé par spectrophotométrie. Les résultats sont exprimés en fonction du standard utilisé, le malondialdéhyde. L'indice thiobarbiturique est donc l'équivalent de micromoles de malondialdéhyde présentes dans 1 g de graisses ou en mmoles ou mg de malondialdéhyde par rapport à la quantité de tissu analysé.

Lait

Critères d'appréciation des propriétés technologiques

La qualité technologique du lait se définit par son aptitude à être transformé en un produit donné. Elle s'apprécie de façon très différente selon l'utilisation du lait. Par exemple, l'appréciation de la qualité technologique d'un lait destiné à la fabrication de fromage au lait cru est très différente de celle d'un lait destiné à être vendu sous forme liquide après avoir subi un traitement UHT (ultra-haute température). Pour une transformation en beurre ou en fromage, cela sous-entend la facilité de transformation et le rendement, c'est-à-dire la quantité de produit obtenue avec une quantité donnée de crème ou de lait.

En fabrication fromagère, un lait ayant une bonne qualité technologique doit permettre l'obtention d'un fromage de bonne qualité et en quantité importante. La qualité fromagère d'un lait renvoie à de nombreux aspects de sa composition chimique et microbiologique qui modulent son comportement lors des différentes étapes de la transformation fromagère (coagulation, acidification, égouttage, affinage…). Cette notion recouvre entre autres la teneur et la composition des protéines et des matières grasses, la teneur en minéraux et l'intégrité de l'organisation supramoléculaire de ces macro-constituants. Elle intègre également de nombreux micro-constituants comme les cellules somatiques, les micro-organismes, les pigments, les antioxydants, les molécules (ou leurs précurseurs) impliquées dans le goût des fromages, la teneur et l'activité des enzymes lipolytiques et protéolytiques (qu'elles soient naturellement présentes dans le lait ou d'origine microbienne), les contaminants éventuels comme les inhibiteurs… Les caractéristiques du lait influencent fortement le rendement et les caractéristiques du gel obtenu après la coagulation, qui est la première étape commune à la réalisation de tous les fromages. Ce sont les protéines, en particulier les caséines, qui permettent la coagulation. Une teneur élevée en caséines est ainsi déterminante pour obtenir un rendement élevé et un gel ferme, apte à subir les traitements physiques de l'égouttage. La proportion des différentes caséines ($\alpha s1$, $\alpha s2$, β et κ), leurs caractéristiques (variants génétiques) et leur association aux minéraux (calcium notamment) jouent un rôle important sur la qualité du gel. L'intégrité des caséines au moment de la coagulation du lait est recherchée ; elle peut être altérée par la présence d'enzymes protéolytiques, naturellement présentes dans le lait (plasmine) ou issues de développements microbiens indésirables (germes psychrotrophes notamment). Les matières grasses ne sont pas impliquées directement dans le mécanisme de coagulation, mais elles sont retenues dans le fromage et elles jouent un rôle important sur le rendement fromager et le développement de la flaveur des fromages. Les globules gras restent d'autant mieux intégrés dans la matrice protéique du gel que leur taille est plus faible ; par ailleurs, ces petits globules gras retiennent plus d'eau, en raison d'une quantité plus élevée de membranes (Couvreur et Hurtaud, 2007 ; Hurtaud *et al.*, 2001). L'intégrité des globules gras est également recherchée : la lipolyse provoquée par la rupture de la membrane des globules gras permet aux lipases du lait de dégrader les triglycérides et de libérer des acides gras, dont l'acide butyrique, ce qui augmente le risque de défauts de goûts et d'odeur de rance.

La qualité technologique du lait comprend aussi la composition et le niveau de flores microbiennes susceptibles de se développer au cours de la fabrication et/ou de l'affinage. La grande majorité des flores bactériennes ou fongiques du lait sont utiles à la transformation fromagère, quelques-unes en revanche sont indésirables. Par exemple, le développement de certains germes coliformes peut entraîner des gonflements dans les fromages. Dans la pratique, la qualité fromagère du lait se mesure essentiellement par sa teneur en protéines (fortement corrélée à la teneur en caséines à l'exception des laits riches en cellules somatiques) et en matières grasses et le dénombrement des cellules somatiques (indicateur de l'intégrité des micelles de caséine et des globules gras) et des germes à 30°C (indicateur du développement de flores potentiellement indésirables). D'autres indicateurs sont parfois retenus et sont susceptibles de rentrer dans les critères de paiement du lait, comme par exemple la lipolyse (responsable du développement de goûts de rance), l'aptitude à la coagulation (temps de coagulation et fermeté du gel) que l'on peut estimer maintenant de façon rapide par des analyses spectrales (moyen infrarouge) ou encore le dénombrement de flores indésirables comme les germes psychotropes ou les coliformes.

En fabrication beurrière, les propriétés physiques des matières grasses du lait déterminent en grande partie l'aptitude beurrière de la crème. Les critères considérés pour caractériser cette dernière sont le rendement et le temps d'obtention. Le rendement beurrier est positivement lié à la teneur en matières grasses de la crème et à sa richesse en acides gras insaturés. D'autre part, la durée de barattage est d'autant plus courte que la teneur de la crème en matières grasses est élevée, que la teneur des matières grasses en acides gras à point de fusion bas est élevée (acides gras insaturés ou à chaîne très courte) ou que la taille des globules gras est importante. De plus, la membrane des gros globules gras est plus facilement rompue lors du malaxage, ce qui limite les pertes de matières grasses dans le babeurre (petit lait issu de la fabrication beurrière) et permet une meilleure élimination de l'eau. L'intégrité des globules gras et des triglycérides est également recherchée, car la lipolyse des matières grasses du lait est à l'origine de défauts de flaveur, tels que le rancissement (Couvreur et Hurtaud, 2007 ; Hurtaud *et al.*, 2001)

Pour la fabrication de lait UHT, la qualité technologique est liée essentiellement à son aptitude à subir des traitements thermiques et à son aptitude à la conservation. Les considérations liées au rendement de fabrication ne rentrent pas en ligne de compte. Le traitement UHT est un procédé qui permet de détruire tous les germes, y compris ceux qui sont sous forme sporulée. L'aptitude à la conservation du lait est cependant limitée par des processus enzymatiques (formation de sédiments,

coagulation douce, développement de rancidité) et parfois par des processus chimiques de vieillissement. La présence dans le lait de protéases ou de lipases résistantes à la chaleur, comme celles apportées par des germes psychrotrophes notamment est donc à proscrire. Les enzymes naturellement présentes dans le lait telles que la phosphatase alcaline, la lactoperoxydase et les lipases sont inactivées à des températures inférieures à celles de la stérilisation UHT et la plasmine est inactivée momentanément mais, dans tous les cas, il subsiste du plasminogène qui, lors d'un stockage de lait stérilisé, libère de la plasmine. La protéolyse tout au long du stockage du lait ne peut donc être évitée, même après stérilisation. La gélification du lait UHT a été attribuée à cette activité rémanente de la plasmine (Cayot et Lorient, 1998). Les principaux problèmes rencontrés au cours du procédé UHT sont liés à une floculation ou une coagulation du lait. La stabilité thermique du lait est définie comme étant la capacité de celui-ci à résister aux hautes températures et à des procédés industriels, sans coagulation visible ou gélification (Singh, 2004). Le facteur le plus important vis-à-vis de la stabilité thermique est le pH, généralement compris entre 6,6 et 6,8. Dans la pratique, les paramètres couramment utilisés pour caractériser la qualité technologique du lait destiné à un traitement UHT sont le niveau des flores psychrotrophes ou à défaut les germes à 30°C, la teneur en cellules somatiques (les laits riches en cellules somatiques ont des teneurs en plasmine et plasminogène supérieures), le pH, l'acidité Dornic (le degré Dornic est une unité de mesure d'acidité du lait : 1 D correspond à 0,1 g d'acide lactique par litre de lait) et des tests spécifiques tels que le test de Ramsdell ou le test de stabilité à l'alcool.

Méthodes de mesure et d'appréciation des propriétés technologiques du lait

Les méthodes d'analyse du lait mises en œuvre pour l'appréciation de ses propriétés technologiques sont très diverses. Ce sont des méthodes microbiologiques, biochimiques ou physico-chimiques. Ces méthodes peuvent être plus ou moins complexes et coûteuses selon les propriétés, les constituants ou les microorganismes recherchés. De plus en plus de constituants ou de propriétés du lait peuvent cependant être prédites par des méthodes rapides. Initialement utilisée pour la prédiction des teneurs en protéines et matières grasses des laits, la spectroscopie dans le moyen infrarouge permet désormais de prédire de façon fiable les teneurs du lait en lactose, en matière sèche, en urée, en acide citrique, en caséines et en minéraux… Le dosage rapide des principaux acides gras du lait est également proposé mais la précision de la prédiction reste insuffisante pour la plupart des acides gras minoritaires, notamment ceux de la famille des oméga 3. Elle peut également être utilisée pour prédire la lipolyse ou des propriétés telles que l'aptitude à la coagulation et les rendements fromagers potentiels. Des développements méthodologiques sont en cours pour utiliser cette méthode dans un but d'authentification de la nature des régimes distribués aux vaches laitières ou encore du contrôle de l'adultération du lait ou des traitements thermiques.

Œufs

L'utilisation des œufs est très répandue. L'œuf de table est un ingrédient utilisé en cuisine pour diverses préparations (pâtisseries, charcuteries, préparations cuisinées…), ou œufs au plat, mollet, durs, omelettes. Les ovoproduits qui représentent plus de 40 % des œufs consommés en France sont aussi largement utilisés par les restaurateurs et industriels de l'alimentation. Lorsque l'on utilise l'œuf en cuisine, on se sert de ses propriétés naturelles de foisonnement (le blanc), d'émulsion (le jaune) et de coloration (le jaune). Le blanc est utilisé pour meringues, mousses,… (propriétés foisonnantes), cuit (coagulation) ou non cuit. Le jaune est utilisé pour ses propriétés émulsifiantes (mayonnaise, sauces au beurre blanc, crèmes…).

Biscuiterie/ pâtisserie/ viennoiserie	Colorant, liant, coagulant, moussant	Moussant, foisonnant, anti-cristallisant	Emulsifiant, colorant, Brillance (dorure)
Confiserie		Anti-cristallisant Foisonnant	Pouvoir aromatique
Glaces	Liant		Emulsifiant
Charcuterie (quenelle)	Liant, émulsifiant		
Pâtes alimentaire	Colorant, liant, pouvoir aromatique		
Mayonnaise/sauces chaudes		Agent de texture	Emulsifiant, agent de texture

Ces constituants de l'œuf répondent à un certain nombre de caractéristiques technologiques qui varient selon l'âge des poules, la température et le stockage de l'œuf. Le temps de stockage de l'œuf est l'élément le plus important de la qualité technologique des œufs de table. L'œuf est un ingrédient qui se conserve naturellement à température ambiante. Des échanges gazeux se produisent entre l'intérieur de l'œuf et l'atmosphère. Si la coquille n'évolue pas au cours du stockage de l'œuf, la viscosité du blanc, son pH et la solidité de la membrane vitelline vont être grandement modifiés lors de la conservation de l'œuf (Gautron *et al.*, 2019; Guyot *et al.*, 2016). Avant cassage de l'œuf, les conditions de conservation de celui-ci auront un impact déterminant sur la transformation ultérieure du produit. A température ambiante, le pH de l'œuf fraichement pondu passe de 7,43 à 9,32 en 10 jours. L'augmentation du pH observé après la ponte a des incidences positives sur certaines propriétés technologiques de l'œuf (capacité moussante du blanc, écalage des œufs durs…), mais fragilisent la solidité de la membrane vitelline qui est un critère technologique crucial de l'industrie des ovoproduits afin d'éviter tout mélange de blanc et de jaune (Guyot *et al.*, 2016). Les facteurs influençant la qualité de l'œuf après ponte, sont principalement liés au temps et à la température de stockage des œufs, ainsi qu'à l'âge de la poule. En effet, une poule en fin de production possède des coquilles plus fragiles et poreuses et donc des propriétés physico-chimiques du blanc, affectées.

En ce qui concerne les ovoproduits, l'enjeu principal est d'augmenter la durée de vie du produit par l'amélioration de sa qualité sanitaire et/ou en conditionnant le produit dans un milieu non propice au développement de microorganismes pathogènes. Les ovoproduits de première transformation regroupent des produits destinés aux industries agro-alimentaires, comme par exemple des blancs, des jaunes et des œufs entiers vendus liquides ou congelés, de la poudre d'œuf. Ils peuvent présenter des propriétés physico-chimiques améliorées par la transformation et ainsi représenter des atouts technologiques, le blanc peut être plus moussant, le jaune plus émulsifiant… L'évolution du pH observé au cours du stockage de l'œuf jouera un rôle significatif lors de la mise au point d'opération de pasteurisation, une basification du milieu pouvant altérer l'efficacité du traitement (Silversides et Scott, 2001). La membrane vitelline, qui sépare le jaune du blanc, sera de moins en moins résistante au court du temps de stockage. Elle perdra 18 % de sa résistance après 8 jours à 18°C (Berardinelli *et al.*, 2003). Ces phénomènes peuvent être délétères pour la qualité de la séparation du blanc et du jaune lors de l'étape qui suit le cassage de l'œuf. Un stockage réfrigéré permet de limiter la perte de résistance et ainsi d'éviter les difficultés à la casse. Une fois séparés, le blanc, le jaune ou une combinaison des deux (appelé entier) vont être pasteurisés. Chaque fraction de l'œuf a ses caractéristiques physico-chimiques propres, la viscosité différente entre un jaune et un blanc va entrainer des comportements rhéologiques différents. Les procédés sont donc adaptés au milieu traité.

L'ensemble des étapes de transformation de l'œuf et leurs conséquences sur les propriétés technologiques seront détaillés dans la partie 2 de ce chapitre. Les facteurs de variabilité connus pour ces propriétés technologiques seront décrits dans le chapitre 2.

Analyse critique des méthodes d'appréciation des propriétés technologiques

Points forts	Points faibles
Des critères physicochimiques fiables ont été identifiés pour prédire l'aptitude à la transformation et à la conservation de certaines matières premières d'origine animale (viande, lait)	Pas ou peu de méthodes rapides, non invasives et fiables permettant de prédire précocement les propriétés technologiques de certaines matières premières (viande, poisson). Selon la nature de l'aliment, l'appréciation peut être plus ou moins complexe. La difficulté n'est pas toujours associée à l'analyse proprement dite, mais à l'échantillonnage (ex : difficulté d'avoir des échantillons représentatifs dans la filière viande à cause d'une grande variabilité).

Les propriétés technologiques des aliments sont généralement associées à des notions de rendement et de fonctionnalité, et elles intéressent essentiellement les transformateurs. La difficulté majeure reste la prédiction des propriétés technologiques d'une matière première d'origine animale. Quelques critères physicochimiques, permettent de prévoir le comportement de la matière première au cours de sa transformation. C'est le cas du pH des viandes dont la valeur permet de prédire le rendement de cuisson des jambons. Néanmoins, les mesures de prédiction des propriétés technologiques sont peu nombreuses et manquent cruellement de précision. Les outils de spectrométrie vibrationnelle récemment mis à la disposition des chercheurs et des industriels ouvrent la voie à des méthodes pointues susceptibles de répondre aux besoins de caractérisation fiables et rapides de la matière première.

1.1.2.4 Propriétés sanitaires

Les propriétés sanitaires d'un aliment sont relatives au danger associé à sa consommation. Elles incluent la flore bactérienne pathogène pour l'homme, les résidus chimiques (résidus de substances qui ont été utilisées de manière volontaire lors de la production primaire) issus de pesticides, d'antibiotiques, les contaminants (environnementaux ; non liés à une utilisation volontaire lors de la production primaire) et éventuellement des produits néoformés au cours des transformations qui peuvent être délétères à la santé humaine (p.ex. produits formés lors de la cuisson ou de la fumaison).

Définition du risque microbiologique et de son évaluation

Liste des dangers microbiologiques

Les dangers microbiologiques transmis par les aliments regroupent de nombreuses bactéries, virus et parasites. La liste des principaux dangers est indiquée dans le Tableau 1-6. Récemment les travaux de Santé Publique France ont permis d'avoir une estimation fiable du nombre de cas d'infection associés à ces différents agents (Tableau 1-7).

Tableau 1-7 : Nombre annuel de cas de maladies causées par les dangers biologiques transmissibles par les aliments en France métropolitaine pour la période 2008-2013

Dangers	Nombre annuel moyen de cas (estimés[1] ou recensés) 2008-2013	Source de données d'incidence	Importance du réservoir animal	Importance de la voie de transmission alimentaire
Bactéries, toxines et métabolites				
Bacillus cereus (B. cereus)	36 000 – 154 000	Van Cauteren (2016)	-	+
Brucella spp.	24	DO[2] Brucellose	+	-
Campylobacter spp. (Campylobacter)	234 000 – 800 000	Van Cauteren *et al.* (2015)	+	+
Clostridium botulinum	19 - 23	Van Cauteren (2016)	-	+
Clostridium perfringens (C. perfringens)	63 000 – 265 000	Van Cauteren (2016)	+/-	+
Cronobacter spp.	1	Surveillance des infections nosocomiales	-	+
Escherichia coli producteurs de shigatoxines (E. coli STEC)	5 500 – 39 700	Van Cauteren (2016)	+	+/-
Histamine	167	DO[2] TIAC	+/-	+
Listeria monocytogenes (L. monocytogenes)	371 - 438	Van Cauteren (2016)	+/-	+
Salmonella enterica (non typhiques) (Salmonella)	105 000 – 380 500	Van Cauteren (2015)	+	+
Staphylococcus aureus (S. aureus)	38 000 – 161 000	Van Cauteren (2016)	+/-	+
Vibrio parahaemolyticus	0-5	DO[2] TIAC CNR des Vibrions	+	+
Yersinia enterocolitica (Y. enterocolitica)	14 100 – 57 850	Van Cauteren (2016)	+	+
Virus				
Norovirus	338 000 – 580 500	Van Cauteren (2016)	-	-
Virus de l'hépatite A (VHA)	2 523 – 2 729	Van Cauteren (2016)	-	-
Virus de l'hépatite E (VHE)	36 637 – 82 893	Van Cauteren (2016)	+	+/-
Parasites				
Anisakis	7	Van Cauteren (2016)	+	+
Cryptosporidium spp. (Cryptosporidium)	101	CNR Cryptosporidiose	+/-	+/-
Cyclospora cayetanensis	8	Réseau Crypto - Anofel	+/-	+/-
Echinococcus multilocularis	29	Van Cauteren (2016)	+	+
Fasciola hepatica	5	Van Cauteren (2016)	+	+
Giardia duodenalis	482	Réseau Crypto - Anofel	+/-	+/-
Taenia saginata	33 028	Van Cauteren (2016)	+	+
Toxoplasma gondii (T. gondii)	7 509 – 15 159	Van Cauteren (2016)	+	+
Trichinella spp.	2	DO[2] TIAC	+	+

[1]Les estimations sont issues des travaux de thèse de Van Cauteren (2016 ; 2015).

[2]Déclaration Obligatoire

Il est important de préciser que la transmission de l'agent pathogène du réservoir à l'Homme peut s'effectuer par différentes voies :

- **la transmission alimentaire** est une transmission indirecte du danger par l'ingestion d'aliments contaminés.
- **La transmission interhumaine** est une transmission directe de l'agent pathogène par contact avec une personne infectée. La transmission peut se faire uniquement de personne à personne lorsque l'Homme constitue le réservoir

de l'agent pathogène. La transmission interhumaine peut également être secondaire à un contact avec un cas primaire (ou cas index) qui est la personne qui a introduit l'agent pathogène dans un groupe donné. Ce cas primaire peut avoir été infecté par contact avec une source alimentaire ou autre.

- **La transmission environnementale** est une transmission indirecte de l'agent pathogène par contact avec un véhicule environnemental (par exemple les eaux de baignade).
- **La transmission par contact avec des animaux** est une transmission directe à l'Homme d'agents pathogènes hébergés chez des réservoirs animaux.

Evaluation des risques microbiologiques associés aux produits alimentaires d'origine animale

Méthodes d'attribution aux réservoirs, au mode de production et aux modes de préparation. L'**attribution des sources** est la méthodologie qui permet de quantifier la part relative de différentes sources, mode de production et/ou pratiques de consommation au fardeau des maladies infectieuses transmissibles par les aliments (Batz *et al.*, 2005 ; Pires *et al.*, 2009). Les méthodes d'attribution décrites dans la littérature relèvent en général d'une démarche descendante (« top-down »), ascendante (« bottom-up ») ou combinée. La démarche descendante est fondée sur les données épidémiologiques (incidence des cas humains, données d'investigation d'épidémies, études épidémiologiques) et aboutit à une estimation du nombre de cas humains attribuable aux différentes sources. La démarche ascendante consiste à prédire le nombre de cas humains par source à partir des données de contamination initiale des aliments en y intégrant, d'une part les facteurs influençant l'exposition (comme le mode de production et le mode de préparation des aliments), et d'autre part les relations dose/réponse. Cette dernière approche rejoint l'approche utilisée dans l'évaluation des risques pour les dangers chimiques.

Évaluation des risques aux produits alimentaires d'origine animale et aux réservoirs animaux

Les produits alimentaires d'origine animale sont les véhicules de nombreux dangers microbiologiques. Les points d'introduction des dangers dans la chaine de production des aliments diffèrent en fonction des dangers (Tableau 1-6). Les principaux pathogènes des aliments ont un réservoir animal et le point d'introduction dans la chaine alimentaire est la production animale à la ferme. A titre d'exemples pour les dangers bactériens, les réservoirs de *Campylobacter* sont les volailles (et d'autres oiseaux) ainsi que le bétail ; ceux des *Escherichia coli* producteurs de shigatoxines (*E. coli* STEC) sont les bovins et autres ruminants ; ceux de *Salmonella* sont notamment les volailles, les bovins et les porcins ; ceux de *Yersinia enterocolitica* sont principalement les porcins. De même, la plupart des dangers parasitaires ainsi que le virus de l'hépatite E sont également fortement associés aux espèces animales. Les aliments d'origine animale sont également les véhicules de différents dangers introduits au cours de la production alimentaire (*B. cereus*, *S. aureus* dans les plats préparés,). Le chapitre 3 présente une analyse détaillée des niveaux de risque pour les différents dangers.

Évaluation des risques associés au mode de production et aux modes de consommation

La variabilité des modes de production (e.g mode élevage), technologie de production et mode de consommation ont un rôle particulièrement important dans le niveau de risque pour une catégorie d'aliment donnée. L'importance de ces sources de variabilité sera abordée dans le chapitre 2. Elle repose généralement sur des approches ascendantes (calcul d'exposition, d'appréciation des risques pour les différents modes de production/consommation).

Définition du risque chimique et de son évaluation

Le risque sanitaire lié à un aliment est analysé de manière différente s'il s'agit du risque chimique ou du risque microbiologique. Les principes et méthodes pour l'évaluation du risque chimique dans les aliments ont été formalisés dans un document conjoint de la FAO et de l'OMS publié dans la série *Environmental Health Criteria* (World Health Organization,

2009). Il est important de rappeler la structure de la démarche, car le produit alimentaire, en soi, n'est pas l'objet de l'évaluation, celle-ci est centrée sur le contaminant chimique, l'aliment n'étant qu'un vecteur ou un contributeur à l'exposition de l'homme. Ainsi la première étape vise à identifier le danger, c'est-à-dire la capacité de nuisance du contaminant (figure 1-3). Le danger d'un agent chimique est défini comme la propriété inhérente à cet agent à pouvoir causer un effet adverse lorsqu'un organisme, un système ou une population est exposé à cet agent. L'étape suivante vise à la caractériser : cela revient à établir une relation dose-réponse. Le principe est que l'effet délétère augmente avec la dose, qu'il y ait un seuil d'effet (grande majorité des cas) ou non (contaminant génotoxique). Cette approche est aujourd'hui bousculée avec la notion de réponse non monotone et d'action à très faibles doses, à la base du concept de perturbateurs endocriniens. L'aliment n'apparaît réellement que dans la troisième étape qui consiste à évaluer l'exposition de la population ou d'un sous-groupe de celle-ci, au contaminant. **Chaque aliment est ainsi défini par deux dimensions, son niveau de contamination et son niveau de consommation**. C'est la somme des contributions de chacun des aliments qui forme l'exposition. La quatrième et dernière étape consiste à mettre en relation cette exposition et la relation dose-réponse, pour savoir si le niveau d'exposition est susceptible d'entraîner un effet délétère et ainsi qualifier ou quantifier le risque. Le risque est défini comme la probabilité qu'un effet délétère affecte un organisme, un système ou une (sous)population, dans des conditions spécifiques, suite à l'exposition à un agent.

Ainsi la qualification d'un aliment d'origine animale vis-à-vis de la sécurité sanitaire ne dépend pas que de ses propriétés intrinsèques, mais aussi de l'exposition alimentaire totale à un contaminant, définissant s'il y a risque ou non pour la population, et de la contribution du dit aliment à cette exposition. En effet, quasiment tous les aliments contiennent une part de contaminant, qu'ils soient « spontanés » (éléments de la croûte terrestre comme l'aluminium, l'arsenic ou le cadmium) ou strictement anthropiques (polluants organiques de synthèse dits xénobiotiques). **Un aliment sera considéré à risque, pour un contaminant donné, si l'exposition globale de la population à ce contaminant excède les préconisations de santé publique, et qu'il est un contributeur significatif à cette exposition**. Bien évidemment, il ne s'agit pas de délivrer un blanc-seing, pour la contamination des aliments tant qu'une barre n'est pas franchie, mais c'est un outil de hiérarchisation du risque. De manière plus générale, l'évaluation quantitative du risque repose d'une part sur la comparaison entre l'exposition alimentaire et les valeurs guide sanitaires, qui peut être investiguée en faisant varier les niveaux d'exposition (différents modèles alimentaires ou abaissement des niveaux de contamination), d'autre part sur l'estimation de marges d'exposition.

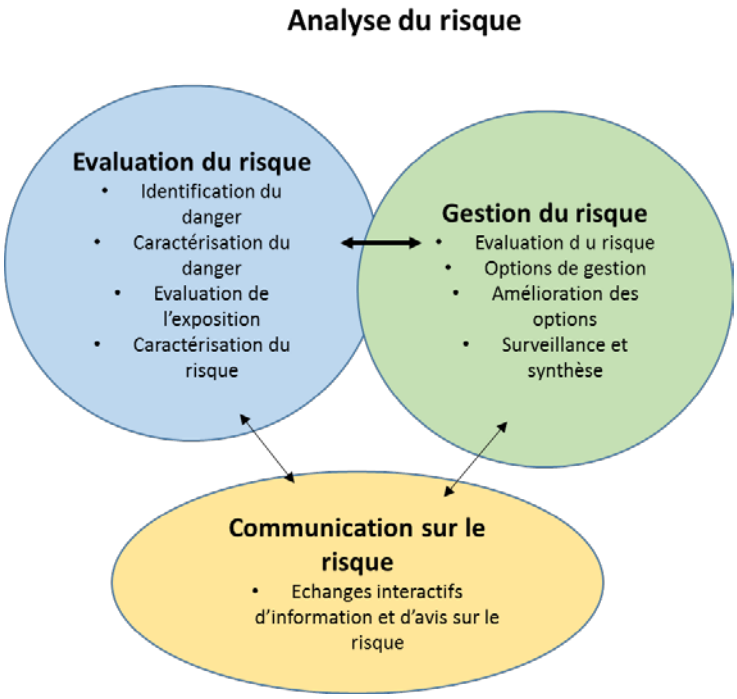


Figure 1-3 : Démarche d'analyse et de gestion du risque

Proposition de démarche pour le choix des contaminants et des aliments retenus

À l'échelle nationale, le document le plus récent sur l'évaluation des risques chimiques alimentaires est l'Etude de l'alimentation totale infantile (ou EATi), réalisée par l'ANSES et publiée en septembre 2016 (Anses, 2016b ; 2016c ; 2016d ; 2016e ; 2016f). Elle concerne l'exposition alimentaire des enfants de moins de 3 ans, séparés en quatre classes d'âge. L'environnement de l'enfant imprime une empreinte durable sur l'expression de ses gènes pouvant influer sur sa santé future de façon favorable ou défavorable. Les 1 000 premiers jours sont une période de vulnérabilité mais offrent une fenêtre d'opportunités à saisir en termes de prévention précoce pour rendre l'organisme plus résistant aux facteurs induisant les maladies chroniques telles que l'obésité, véritable fléau de notre société moderne. C'est la tranche d'âge ciblée dans l'étude EATi. Quelque 670 substances ont été analysées et l'exposition a pu être estimée pour 500 d'entre elles, ce qui en fait l'étude la plus complète à ce jour. Plusieurs phrases (expressions) caractérisant le risque, accompagnées d'un code couleur, ont été retenues pour qualifier l'exposition, respectivement :

- situation jugée préoccupante
- risque ne pouvant être exclu
- risque jugé tolérable ou acceptable
- impossibilité de conclure quant au risque.

Dans le cadre de cette expertise, la proposition est de ne retenir que les contaminants qui correspondent à la première catégorie, à savoir ceux pour lesquels une estimation a pu être réalisée, qui débouchent sur un dépassement des valeurs toxicologiques de référence. Ces contaminants peuvent être classés par type :

- éléments traces métalliques ou ETM (dont plomb, arsenic inorganique, nickel)
- polluants organiques persistants ou POP (dioxines et furanes, polychlorobiphényles ou PCB)
- composés néoformés (acrylamide, furane)
- mycotoxines (T2/HT2, déoxynivalénol et ses dérivés).

Il s'agit ensuite d'identifier des denrées d'origine animale qui seraient significativement contributrices à l'exposition.

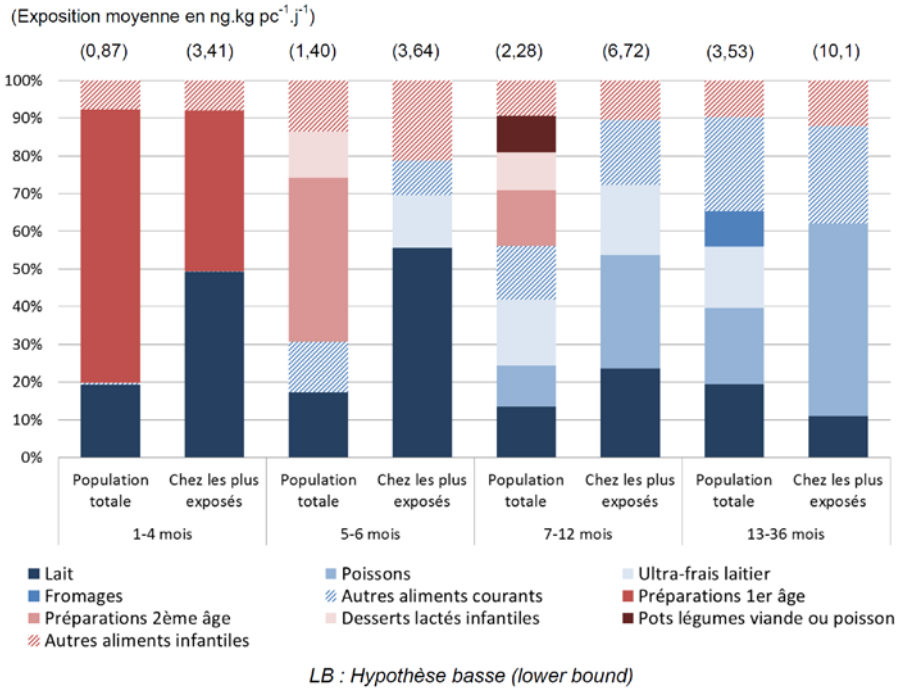


Figure 1-4 : Contribution des différents groupes d'aliments à l'exposition aux 6 PCB-NDL (PCB Non Dioxine Like) (PCB28, 52, 101, 138, 153, 180), d'après EATi-tome3-Composés organiques (Anses, 2016e).

Pour mémoire, la Dose journalière tolérable pour les PCB-NDL est de 10 ng.kg^{-1}PC.j^{-1} (PC étant le poids corporel), dépassée chez les plus exposés des 13-36 mois. Dans cette classe d'âge, c'est le poisson qui est le principal contributeur, suivi par le lait.

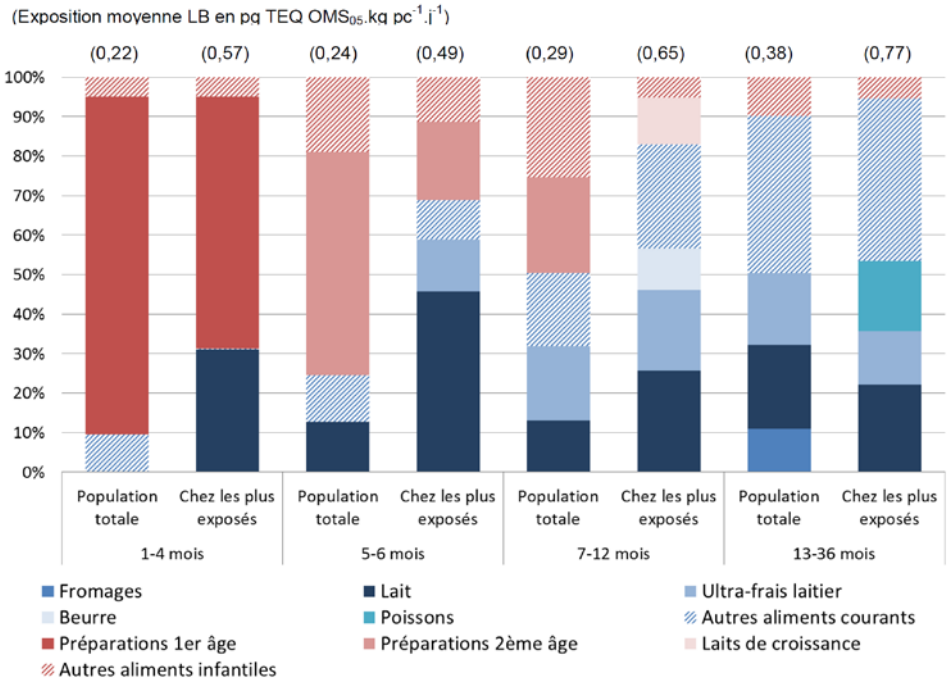


Figure 1-5: Contribution à l'exposition moyenne des consommateurs aux dioxines et furanes

Les produits laitiers (lait, beurre, UFL) et le poisson sont les principaux contributeurs pour les 13–36 mois.

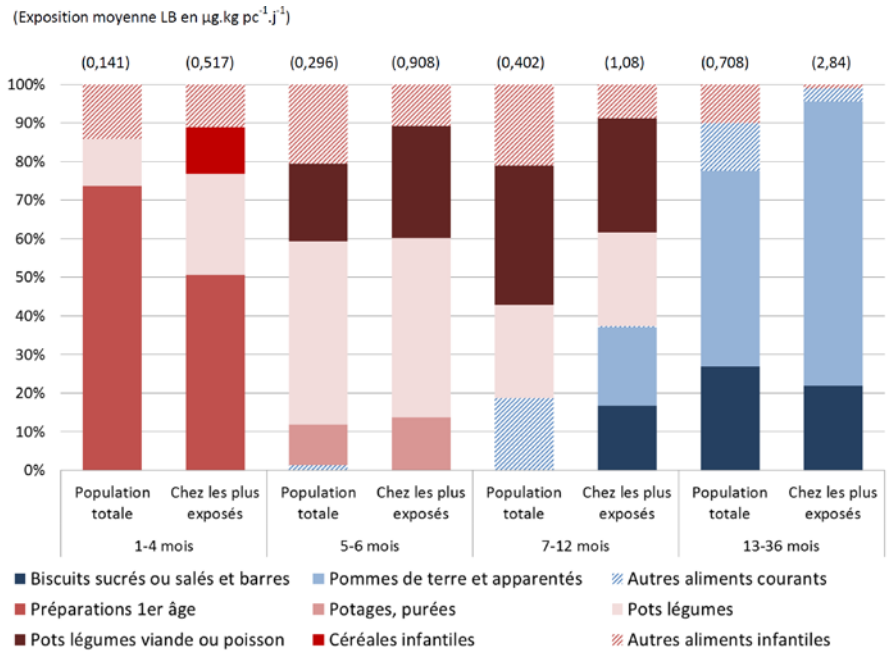


Figure 1-6 : Exposition moyenne à l'acrylamide

Les produits animaux n'ont pas de contribution significative à l'exposition à l'acrylamide chez les 13-36 mois.

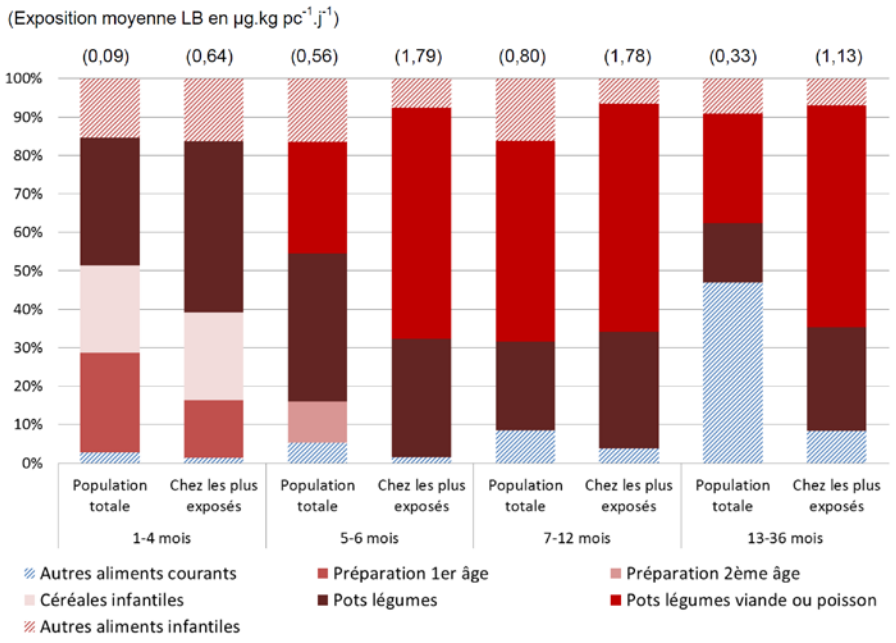


Figure 1-7 : Exposition moyenne au furane

Les pots de légume-viande ou poisson sont des contributeurs majoritaires au furane chez les 13-36 mois.

Pour les deux autres composés de type mycotoxines, (DON T2&HT2) les produits animaux ne sont pas contributeurs et présentent un taux de détection proche de zéro.

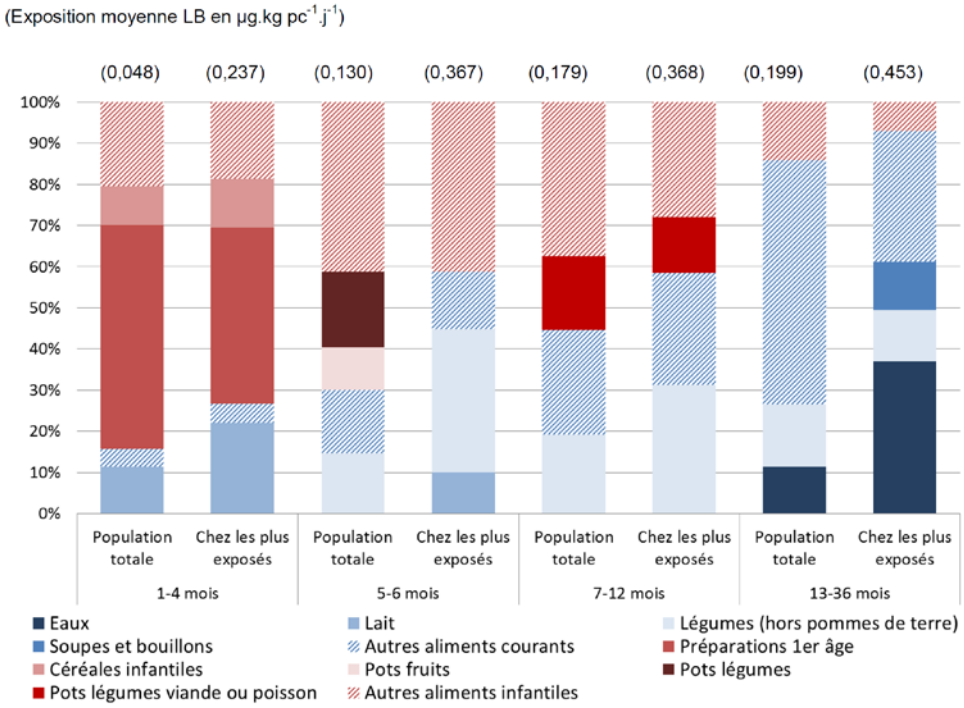
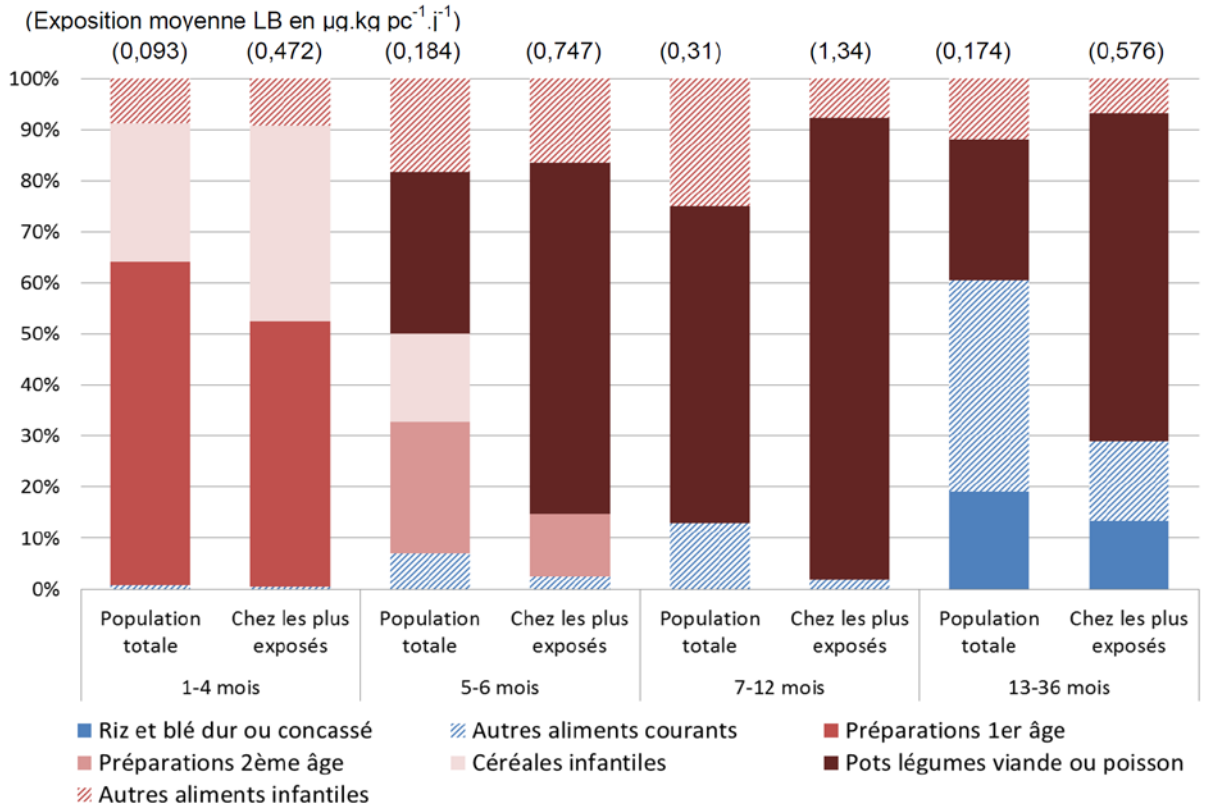


Figure 1-8 : Exposition moyenne des enfants aux éléments inorganiques



Les Denrées animales et d'origine animale (DAOA) ne sont pas une source significative pour le plomb, l'arsenic inorganique ou le nickel chez les enfants de 13-36 mois.

L'étude EAT2, publiée en juin 2011 a analysé 445 substances dans 212 types d'aliments (Anses, 2011b) sur des cibles adultes et enfants de plus de 3 ans (L'EATi ne portait sur des enfants de moins de 36 mois). Les phrases de risque diffèrent légèrement de celles de l'EATi ; néanmoins la catégorie la plus problématique correspond au terme « risque ne pouvant être écarté » (situation de dépassement de la VTR).

Parmi les ETM sont concernés aluminium, arsenic inorganique*[8], cadmium, méthylmercure et plomb*, sulfites (additif). Pour les composés organiques, sont concernés dioxines* (et furanes), polychlorobiphényle (PCB*), déoxynivalénol (DON*), acrylamide* (néoformé) et diméthoate (pesticide).

Les sulfites ne sont pas pertinents dans le cadre de l'étude car l'alcool est le vecteur principal ; de même le diméthoate, désormais interdit, était véhiculé par des fruits pour lutter contre l'infestation par *Drosophili suzukii* et sa présence marquait un non-respect du délai avant récolte.

Eléments traces métalliques (ETM) pour lesquels le risque ne peut pas être écarté (Anses, 2011b)

[8] Les composés communs à l'EATi sont suivis d'un astérisque.

Substances	Type de risque	Population concernée	Aliments principalement contributeurs
Sodium	Excès d'apports	26 à 58% des adultes et 7 à 25% des enfants, selon la valeur guide considérée	Adultes : pain et produits de panification sèche (30%), charcuteries (11%) Enfants : pain et produits de panification sèche (19%), charcuteries (11%)
Zinc	Excès d'apports	Enfants (1%)	viandes (25%), lait (10%)
	Insuffisance d'apports	Enfants	
Sélénium	Insuffisance d'apports	Personnes âgées	Adultes : eau (27%), café (9%)
Cuivre	Excès d'apports	3% des adultes et <1% des enfants	Adultes : café (36%) Enfants : pâtes (13%), pains et produits de panification sèche (6%), abats (6%), chocolat (6%), eaux (6%)
	Insuffisance d'apports	Enfants	
Calcium	Insuffisance d'apports	Adolescents	Enfants : lait (26%), produits ultra-frais laitiers (13%), fromages (13%)
Fer	Insuffisance d'apports	Femmes et jeunes filles	Adultes : pain et produits de panification sèche (16%), viandes (10%) Enfants : viandes (10%), pain et produits de panification sèche (9%)
Magnésium	Insuffisance d'apports	Adultes et enfants présentant les apports les plus faibles	Adultes : pain et produits de panification sèche (11%), café (9%), légumes hors pommes de terre (7%) Enfants : lait (9%), pain et produits de panification sèche (7%)

Comme dans l'étude précédente, les ETM sont principalement apportés par des produits végétaux transformés ou non et l'eau, que ce soit pour le plomb (boissons alcoolisées, pain, eau), le cadmium (pain, pommes de terre), l'arsenic inorganique (eau, café), l'aluminium (boissons chaudes, légumes), les mycotoxines (pain) ou l'acrylamide (pommes de terre sautées ou frites). Pour les polluants organiques par contre, ce sont systématiquement les produits animaux qui sont les plus forts contributeurs. Pour les dioxines et furanes (attention dans cette étude y sont ajoutés les PCB-DL) comme pour les PCB-NDL, poissons et produits laitiers arrivent en tête. De même, le méthylmercure est principalement apporté par le poisson, notamment le thon.

Familles de substances	Substances	Population concernée	Aliments principalement contributeurs
Contaminants inorganiques	Plomb	Adultes et enfants les plus exposés	Adultes : boissons alcoolisées (14%), pain et produits de panification sèche (13%), eau (11%) Enfants : eau (11%), lait (11%), boissons rafraichissantes sans alcool (10%)
	Cadmium	<1% des adultes et 15% des enfants	Adultes : pain et produits de panification sèche (22%), pommes de terre (12%) Enfants : pommes de terre (14%), pain et produits de panification sèche (13%)
	Arsenic inorganique	Adultes et enfants les plus exposés	Adultes : eau (24-27%), café (14-16%) Enfants : eau (19-24%), lait (11-17%), boissons rafraichissantes sans alcool (10-12%)
	Aluminium	<1% des adultes et 2% des enfants	Adultes : Boissons chaudes hors café (13%), légumes hors pommes de terre (11%) Enfants : légumes hors pommes de terre (8%), pâtes (7%), pâtisseries et gâteaux (6%)
	Mercure organique (méthylmercure)	Forts consommateurs de thon (<1% des adultes et 1% des enfants)	-
Dioxines et PCB	Dioxines et PCB-DL	<1% des adultes et <1% des enfants	Adultes : poissons (20%), beurre (20%) Enfants: beurre (20%), poissons (14%)
	PCB-NDL	<1% des adultes et 2% des enfants	Adultes : poissons (37%), beurre (11%), fromages (11%), produits ultra-frais laitiers (11%) Enfants : poissons (30%), beurre (12%), viande (11%)
Additifs	Sulfites	Forts consommateurs de vin (3% des adultes)	-
Mycotoxines	DON et dérivés	<1% des adultes et de 5 à 10% des enfants	Adultes : pain et produits de panification sèche (60%) Enfants : pain et produits de panification sèche (40%)
Composés néoformés	Acrylamide	Adultes et enfants les plus exposés	Adultes : pommes de terre sautées ou frites (45%), café (30%) Enfants : pommes de terre sautées ou frites (61%), biscuits (19%)
Résidus de pesticides	Diméthoate	Forts consommateurs de cerises (<1% des adultes et des enfants)	-

De cette première approche, il ressort que les composés organiques sont les contaminants chimiques pour lesquels les denrées animales et d'origine animale sont les contributeurs majoritaires, notamment les groupes d'aliments poissons et produits laitiers.

Une deuxième approche est basée sur les DAOA pour lesquelles un certain nombre de contaminants sont réglementés. Le règlement européen CE 1881-2006, amendé plusieurs fois depuis, en donne les valeurs maximales admises (version du 19/03/2018) (Commission européenne, 2006).

Country	Survey acronym	Fish	Milk	Meat	Fat	Egg	Infants[a]	Other[b]
Denmark	Danish Dietary Survey	35.91	15.48	34.28	12.66	1.65	0.00	0.02
Finland	FINDIET 2007	48.98	13.10	27.18	8.60	1.43	0.00	0.72
France	INCA2	44.36	13.40	35.45	5.22	1.39	0.00	0.18
Germany	National Nutrition Survey II	36.76	14.91	38.78	8.16	0.91	0.00	0.49
Hungary	National Repr Surv	13.89	16.31	56.23	9.35	3.84	0.00	0.38
Ireland	NSIFCS	25.10	14.65	49.00	9.44	1.24	0.00	0.58
Italy	INRAN SCAI 2005 06	58.83	14.82	20.03	4.66	1.49	0.00	0.15
Latvia	EFSA TEST	42.61	12.10	39.14	4.92	1.02	0.00	0.22
Netherlands	DNFCS 2003	21.81	23.63	43.11	10.47	0.79	0.02	0.18
Spain	AESAN	51.95	11.09	30.63	4.22	2.07	0.00	0.04
Spain	AESAN FIAB	49.75	10.13	33.32	4.51	2.18	0.00	0.10
Sweden	Riksmaten 1997 98	52.32	16.02	24.23	5.85	1.47	0.00	0.10
United Kingdom	NDNS	40.46	14.32	37.62	4.99	2.25	0.02	0.35
		Elderly						
Belgium	Diet National 2004	54.38	11.28	20.68	12.41	0.96	0.00	0.28
Denmark	Danish Dietary Survey	49.16	12.81	24.78	11.63	1.60	0.00	0.03
Finland	FINDIET 2007	65.41	8.24	17.05	7.24	1.11	0.00	0.95
France	INCA2	50.98	12.57	28.46	6.25	1.49	0.00	0.25
Germany	National Nutrition Survey II	47.55	12.23	30.41	8.23	0.78	0.00	0.80
Hungary	National Repr Surv	9.08	19.29	56.79	10.41	3.96	0.00	0.48
Italy	INRAN SCAI 2005 06	57.94	15.04	20.04	5.16	1.62	0.00	0.21
		Very elderly						
Belgium	Diet National 2004	52.96	11.15	20.57	14.09	1.01	0.01	0.20
Denmark	Danish Dietary Survey	60.87	10.44	18.33	9.36	0.97	0.00	0.03
France	INCA2	49.89	13.10	28.14	6.83	1.65	0.00	0.38
Germany	National Nutrition Survey II	50.68	11.89	27.02	8.94	0.74	0.00	0.73
Hungary	National Repr Surv	8.18	17.49	57.67	12.17	4.05	0.00	0.45
Italy	INRAN SCAI 2005 06	41.87	22.83	26.12	6.47	2.26	0.02	0.43

Legend: (a): "Infants" refer to foods for infants and young children. (b) "Other" gathers the other foods taken into account for the exposure assessment: honey, vitamin and mineral supplements and supplements containing special fatty acids.

Analyse critique des méthodes de mesure et d'appréciation des propriétés sanitaires

Points forts	Points faibles
Dénombrements bactériens et identification des microorganismes (cultures bactériennes, biologie moléculaire, PCR) au point Méthodes fiables de recherches de contaminants (spectrométrie de masse).	Pas ou peu de méthodes rapides permettant de déterminer instantanément les propriétés sanitaires de la matière première et des produits transformés. Nécessité d'échantillonner compte tenu des volumes produits quotidiennement (quelques grammes ou ml de matière ou quelques individus analysés quotidiennement. Coût des outils et des analyses de contaminants chimiques et résidus.

Les méthodes de caractérisation des propriétés sanitaires sont fiables, qu'il s'agisse de microbiologie ou de micro-contaminants. Néanmoins un délai de plusieurs heures est nécessaire à l'obtention de résultats. De plus les analyses ne sont réalisées que sur un échantillonnage réduit en comparaison des volumes traités:, analyse de quelques g de viande hachée dans une cutter (mélangeur) de plusieurs centaines de kilos. Les filières manquent de moyens de caractérisation rapides qui pourraient être utilisés en ligne pour une intervention rapide en cas de problème sanitaire.

1.1.2.5 Propriétés d'image.

La qualité perçue d'un produit ne dépend pas seulement de facteurs intrinsèques, mesurables sur le produit. Elle dépend aussi de facteurs extrinsèques, appelées ici propriétés d'image, qui renvoient à des considérations d'ordre **éthique**, **environnemental**, d'**origine,** mais également de **santé** (respect du **bien-être animal** et de l'**environnement. Par exemple, la réduction des intrants** -notamment médicamenteux-lors de la production, la réduction des ingrédients et utilisation d'ingrédients naturels lors de la transformation), et plus largement l'**éthique autour de la production, transformation, distribution et consommation** (mode et/ou pratiques d'élevage et d'élaboration du produit, réduction des emballages), l'**origine** du produit, les **valeurs sociales** telles que la contribution au développement territorial, le commerce équitable et de proximité, voire **valeurs religieuses** pour certains produits animaux sont des critères pris en compte.

Les **croyances**, **attentes**, **perceptions** et **comportements** des consommateurs sont en effet essentiels à appréhender et comprendre, car ils influencent l'acte d'achat et de ré-achat. Des études menées sur différentes filières (porcs, œufs, viande ovine, viande bovine, voir les différentes sections du chapitre 2) ont bien montré **l'importance d'une information relative aux conditions d'élevage et/ou à l'origine** des animaux sur les **préférences des consommateurs,** alors même que la qualité intrinsèque appréciée en aveugle, sans cette information, n'était pas différente. La littérature scientifique souligne cependant i) que ces croyances, attentes, perceptions et comportements sont évolutifs et variables entre segments de consommateurs, voire pour un consommateur donné selon les circonstances de consommation, et ii) que l'on constate parfois des différences entre le déclaratif et le comportement d'achat et iii) que le grand public n'est pas toujours au fait de l'évolution des pratiques d'élevage (p. ex. abandon des cages individuelles pour les poules pondeuses) (*cf*. chapitre 5).

La prise en compte de cette dimension d'image par les acteurs des filières est souvent réalisée à travers des marques privées, collectives (p. ex. **signes de qualité**) ou des mentions valorisantes. Elles sont un moyen de communiquer sur les **modes de production, pratiques d'élevage et de transformation** et l'**origine**, de différencier les produits, et sont des **repères de qualité** pour les consommateurs. Les SIQO s'accompagnent de certification et de contrôles qui contribuent à les valider et à construire et conforter la confiance entre le vendeur et l'acheteur (Casabianca, 2018). Cependant, certaines études (sur la volaille) montrent que les consommateurs peuvent se détourner de certains signes de qualité s'ils sont perçus comme s'éloignant trop de leurs valeurs initiales (Adams et Salois, 2010).

Les **impacts environnementaux** associés au produit prennent une place croissante dans les attributs d'image. Cependant, des études scientifiques soulignent la complexité de leur évaluation. Les impacts globaux (changement climatique, utilisation d'énergie, utilisation de surfaces) sont exprimés par kg de produit, alors que les impacts locaux (acidification, eutrophisation) sont exprimés par hectare. Il peut donc y avoir des classements différents selon l'impact considéré, d'où la nécessité d'une évaluation multicritère. Ces impacts sont aussi à mettre en regard des autres impacts et services : intrants, marchés, travail et emploi, volets sociaux et culturels des systèmes de production/élaboration des produits animaux.

Méthodes de mesure et d'appréciation des propriétés d'image

La mesure, le contrôle et/ou l'appréciation de la qualité d'image va dépendre de la mention valorisante qui va être mise en avant. Par exemple, dans le cas de la filière Bleu Blanc Cœur c'est un enrichissement en AG n-3 du produit qui est visé et donc une amélioration de la qualité nutritionnelle. Cette teneur est vérifiée régulièrement par des laboratoires agréés. Celle-ci sera mentionnée sur l'étiquetage du produit dont la composition nutritionnelle est détaillée. Cette mention peut être complétée par l'indication du Nutri-Score. Pour les systèmes de production, il existe de nombreux systèmes de traçabilité. Assurer l'**identification** et la **traçabilité** des animaux d'élevage est une obligation légale qui répond en premier lieu à des obligations sanitaires. C'est également un instrument de commercialisation devant assurer la transparence tout au long de la chaîne alimentaire du producteur au consommateur. La certification de produits en tant que SIQO procure à ceux-ci une reconnaissance de leur engagement à respecter les cahiers des charges officiels correspondants. Elle représente ainsi un élément de communication, donnant de la crédibilité auprès des consommateurs. Cette certification est régulée par des systèmes de contrôles officiels et reconnus par les pouvoirs publics. **L'étiquetage environnemental** des produits alimentaires est envisagé mais cela requiert une harmonisation préalable au niveau de l'UE des bases de données pour les analyses de cycle de vie des produits et des modalités d'actualisation de ces bases. L'application ne sera donc pas immédiate. **L'étiquetage du bien-être animal** a été mis en place en France par un distributeur pour les volailles fin 2018. Cet étiquetage s'appuie sur un référentiel qui comprend 230 critères de bien-être animal prenant en compte toutes les étapes de la vie de

l'animal, de l'éclosion à l'abattage. Un étiquetage UE est en cours de discussion. Trois groupements de producteur de volailles ont rejoint cette démarche début 2019. Désormais, 10 % de l'ensemble des poulets produits en France sont concernés par cet étiquetage. Un outil d'évaluation du bien-être animal en élevage, la méthode EBENE, a également été développé pour et par les filières avicoles avec une application numérique sur smartphone[9]. Cette méthode s'appuie en partie sur les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche européen Welfare Quality (Veissier *et al.*, 2005). Enfin, la qualité d'image d'un produit peut être appréciée grâce à des enquêtes de consommation et des enquêtes socio-économiques (*cf.* chapitre 5).

Analyse critique des méthodes d'appréciation des propriétés d'image

Points forts	Points faibles
Définition de contrôles dans les cahiers des charges. Laboratoires agréés Traçabilité des systèmes de production	De nombreux critères pris en compte pour définir les propriétés d'image dont certains sont difficiles à mesurer, actualiser et harmoniser (exemple : impact environnemental d'un produit, niveau de bien-être des animaux d'élevage pour un système de production donné).

L'image d'un produit est basée sur l'idée que s'en fait le consommateur. Cependant, l'emballage « publicitaire » du produit est parfois trompeur : Par exemple, emballage d'un fromage de chèvre avec une image de chèvre en plein air alors que l'immense majorité du lait de chèvre est produit dans des élevages hors sol. La viande bio est exempte de contaminants dans le subconscient du consommateur, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. Dans ce dernier cas cependant, le cahier des charges favorise sensiblement le bien-être animal, ce qui participe à juste titre a la meilleure image des produits animaux issus de l'agriculture biologique.

1.1.2.6 Propriété d'usage

Les propriétés d'usage renvoient à la praticité d'un produit (*convenience* des anglo-saxons) : certains consommateurs valorisent le fait que les caractéristiques du bien qu'ils achètent leur font économiser du temps et des efforts (physiques et mentaux) dans les phases d'achat, de préparation culinaire, de consommation et de nettoyage post-consommation (cuisine et ustensiles). Par exemple, l'allongement des durées de conservation des produits réduit la fréquence d'achat. Les emballages innovants permettent un réchauffage au four micro-ondes - économe en temps - et la consommation partielle d'un produit (mono-portion, sachet refermable…). Certains emballages peuvent également autoriser une consommation nomade des produits (snacking).

Méthodes de mesure et d'appréciation des propriétés d'usage

Nous n'avons pas trouvé de méthodes de mesure objective des propriétés d'usage. Les propriétés d'usage sont généralement évaluées à partir d'enquêtes chez les consommateurs.

Analyse critique des méthodes d'appréciation des qualités d'usage

Points forts	Points faibles
Pas d'outils onéreux nécessaires à l'évaluation des propriétés d'usage. Représentativité large d'une population. Possibilité de prendre en compte de nombreux critères et différents moyens d'enquête (interrogation directe en vis-à-vis ou par téléphone, questionnaire distribué par la poste, par mail ou mis en ligne sur internet).	Probablement très subjectif et dépendant du niveau social et de l'environnement du consommateur. Temps de réalisation et d'analyse des résultats relativement long. Variabilité de réponse très importante d'où la nécessité d'enquêter un nombre élevé de personnes (environ 1 000). Réponses très dépendantes des habitudes de consommation de la population enquêtée. Peu d'études longitudinales pour évaluer l'évolution des pratiques des consommateurs et leurs attentes sur la qualité d'usage.

[9] https://www.itavi.asso.fr/content/protocole-ebene-guide-pour-les-utilisateurs (consulté le 23/01/2020)

	Manque de méthodologies statistiques pour tester la fiabilité des enquêtes et les approches multicritères.

Peu de bibliographie sur le sujet. Il semble que les propriétés d'usage ne soient appréciées qu'à travers l'analyse de réponses d'enquêtes.

1.1.2.7 Valeur commerciale

La valeur commerciale des produits agricoles est basée sur des critères de rendement, de composition, d'aspect ou de caractéristiques physicochimiques qui vont moduler leur prix d'achat. Ces critères sont généralement définis par les acteurs de la filière. Pour répondre à des besoins d'impartialité dans le cadre des échanges commerciaux dans l'Union européenne, la valeur commerciale de certains produits est soumise à la réglementation européenne et à la réglementation des états. Dans certaines filières (p. ex. filière viande), des accords commerciaux supplémentaires peuvent être conclus entre partenaires commerciaux.

Viande

Critères d'appréciation de la valeur commerciale des carcasses

Dans le but de faciliter les échanges dans l'UE, les méthodes de classement des carcasses ont été harmonisées. Sauf cas particuliers, le classement « européen » est obligatoire dans les abattoirs de gros bovin, porcin et ovins. La valeur commerciale des carcasses est essentiellement associée à une prédiction de leur rendement en viande (espèce, sexe, âge, conformation, teneur en muscle des pièces) et à leur aspect extérieur (état d'engraissement, couleur). En fin de chaine d'abattage, les carcasses identifiées (espèce, sexe, âge) sont pesées. La conformation (bovins, ovins) ou la teneur en viande maigre (porcs) est évaluée selon les 5 classes : E, U, R, O, P (E excellente conformation à P conformation médiocre avec une classe S supplémentaire pour la conformation exceptionnelle des animaux culards hypertrophiés). L'état d'engraissement est noté selon des classes allant de 1 (faible engraissement) à 5 (fort engraissement). La couleur de la viande est un critère de classement supplémentaire chez les veaux de boucherie et les agneaux. Le veau de lait est associé par le consommateur à une chair de couleur blanche. Par conséquent, plus la viande est blanche plus la valeur commerciale de la carcasse est élevée. La couleur de la viande de veau est répartie en 5 classes : 0 : Blanc ; 1 : Rosé très clair ; 2 : Rosé clair ; 3 : Rosé ; 4 : Rouge. La valeur commerciale de la carcasse est établie à partir de l'ensemble de ces critères (table 8) (FranceAgriMer, 2016 ; Interbev Occitanie, 2007).

Table 8 : Critères réglementaires de la valeur commerciale des carcasses et poissons

Espèce-catégorie	Code U. E.	Caractéristiques	Critères de classements commerciaux	Réglementation
Gros Bovins				
Taurillon	A	Mâle non castrés <12-24 mois	Poids/Conformation/engraissement	Règlements UE n°1308/2013 et CE n°1249/2008 (Commission européenne, 2008d; Union Européenne, 2013)
Taureau	B	Mâle non castré > 24 mois	Poids/Conformation/engraissement	
Bœuf	C	Mâle castré >12 mois	Poids/Conformation/engraissement	
Vache	D	Femelle ayant déjà vêlé	Poids/Conformation/engraissement	
Génisse	E	Femelle >12 mois n'ayant pas vêlé	Poids/Conformation/engraissement	
Jeune bovin	Za (male) Zb (Femelle)	Animal <8-12 mois	Poids/Conformation/engraissement	
Veau				
Veau	V	Animaux < 8 mois	Poids/Conformation/engraissement/couleur	Règlements UE n°1308/2013, CE n°1249/2008 et Règlement délégué (UE) n°2017/1182 Annexe III) (Commission européenne, 2017)
Ovins				
Mouton	S	Ovin > 12 mois	Poids/Conformation/engraissement	Règlement (UE) n°1308/2013 : annexe IV, C, II et III ; et règlement (CE) n°1249/2008
Agneau	L	Ovin < 12 mois	Poids/Conformation/engraissement Couleur pour agneaux <13Kg	
Porcins				
Porc			Poids/Taux de muscle des Pièces (TMP)	Règlement (UE) n°1308/2013 : art. 10 - annexe IV, B, II
Volaille				
Volaille			Espèce/poids	
Produits de la mer et poissons d'élevage				
Poisson			Poids/dénomination commerciale, méthode de production	Règlement (EU) n°1379/2013 (Commission européenne, 2003b)

A ces critères de classement imposés par la législation européenne, viennent s'ajouter des critères supplémentaires imposés au sein des états membres. A titre d'exemple, en France, la couleur de la viande est un critère de classement supplémentaire chez les agneaux dont le poids de carcasse est inférieur à 13 kg (*cf.* Règlement délégué (UE) n°2017/1182 Annexe III ; (Commission européenne, 2017)). La France n'a pas retenu la classe S du classement européen des carcasses d'agneau qui est en application dans les autres états membres pour différencier les animaux de type culard. Dans l'UE, le classement est obligatoire dans les abattoirs de plus de 200 porcs/semaine. En France, les grilles de classement communautaire sont appliquées à tous les abattoirs (Décret n°94-808 : art. 5 ; Règlement CE n°1249/2008 : art. 20). De plus, en France le choix a été fait d'évaluer le classement des porcs selon le taux de muscles des pièces (TMP) : longes, jambon, épaule et poitrine.

On peut également citer la catégorie supplémentaire « agneaux de lait » qui vient s'ajouter en France, Espagne, Grèce et Italie aux deux catégories conventionnelles ovines précitées. En France, l'agneau de lait est défini par les organisations interprofessionnelles comme un agneau de moins de 90 jours essentiellement nourri à base de lait maternel. Elle comprend l'agneau « lechal » de 3 semaines (poids de carcasse voisin de 5,6 kg), principalement consommé en Espagne, l'agneau de lait de 5 à 8 semaines (poids de carcasse voisin de 7à 8 kg) consommé surtout en Grèce (aussi un peu en Aquitaine en France) et l'agneau de lait « laiton », de 8 à 11 semaines (12 kg de carcasse et plus), tel que défini dans plusieurs labels du sud de la France (Arranz *et al.*, 2016 ; Sanudo *et al.*, 2007).

En France, la couleur et la fermeté du gras de couverture sont pris en compte dans la cotation des carcasses d'ovins. Les grilles de notation de la couleur et de la fermeté des gras contiennent chacune 4 classes (identifiée de 1, gras blanc à 4, gras coloré).

Elles ont été mises au point par l'Institut de l'élevage en 1997 et 2000 respectivement. Seules les notes 3 et 4 déprécient la carcasse

.

Note	1	2	3	4
couleur	Gras blanc sur la totalité de la carcasse	Gras très légèrement coloré sur une partie de la carcasse	Gras coloré sur toute la surface ou plus fortement coloré sur une partie de la surface de la carcasse	Gras fortement coloré sur l'ensemble de la carcasse
fermeté	Gras très ferme	Gras ferme	Gras mou	Gras très mou et huileux

A ces critères européens et nationaux, peuvent être ajoutés des critères supplémentaires pour satisfaire aux cahiers des charges de filières spécifiques. Par exemple, le type génétique des bovins est pris en compte dans le cadre de l'appréciation de la valeur commerciale des carcasses commercialisées au sein de l'association UNEBIO centre-est.

Dans la filière porc, la valeur des jambons frais est généralement soumise à un cahier des charges établi par l'entreprise qui va transformer le produit. Le pH du jambon frais est souvent un critère qui va déterminer son prix car il affecte le rendement de cuisson (voir propriétés technologiques).

D'une façon générale, en Europe, la valeur commerciale des carcasses est basée sur des critères de rendement, qui satisfont le producteur et le transformateur, et peu sur des critères de qualités organoleptiques qui concernent le consommateur.

Dans certains pays (Australie, USA, Corée, Japon), une note est également attribuée au marbré (ou persillé) du muscle qui reflète le taux et de la distribution du gras intramusculaire, principal critère de la flaveur des viandes (voir propriétés sensorielles). Un système de classement plus complexe est en application en Australie pour les bovins, et dans une moindre mesure les ovins (*Meat Standard Australia*[10]). Ce système prend en compte des marqueurs de qualité supplémentaires comme le type génétique, l'âge des animaux, la vitesse de croissance, le mode de suspension des carcasses lors de leur refroidissement, la densité d'ossification (à relier à l'âge ou à la maturité de l'animal), le diamètre de la section transversale du muscle *longissimus dorsi* (noix de côte) son persillé, sa couleur et son pH, ainsi que la durée de maturation. L'épaisseur et la couleur des gras intermusculaires rentrent également dans les critères de classement. Le mode de cuisson approprié est également pris en compte dans le système de classement MSA pour prédire la qualité de la viande prête à consommer.

La viande est ainsi étiquetée selon 4 niveaux de qualité (Non satisfaisant, consommation courante, qualité supérieure, produit premium) selon un score allant de 0 à 100 (Dikeman, 2017). Ce système a été partiellement transposé à la filière ovine (Pannier *et al.*, 2018).

Une description détaillée du système MSA et une analyse relative à sa transposition en Europe sont disponible en annexe de ce chapitre.

Méthode de mesure et d'appréciation des critères commerciaux

- **<u>Evaluation du rendement en viande et état d'engraissement</u>**

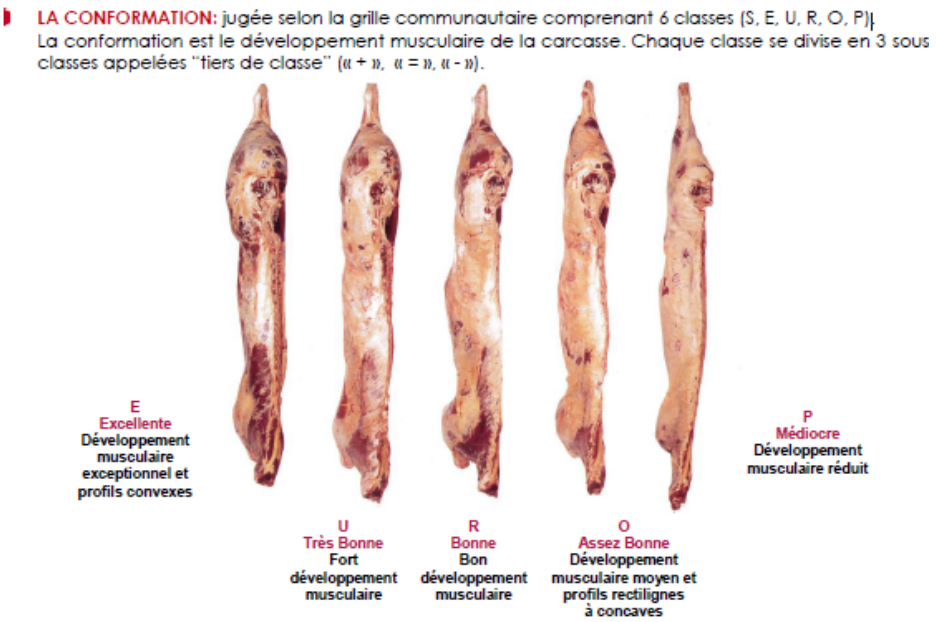
Les carcasses de **veaux, gros bovins** et d'**ovins** sont classées selon leur conformation (musculature), leur état d'engraissement (couverture de graisse sous-cutanée) et/ou leur couleur (cf. rubrique couleur), visuellement par des experts habilités ou instrumentalement par un équipement adapté. Le règlement (CE) n°1249/2008 précise également que le classement est opéré pour les gros bovins par des classificateurs qualifiés ayant obtenu une licence à cette fin (art. 8) et pour les ovins par des classificateurs suffisamment qualifiés (art. 31) (Commission européenne, 2008d). La conformation est jugée selon la grille communautaire comprenant 6 classes (E, U, R, O, P, et la classe S pour les animaux culards hypertrophiés) (FranceAgriMer, 2016). L'article 4 du décret n°94-808 (République Française, 1994) précise que l'exécution des opérations

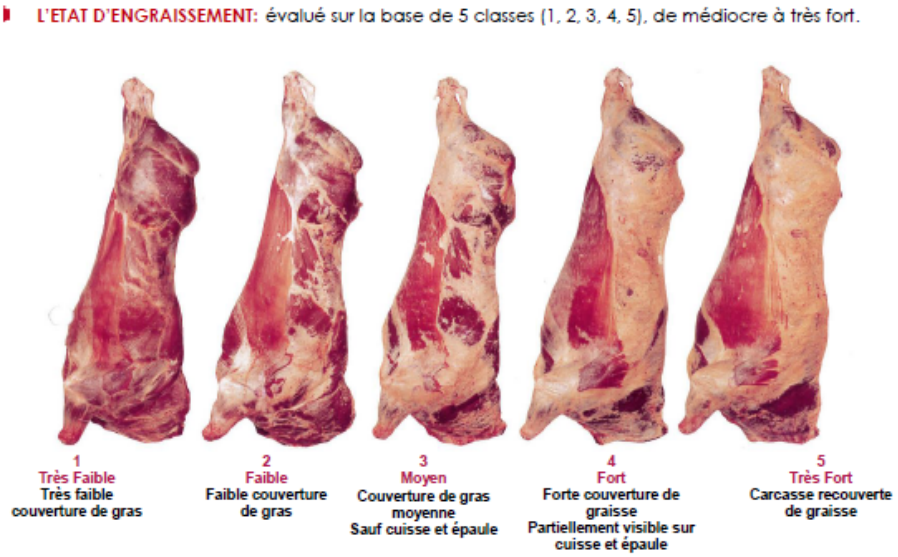
[10] https://www.mla. com.au/marketing-beef-and-lamb/meat-standards-australia/ [consulté le 23/02/2020]

de pesage, classement et marquage est confiée à des personnels qualifiés inscrits, en considération de leur formation ou de leur expérience professionnelle, sur une liste établie par le directeur général de FranceAgriMer. Le classement peut être apprécié au 1/3 de classe, ce qui conduit à 18 niveaux pour la conformation et 15 pour l'état d'engraissement.

L'état d'engraissement est également apprécié visuellement sur la quantité de gras à l'extérieur de la carcasse et sur la face interne de la cage thoracique. La grille communautaire prévoit 5 classes d'état d'engraissement, 1 : très faible, 2 : faible, 3 : moyen, 4 : fort, 5, très fort (Commission européenne, 2008d; 2013).

Le classement peut être réalisé par des machines à classer , basées sur une technologie d'analyse d'images, sur autorisation des Etats Membres (Règlement (CE) n°1249/2008 : art. 9 et 10) (Commission européenne, 2008d). La Machine à classer (MAC) est un outil d'aide à la décision, qui est mis à la disposition du classificateur. Cette MAC propose au classificateur un classement au tiers de classe en conformation et à la classe entière en engraissement. Le classificateur a la possibilité de valider ou d'invalider ce classement proposé ; il reste responsable du classement retenu. En France, dans un souci d'harmonisation, l'Interprofession a souhaité que tous les sites d'abattage de plus de 3 000 tonnes de gros bovins par an soient équipés de MAC (Accord interprofessionnel sur le classement, le marquage, la pesée et la présentation des carcasses des bovins de plus de 8 mois ainsi que la circulation des informations d'abattage du 30 juin 2010 étendu par l'arrêté du 1er septembre 2010) (République Française, 2010a).





Chez le **porc**, la moindre hétérogénéité des animaux et la cadence d'abattage élevée a conduit à élaborer un autre moyen d'évaluation de la qualité commerciale. La teneur en viande maigre (TVM) (Règlement (UE) n°1308/2013 : art. 10 - annexe IV, B, II) est définie comme le % de muscle dans la longe, le jambon, l'épaule et la poitrine, critère appelé TMP (taux de muscle des pièces) en France (Daumas, 2008; Union Européenne, 2013). Le TMP est évaluée à partir du poids de carcasse et de la mesure d'épaisseur de trames grasses et de muscle.

Le TMP est déterminé par une méthode de classement qui doit être préalablement autorisée par la Commission européenne sur la base d'un protocole de calcul des équations permettant d'évaluer le TMP ou TVM (échantillonnage de porcs représentatifs du cheptel national et méthode statistique reconnue). Règlement n°1308/2013 : annexe IV, B, IV ; Règlement (CE) n°1249/2008 : art. 23 (Commission européenne, 2008d; 2013).

A ce jour, en France, 7 méthodes de classement sont autorisées (*cf.* ci-dessous). Cependant seulement 3 sont actuellement utilisées : une méthode manuelle ZP (décrite ci-dessous) ainsi que 2 méthodes automatiques : le CGM (sonde spectrophotométrique) et l'Image-meater (méthode visionique). Les abattoirs dont l'activité d'abattage est supérieure à 200 porcs/semaine doivent utiliser une méthode de classement automatique (Décision 2006/784/CE modifiée : art. 1) (Commission européenne, 2007a).

- **Méthode manuelle : méthode ZP (Zwei Punkt) :**

Cette méthode est mise en œuvre à l'aide d'une réglette qui permet de lire directement le TMP sur la carcasse. Son principe est fondé sur la mesure manuelle sur la fente de l'épaisseur de gras et de muscle.

- **Méthodes automatiques pouvant être utilisées dans les abattoirs dont l'activité d'abattage est supérieure à 200 porcs/semaine :**

  - **Le C.G.M.** (capteur Gras/Maigre - Sydel) utilise le principe de l'endoscopie ; la réflectance lumineuse est mesurée après piqûre de la carcasse en introduisant une sonde à un emplacement défini de la carcasse (Décision 2006/784/CE modifiée par la décision 2008/677/CE) (Commission européenne, 2008b)).
  - **l'Ultra-Meater** (société CSB) utilise le principe de l'échographie en appliquant l'appareil sur la carcasse en un emplacement défini (Décision 2006/784/CE modifiée) (Commission européenne, 2007a)).
  - **l'Autofom** (société SFK), appareil équipé de 16 transducteurs à ultrasons. Les données ultrasonores de l'épaisseur de lard dorsal et de l'épaisseur de muscle sont converties en estimation de viande maigre (Décision 2007/510/CE, (2007a)).
  - **l'Ultrafom 300** (société SFK), appareil équipé d'une sonde à ultrasons qui mesure les épaisseurs de gras et de muscle en un point précis de la carcasse (Décision 2007/510/CE, Commission européenne, 2007a).
  - **Le VCS 2000** (société E+V) est une méthode de classement basée sur une analyse d'images (Décision 2008/293/CE) (Commission européenne, 2008a)).
  - **Le CSB Image-Meater** (société CSB) est une méthode de classement basée sur une analyse d'images. L'appareil CSB Image-Meater est constitué d'une caméra vidéo, d'un PC équipé d'une carte d'analyse d'image, d'un écran, d'une imprimante, d'un mécanisme de commande, d'un mécanisme de coordination de la vitesse et des interfaces. Les quatre variables de l'appareil sont mesurées et converties en estimation du pourcentage de viande maigre par une unité centrale (Décision 2008/293/CE et décision 2013/282/UE) (Commission européenne, 2008a ; 2013)).

Toutes ces méthodes de classement automatiques sont valables pour des carcasses de porcs ayant un poids compris entre 45 et 125 kg. Les grilles de classement sont définies par le règlement (UE) n°1308/2013 du parlement européen et du Conseil du 17 décembre 2013 : article 10, annexe V, B, II (Union européenne, 2013). Le classement des carcasses de porcs doit être effectué par des classificateurs dont la qualification est validée par le directeur de FranceAgriMer (FranceAgriMer, 2016).

Classes	Viande maigre en pourcentage du poids de la carcasse
S	60 ou plus
E	55 ou plus mais moins de 60
U	50 ou plus mais moins de 55
R	45 ou plus mais moins de 50
O	40 ou plus mais moins de 45
P	moins de 40

- **Couleur de la viande et du gras**

Sur le plan réglementaire, la couleur de la viande de veau et d'agneau et du gras est appréciée visuellement, par du personnel qualifié et habilité, sur des zones anatomiques bien précises de la carcasse à l'aide de nuanciers. A titre d'exemple, la couleur de la viande de veau est appréciée sur le flanc au niveau de la bavette de flanchet à l'aide d'un nuancier composé des 5 classes de couleur, annexé à l'arrêté du 20 décembre 2010 (République Française, 2010b).

Le principe est identique pour l'appréciation de la couleur du gras. Par exemple, pour les agneaux de moins de 13 kg, la couleur du gras d'ovin est également appréciée visuellement mais selon 4 classes (identifiées de 1, gras blanc à 4, gras coloré). L'appréciation se fait obligatoirement sur carcasse froide, au moins 12 h après abattage[11].

Grille de classement des carcasses d'agneaux dont le poids de la carcasse est inférieur à 13 kilogrammes visés à l'article 3, paragraphe 2

Catégorie	A		B		C	
Poids	≤ 7 kg		7,1 — 10 kg		10,1 — 13 kg	
Qualité	1re	2e	1re	2e	1re	2e
Couleur de la viande (*1)	Rose clair	Autre couleur ou teneur en graisse	Rose clair ou rose	Autre couleur ou teneur en graisse	Rose clair ou rose	Autre couleur ou teneur en graisse
Classe d'état d'engraissement (*2)	(2) (3)		(2) (3)		(2) (3)	

(*1) Déterminée sur les flancs au niveau du muscle droit de l'abdomen *(rectus abdominis)*, à l'aide d'un nuancier standardisé.

(*2) Défini à l'annexe IV, point C.III, du règlement (UE) n° 1308/2013.

Pour les volailles, la qualité commerciale dépend du poids vif à l'abattage (élimination des animaux cachectiques), **du rendement carcasse PAC** (Prêt à cuire) qui correspond au rapport entre le poids de la carcasse saignée, plumée et éviscérée et le poids vif **et de l'aspect de la carcasse** (absence de défauts visuels tels que les griffures, les lésions cutanées, les ampoules au bréchet, les hématomes, les fractures, les pododermatites…).

Le rendement PAC est estimé par lot (1 lot = 1 élevage), l'éleveur ayant fourni le poids moyen des animaux du lot et l'abattoir ayant pesé la totalité des carcasses. Des catégories de poids sont ensuite définies par l'abattoir pour la commercialisation.

[11] http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/divers-fiches-idele-ciirpo.html (consulté le 23/01/2020)

L'aspect de la carcasse est soit évalué visuellement par un opérateur entraîné soit par des analyses d'images vidéo qui vont décider ensuite du retrait ou non des carcasses.

Poissons

Critère d'appréciation de la valeur commerciale des poissons

Les critères d'appréciation commerciale du poisson sont différents de ceux de la viande des animaux terrestres. Le nom générique de « poissons » recouvre une très grande variété de genres et d'espèces vivant dans des milieux qui peuvent être très différents. Le terme de « poissons » regroupe également des produits de la pêche, animaux sauvages issus du milieu naturel, et des produits piscicoles, animaux issus d'une filière de production dont on peut assurer la traçabilité sur une partie voire l'ensemble de son cycle de production (origine génétique, alimentation, conditions de production, fraicheur).

Les dénominations commerciales des produits de la mer et d'eau douce admises en France, conformément à la réglementation communautaire (règlement (EU) n°1379/2013), mentionnent le nom scientifique de chaque espèce et sa dénomination commerciale (Commission européenne, 2003b). La présente expertise ne concerne que les poissons issus de pisciculture, et se limite, parmi eux, aux principales espèces produites en Europe.

L'étiquetage des produits de la mer doit obligatoirement mentionner la **dénomination commerciale**, le **nom scientifique**, la **méthode de production** : « pêché », « pêché en eaux douces » ou « élevé », la **zone de pêche ou le pays d'élevage**. Pour les poissons d'aquaculture, le pays d'élevage correspond au pays dans lequel « le produit a atteint plus de la moitié de son poids final ou est resté plus de la moitié de la période d'élevage.

La cotation commerciale des produits de la mer est relative à la dénomination commerciale et au poids[12]. D'autres critères non réglementaires peuvent être pris en compte dans les échanges commerciaux comme le format des poissons et la régularité d'approvisionnement. La diversité des espèces produites, en termes de taille, morphologie, aspect, conduit à des produits variés. Ainsi pour certaines espèces dont la famille des salmonidés (truites, saumon), la commercialisation, de la même manière que pour les animaux terrestres, peut être faite sous différentes formes, fraiche (entier, darne, pavé, filet…), transformée (fumé, séché, mariné, produits traiteur…) ou en conserves et plats cuisinés.

Méthode de mesure et d'appréciation des critères commerciaux

Comme pour d'autres produits animaux, le marché exige une certaine calibration pour la commercialisation. On peut par exemple observer chez la truite arc-en-ciel, principale espèce produite en France, trois tailles de commercialisation : la truite portion (≈250 g, < 1 an), la truite à filet (≈500 g) et la grande truite (≈1-3 kg, ≈ 2 ans) destinée au fumage. L'adéquation du produit à ces exigences s'effectue par des tris des animaux, au départ de la pisciculture, avant commercialisation

Lait

Le lait a été défini de façon officielle dès 1908 lors du premier Congrès International pour la Répression des Fraudes alimentaires et pharmaceutiques comme « le produit intégral de la traite complète et ininterrompue d'une femelle laitière bien portante, bien nourrie et non surmenée ». Depuis 1987, en Europe, la dénomination « lait » est réservée « exclusivement au produit de la sécrétion mammaire normale obtenue par une ou plusieurs traites sans aucune addition ou soustraction » (République Française, 1987). Le lait produit pendant les sept premiers jours de lactation (ou colostrum) et les laits issus d'animaux recevant ou ayant reçu récemment des traitements médicamenteux ne sont pas commercialisables.

Critère d'appréciation de la valeur commerciale du lait

En France, le lait est payé en fonction de sa qualité bactériologique et de sa composition depuis la loi Godefroy (1969). Les textes pris en application de cette loi définissent notamment les critères devant obligatoirement être pris en compte dans la détermination du prix des laits de vache, de chèvre et de brebis, et les modalités de mise en œuvre de ces critères. La qualité du lait répond à des exigences en matière d'hygiène et de sécurité alimentaire définies dans une règlementation

[12] https://rnm.franceagrimer.fr/prix?POISSONS&12MOIS [consulté le 23/01/2020]

européenne, appelée « Paquet Hygiène ». La règlementation en vigueur en France est régie par le décret n°2012-1250 du 9 novembre 2012 complété par la note de service DGAL/SDSSA/2014-599 (21 juillet 2014)[13] qui présente le dispositif relatif au paiement du lait en fonction de sa composition et de sa qualité hygiénique et sanitaire et les obligations relatives à la gestion des paramètres sanitaires du lait cru (République Française, 2002)

Il convient de distinguer deux types de critères pris en compte pour le paiement du lait :

– les critères obligatoires, à prendre en compte nécessairement, qui se subdivisent en « critères sanitaires », définis dans le règlement (CE) n°853/2004 (germes à 30°C, cellules somatiques (lait de vache uniquement) et la présence éventuelle de résidus d'antibiotiques) et en critères relatifs à la composition du lait (matières grasses, matières protéiques ; et, pour les vaches uniquement, point de congélation (qui permet de déceler la présence anormale d'eau dans le lait) (Commission européenne, 2004a).

– les « critères facultatifs », qui peuvent également entrer dans le paiement du lait sont le nombre des spores butyriques, de staphylocoques à coagulase positive, des coliformes à 30°C, des coliformes thermotolérants, des *Escherichia coli*, des pseudomonas, des Entérobactéries, des levures et des moisissures ; l'indice de lipolyse, la lactofermentation ; l'absence d'inhibiteurs, de *Listeria monocytogenes*, de *Salmonella spp* ; le pH, l'acidité Dornic ; la composition en acides gras, en fractions azotées ; la teneur en lactose et en immunoglobulines G1 et lorsque le lait est susceptible d'être utilisé pour la fabrication d'un produit laitier bénéficiant d'un signe d'identification de la qualité et de l'origine, le respect des conditions prévues dans le cahier des charges de ce signe

Actuellement, les prélèvements de lait pour les analyses sont réalisés lors de la collecte après une durée de conservation à la ferme inférieure à 72 h. Les teneurs en matières grasse et protéiques, le point de congélation, la teneur en cellules somatique et les résidus d'antibiotiques sont analysés 1 fois par semaine (à raison d'au moins 1 fois par décade) et les germes à 30°C sont dénombrés au moins deux fois par mois.

Des fréquences d'analyses minimales sont définies pour les critères obligatoires. Pour les critères sanitaires, les fréquences sont les suivantes :

Critère	Nombre minimal d'analyses par producteur
Germes à 30°C	2 par mois
Cellules somatiques (*)	1 par mois
Résidus d'antibiotiques	3 par mois pour les vaches et les chèvres, 1 par mois pour les brebis.

(*) pour le lait de vache uniquement.

(Extrait de la note de service DGAL/SDSSA/2014-599 du 21/07/2014)[14]

Le dépassement de seuils pour les critères sanitaires obligatoires peut donner lieu à des arrêts de collecte selon des modalités qui sont définies dans des accords interprofessionnels homologués par arrêté ministériel. Par exemple, pour le lait de vache, deux accords interprofessionnels nationaux relatifs aux critères sanitaires sont homologués, l'un relatif à l'application de la réglementation pour les germes et les cellules somatiques lors de la collecte à l'exploitation, le second relatif à la présence de résidus d'antibiotiques et aux modalités de prise en charge des coûts liés à la destruction des laits détectés positifs.

Pour les germes, la collecte du lait est suspendue pour une durée de 12 jours si le lait d'un producteur présente une première moyenne géométrique bimestrielle supérieure à 100 000 germes par ml (alerte), non suivie d'un retour en conformité dans les trois mois qui suivent l'information donnée au producteur. A l'issue de la suspension de 12 jours, la collecte reprend normalement et si les résultats suivants sont de nouveau hors normes, la collecte est suspendue pour une durée indéterminée de 30 jours minimum. Pour les laits de brebis et de chèvre, les seuils retenus pour la moyenne géométrique bimestrielle sont

[13] Dispositif national de paiement du lait en fonction de sa composition et de sa qualité et gestion des paramètres sanitaires du lait : https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2014-599/telechargement [consulté le 24/01/2020]
[14] Dispositif national de paiement du lait en fonction de sa composition et de sa qualité et gestion des paramètres sanitaires du lait : https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2014-599/telechargement (consulté le 24/01/2020)

de 500 000 germes par ml si le lait est destiné à la fabrication de produits au lait cru, ou de 1 500 000 germes par ml si le lait est destiné à la fabrication de produits au lait pasteurisé.

Pour les cellules, une situation hors norme se caractérise par un lait présentant une première moyenne géométrique trimestrielle supérieure à 400 000 cellules par ml (bilan 1), non suivie d'un retour en conformité dans les trois mois (bilan 2) qui suivent l'information donnée au producteur. Le producteur dont le lait se trouve en situation hors norme à l'issue du délai de trois mois après l'alerte (bilan 2) a la possibilité de s'engager dans un plan d'actions correctives (« plan cellules ») et de réaliser des actions correctives qui lui permettent de déroger pendant 6 mois à la suspension de collecte. Le « plan cellules » est un accompagnement du producteur qui est à sa charge. Les durées de suspension de collecte sont de 6 jours, puis de nouveau 6 jours et enfin la collecte est suspendue pour une durée indéterminée si le problème persiste.

Pour les « résidus d'antibiotiques », des tests rapides réalisés sur des échantillons de lait de citerne permettent de détecter les échantillons positifs qui ont alors l'objet d'un test de dépistage. Si ce test est positif, les échantillons de lait de citerne et des laits individuels des producteurs collectés dans la citerne sont analysés par un laboratoire reconnu (test de dépistage et test de confirmation qui détectent à minima les tétracyclines et les béta-lactamines) qui identifie le ou les producteurs responsables de la positivité. Dans ce cas, le collecteur a la responsabilité de détruire la citerne ou, si le lait a déjà été mis en œuvre, les produits laitiers qui sont élaborés ne doivent pas être mis sur le marché et doivent être détruits.

Méthodes de mesure et d'appréciation des critères commerciaux

Les analyses destinées aux paiements du lait à la qualité sont réalisées par des laboratoires qui doivent être accrédités et reconnus. La liste des laboratoires reconnus est disponible sur le site internet du ministère en charge de l'Agriculture[15].

Ces laboratoires mettent en œuvre des méthodes d'analyse officielles reconnues par le ministère pour le paiement du lait à la qualité. Les déterminations des taux de matières grasses et protéiques sont réalisées couramment par la spectrométrie dans le moyen infra rouge, les comptages de cellules somatiques par épifluorescence, les dénombrements de la microflore par cytométrie de flux… La liste des méthodes officielles reconnues pour le paiement du lait à la qualité est disponible sur le site du ministère en charge de l'Agriculture. Elles sont décrites dans les tableaux suivants.

[15] https://agriculture.gouv.fr/laboratoires-agrees-et-reconnus-methodes-officielles-en-alimentation (consulté le 24/01/2020)

PAIEMENT DU LAIT – liste des méthodes officielles

Liste des méthodes d'analyses utilisées pour la détermination des critères sanitaires définis dans le règlement (CE) n°853/2004*					
Objet	**Caractéristique mesurée ou recherchée**	**Type d'analyse**	**Principe de la méthode**	**Référence de la méthode**	**Commentaires**
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Micro-organismes (germes totaux)	microbiologique	Dénombrement des colonies à 30°C	NF EN ISO 4833-1	Méthode de référence
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Micro-organismes (germes totaux)	microbiologique	Dénombrement des colonies à 30°C par la méthode Thompson	Protocole CNIEL GTTH dans sa version en vigueur	Méthode de routine
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Micro-organismes (germes totaux)	microbiologique	Comptage instantané d'UFC	Protocole CNIEL GTBC dans sa version en vigueur	Méthode de routine
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Cellules somatiques	biochimique	Dénombrement par comptage instantané en méthode fluoro-opto électronique	Protocole CNIEL PROC CE dans sa version en vigueur[1] et selon la norme NF EN ISO 13366-2	Méthode de routine
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Résidus d'inhibiteurs et d'antibiotiques	microbiologique	Acidification sur gélose utilisant *Bacillus stearothermophilus*	Protocole CNIEL INHD dans sa version en vigueur et selon la note d'information en vigueur du ministère chargé de l'agriculture	Méthode prise en référence (dépistage)
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Résidus d'antibiotiques	biochimique	Tests immuno-chromatographiques	Protocole CNIEL ATBC dans sa version en vigueur et selon la note d'information en vigueur du ministère chargé de l'agriculture	Méthode prise en référence (confirmation)

*Les critères sanitaires définis dans le règlement (CE) n°853/2004 sont également utilisés dans le cadre du dispositif du paiement du lait en fonction de sa qualité sanitaire.

CNIEL : Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière

Source : https://agriculture.gouv.fr/telecharger/43984?token=afa2cdeb5757204d021bdb28d0c7d91b [Consulté le 24/01/2020]

Liste des méthodes d'analyses utilisées dans le cadre du dispositif du paiement du lait en fonction de sa composition et de sa qualité hygiénique					
Objet	**Caractéristique mesurée ou recherchée**	**Type d'analyse**	**Principe de la méthode**	**Référence de la méthode**	**Commentaires**
Lait cru (vache, chèvre)	Détermination de la teneur en matière grasse	Physico-chimique	Méthode acido-butyrométrique	Norme AFNOR NF V04-210	Méthode prise en référence
Lait cru (brebis)	Détermination de la teneur en matière grasse	Physico-chimique	Méthode acido-butyrométrique	Norme AFNOR NF V04-155	Méthode prise en référence
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Détermination de la teneur en matière grasse	Physico-chimique	Spectrométrie moyen infrarouge (filtres ou IRTF)	Protocole CNIEL PROC IR dans sa version en vigueur, selon la norme NF ISO 9622	Méthode de routine
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Détermination de la teneur en protéines	Physico-chimique	Complexométrie (Méthode au Noir amido) Spectrométrie UV/visible	Norme AFNOR NF V04-216	Méthode prise en référence
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Détermination de la teneur en protéines	Physico-chimique	Spectrométrie moyen infrarouge (filtres ou IRTF)	Protocole CNIEL PROC IR dans sa version en vigueur, selon la norme NF ISO 9622	Méthode de routine
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Détermination du point de congélation	Physico-chimique	Spectrométrie moyen infrarouge (filtres ou IRTF) avec ou sans conductimétrie	Protocole CNIEL PROC CRIR dans sa version en vigueur	Méthode de routine (méthode de tri)
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Détermination du point de congélation	Physico-chimique	Cryoscopie à thermistance	Norme NF EN ISO 5764 (sauf dosage de l'acidité titrable)	Méthode de référence (confirmation)
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Détermination de l'indice de lipolyse	Physico-chimique	Spectrophotométrie (savons de cuivre)	Protocole CNIEL LIPO dans sa version en vigueur[2]	Méthode de routine et prise en référence
Lait cru (vache)	Détermination de l'indice de lipolyse	Physico-chimique	Spectrométrie moyen infrarouge (IRTF)	Protocole CNIEL LIPO IR dans sa version en vigueur	Méthode de routine
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Immunoglobulines gamma 1	biochimique	Immunodiffusion radiale	D'après D. Levieux 1991	Méthode prise en référence
Lait cru (vache, chèvre, brebis)	Spores butyriques (Clostridia)	microbiologique	Détermination du nombre le plus probable (NPP)	Protocole CNIEL BUTY dans sa version en vigueur	Méthode prise en référence

[2] Utilisation d'Echantillon à Teneur Garantie dont les valeurs sont déterminées par la méthode BDI FIL N°265/1991

Source :https://agriculture.gouv.fr/telecharger/43984?token=afa2cdeb5757204d021bdb28d0c7d91b [Cconsulté le 24/01/2020]

Œufs

L'**œuf** est un produit agricole issu d'élevages divers, utilisé comme aliment sous sa forme primaire ou sous forme d'ingrédient. Au moins 95 % des œufs proviennent de poules (*Gallus gallus*). Les œufs du commerce provenant majoritairement d'élevages industriels ne sont pas fécondés.

Critère d'appréciation de la valeur commerciale des œufs

Les œufs sont triés en 3 catégories selon leurs défauts et aspects (Figure 1-9). Les œufs de **Catégorie A** constitueront les œufs de consommation (œuf coquille), la **catégorie B** constitués d'œufs de 2ème qualité ou d'œufs « conservés », qui ne respectent plus les critères de qualité A. Ils peuvent être fêlées ou sales mais ni cassés ni incubés et seront uniquement destinés au circuit des ovoproduits pasteurisés. Les œufs de **catégorie C ou œufs industriels** sont des œufs déclassés ne respectant pas les critères A ou B. Ils seront valorisés pour l'alimentation des animaux domestiques.

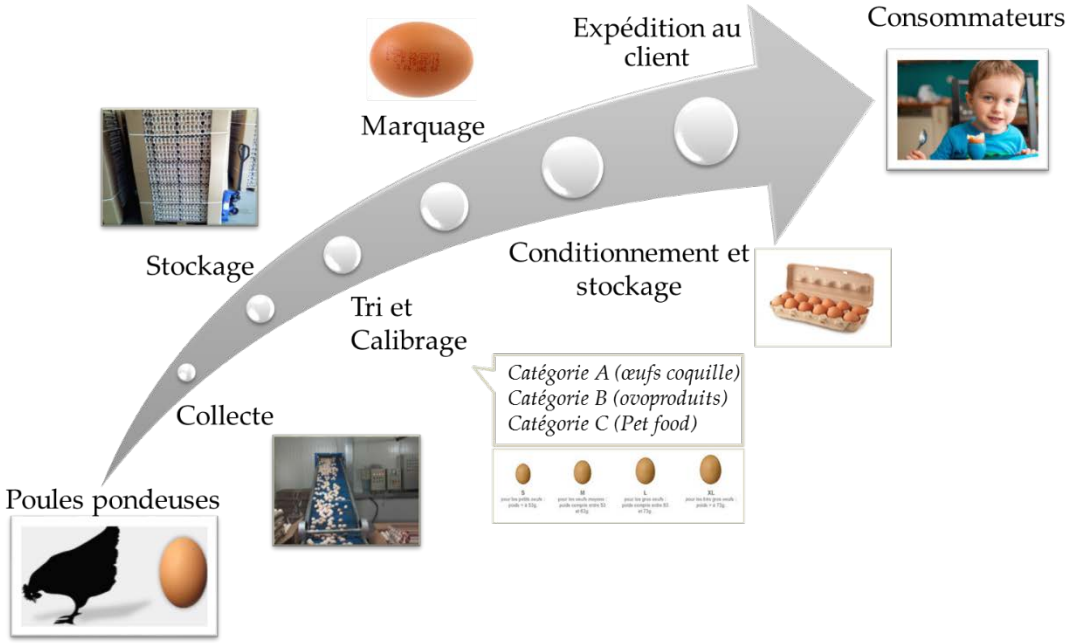


Figure 1-9 : Le parcours de l'œuf de la ponte au consommateur (Rehault-Godbert, 2017)

Seuls les œufs de **Catégorie A** peuvent être commercialisés en tant qu'œuf de consommation (œuf coquille). Du jour de ponte jusqu'au jour 9, les œufs sont dits « extra-frais ». Du 10ème jour jusqu'au jour 28, les œufs sont dits « frais ». Après 28 jours, les œufs ne sont plus commercialisables. La coquille et la cuticule doivent être propres, intactes et de forme normale. La chambre à air doit présenter une hauteur ne dépassant pas 6 mm. Toutefois, pour les œufs commercialisés sous la mention « extra-frais », elle ne doit pas dépasser 4 mm. Le jaune doit être visible au mirage sous forme d'ombre seulement, sans contour apparent. Lorsqu'on le fait tourner, l'œuf doit être légèrement mobile et revenir à une position centrale. Le blanc doit être clair et translucide, le développement du germe imperceptible et la présence de substances et odeurs étrangères ne sont pas tolérées. **Il est interdit de laver et de nettoyer les œufs de catégorie A, avant et après le tri.**

Un autre critère de commercialisation est la **couleur de la coquille**. En France, les œufs de consommation sont uniquement des œufs bruns, alors qu'à l'échelle mondiale, les œufs blancs sont également consommés. Cette différence de couleur est uniquement génétique et n'affecte pas le goût et les caractéristiques de œufs, mais elle est un critère essentiel de sa commercialisation.

Au niveau du centre de tri, les œufs seront calibrés afin d'orienter leur destination (Figure 1-10). Le **poids de l'œuf** varie du fait de l'âge de la poule, de moins de 50 g (très jeunes poules) à plus de 80 g (poules très âgées). Les œufs vendus entiers comme œufs de table sont triés en quatre groupes. Le groupe S concerne les petits œufs de 45 à 53 g, le groupe des œufs moyens (M) comprend les œufs de 53 à 6 g, les gros œufs (L) pèsent de 63 à 73 g et les très gros (XL) sont supérieurs à 73 g.

Les groupes M et L sont les 2 groupes majoritairement vendus en œufs coquille car ils correspondent aux besoins du consommateur. Les autres groupes servent majoritairement pour obtenir des ovoproduits.

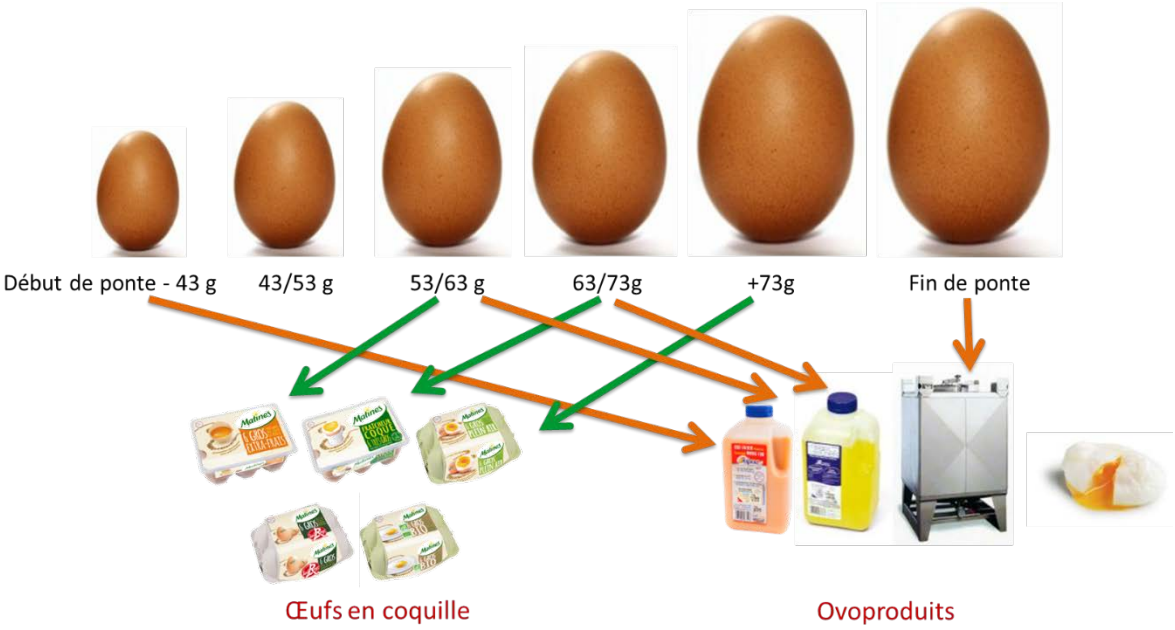


Figure 1-10 : Quels œufs pour quelles utilisations ? (Source : Nys – communication personnelle)

Méthodes de mesure et d'appréciation des critères commerciaux

Au niveau du centre de tri, les œufs arrivent sur des tapis. L'aspect général de l'œuf est vérifié pour éliminer les œufs sales, cassés et/ou micro fêlés. Les œufs sont pesés et mis en boîtes selon leurs calibres. Ces opérations peuvent être faites par des opérateurs ou à l'aide de systèmes optimisés comprenant des caméras pour l'aspect visuel. Pour détecter les œufs fêlés, plusieurs systèmes existent :

- les œufs sont illuminés au travers de la coquille de manière à visualiser les fractures et les œufs cassés sont éliminés manuellement.
- Les centres de tri importants ont des systèmes automatisés. Il s'agit de 4 légers impacts non destructifs faits à différents endroits de la coquille avec un marteau comme ceux utilisés pour les pianos. La fréquence acoustique de ces impacts est analysée et si elle est la même à tous les endroits, c'est que l'œuf est intact et donc propre à la consommation. Un ordinateur gère un robot qui collecte les œufs fêlés et donc déclassés qui sont retirés par des ventouses pour ne pas rentrer dans le circuit de commercialisation.
- Lors du tri des œufs sales et fêlés, les œufs sont pesés directement lors de leur passage et un système robotisé viendra les prélever avec des ventouses pour les répartir directement dans les boites en fonction des calibres ou sur des plateaux à œufs si les œufs sont destinés aux ovoproduits.

Analyse critique des méthodes d'appréciation des qualités commerciales

Points forts	Points faibles
Réglementations mises en place pour faciliter les échanges commerciaux	**Viande** : critères essentiellement basés sur le **rendement et la productivité** en négligeant les autres volets de la qualité. **Lait :** critères essentiellement basés sur les qualités nutritionnelles et sanitaires.

	Méthodes d'appréciations souvent **subjectives** (opérateurs de classement des carcasses). Complexité de la réglementation européenne. Multitude de dérogations Critères non obligatoires mis en place par certaines filières locales ou régionales.

Les propriétés commerciales sont dépendantes du type de produit animal considéré. Si pour le lait et les produits laitiers, elles sont basées sur la composition, et les qualités sanitaires, pour la viande elles sont essentiellement basées sur des critères de rendement, négligeant presque totalement les propriétés organoleptiques. Les filières viande semblent prendre conscience de la nécessité d'inclure des paramètres de qualité organoleptique dans le prix à payer au producteur. Néanmoins on n'en est pour l'instant qu'au stade de la réflexion avec une inspiration forte de ce qui se fait en Australie avec le système MSA. Il est peu probable qu'un tel système vienne intégralement se substituer au classement EUROP dans les prochaines années, mais certains critères de caractérisation de propriétés organoleptique comme le taux de persillé pourraient être appliqués en UE dans le futur.

Les méthodes de mesure restent subjectives avec des opérateurs qui apprécient les formes et les couleurs « à l'œil » alors que des systèmes d'imageries hyperspectrales capables d'informer sur la composition de la matière première et sur la prédiction de comportement au cours de la transformation sont en trains de voir le jour dans la sphère scientifique. Une évolution vers une caractérisation plus précises (composition, répartition des lipides…) et plus objective sur les lignes de production est à prévoir.

Conclusions – perspectives : nouvelles méthodes d'évaluation et de prédiction de la qualité

Les méthodes d'évaluation ou de prédiction des caractéristiques qualitatives des produits animaux sont en perpétuelle évolution, dans l'objectif de réduire le temps ou le coût d'analyse, d'utiliser des approches moins invasives, ou de qualifier des carcasses, pièces ou produits bruts rapidement après abattage ou collecte pour optimiser leur valorisation en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques (propriétés sensorielles, technologiques, nutritionnelles…). Différentes démarches sont menées au sein des principales filières de production animales pour développer des équations puis des outils prédictifs basés sur différents types de marqueurs biologiques (génomiques ou phénotypiques) ou physiques (spectroscopiques) (Berri *et al.*, 2019; Font-i-Furnols *et al.*, 2015b).

Concernant les marqueurs biologiques, il s'agit d'identifier puis valider des biomarqueurs *ante- ou post-mortem* de qualité en vue de prédire *in vivo* ou rapidement après abattage la qualité ultérieure des produits. Les applications potentielles sont multiples : sélection d'animaux reproducteurs pour la sélection mais aussi tri des carcasses ou des pièces à l'abattoir pour les orienter vers différents types d'utilisation : consommation en viande fraîche, ou transformation en produits cuits ou secs, pour les viandes porcines par exemple, selon leur qualité intrinsèque technologique (perte en eau, pH…) ou sensorielle (couleur, tendreté, jutosité…(Beauclercq *et al.*, 2016; Picard *et al.*, 2015 ; Te Pas *et al.*, 2011). Chez le poulet, la combinaison de données de génétique positionnelle et d'expression de gènes a permis d'identifier un gène responsable de la couleur de la viande et le développement d'un test génétique breveté (Le Bihan-Duval *et al.*, 2010) utilisable par les sélectionneurs pour maîtriser la qualité de leurs produits. Cependant, l'identification de marqueurs biologiques se heurte au déterminisme complexe des paramètres de qualité, induisant souvent un pouvoir prédictif encore limité des biomarqueurs validés, lié en partie à leur manque de généricité (certains marqueurs sont spécifiques d'un muscle donné). Toutefois, la prise en considération d'une combinaison de marqueurs pour prédire un niveau de qualité technologique ou sensoriel faible, correct ou élevé, comme proposé chez le porc (Berri *et al.*, 2016) et par ailleurs l'évolution rapide des méthodes de diagnostic vers des simplifications méthodologiques (Gagaoua *et al.*, 2018), laissent entrevoir des perspectives favorables à ces recherches. L'orientation récente vers l'identification de biomarqueurs sanguins des qualités des viandes, plus simple à mettre en œuvre, offre des premiers résultats prometteurs (Beauclercq *et al.*, 2016 ; Bonnet *et al.*, 2016 ; Theron *et al.*, 2020).

Les méthodes physiques de spectroscopie actuellement investies pour prédire la qualité des aliments exploitent des divers segments des ondes électromagnétiques incluant les radiofréquences (spectroscopie RMN) l'UV et le Visible (spectroscopie UV-Vis-fluorescence), l'infrarouge (spectroscopies de proche et moyen infrarouge), l'effet Raman (spectroscopie Raman) et les rayons X (Amigo *et al.*, 2013 ; Andueza *et al.*, 2015 ; Berri *et al.*, 2016; Damez et Clerjon, 2013 ; Nawrocka et Lamorska, 2013 ; Sun, 2009). Certaines de ces méthodes sont non destructives et rapides à mettre en œuvre (spectroscopie IR, fluorescence, Raman). Elles peuvent être mise en œuvre en ligne pour contrôler la qualité d'un produit au long de sa transformation.

Des spectromètres de proche infrarouge portables sont d'ores et déjà disponibles pour évaluer l'évolution d'un produit en cours de transformation (p. ex. maturation des fruits[16]).

La spectroscopie de proche infrarouge (SPIR) a été largement utilisée en recherche dans le but de caractériser les matières premières alimentaires et les aliments en cours de transformation (Amigo *et al.*, 2013 ; Andueza *et al.*, 2015 ; Oliveira et Franca, 2011; Sun, 2009). La SPIR a été exploitée pour caractériser tout type d'aliments : des boissons, des céréales, des fruits, des huiles, du miel, du lait et produits laitiers dont les fromages, de la chair de poisson, de la viande et des produits carnés (Amigo *et al.*, 2013 ; Bertrand et Dufour, 2006; Oliveira et Franca, 2011 ; Sun, 2009)

Dans le secteur de la viande, la SPIR a été investiguée pour prédire la composition chimique (teneurs en protéines dont le collagène, eau, lipides) renseignant sur la valeur nutritionnelle de la viande de différentes espèces et de produits transformés (steak haché, saucisses…) (Andueza *et al.*, 2015 ; Berri *et al.*, 2016; Damez et Clerjon, 2013 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2015b ; Prevolnik *et al.*, 2004 ; Prieto *et al.*, 2009). La SPIR est également utilisée pour prédire le profil en AG des tissus adipeux ou muscles, avec toutefois une meilleure capacité de prédiction pour les AG majoritaires que les AG individuels les moins représentés en particulier dans les tissus maigres, pour lesquels on « contourne » cette limite en cherchant à prédire la proportion de classe d'AG (oméga-3 par exemple) (Andueza *et al.*, 2015 ; Font-i-Furnols *et al.*, 2015b ; Kucha *et al.*, 2018). Ces méthodes sont rapides et fiables, simples à mettre en place, assez peu onéreuses, et des dispositifs portables sont maintenant disponibles pour une utilisation en conditions industrielles pour le contrôle en ligne de la composition de pièces ou produits (Damez et Clerjon, 2013 ; Gicquel *et al.*, 2016). Cette technologie est également testée en recherche et développement pour prédire certains caractères de qualité technologique tels que le pH ou le rendement technologique des viandes de porc ou de poulet (Berri *et al.*, 2016; Vautier *et al.*, 2013), alors que la prédiction des caractères sensoriels est moins performante ou montre des résultats contradictoires (couleur) (Andueza *et al.*, 2015 ; Berri *et al.*, 2016).

Cette technique a également été appliquée avec succès à la caractérisation de la composition de filets de poisson (ElMasry et Wold, 2008; Segtnan *et al.*, 2009a ; Segtnan *et al.*, 2009b ; Wold *et al.*, 2006).

La spectroscopie de moyen infrarouge à transformée de Fourrier (FT-IR *spectroscopy*) a permis de comprendre les mécanismes associés à la modification de la composition et de la structure macromoléculaire des viandes et de la chair de poisson au cours de leurs transformations (Astruc *et al.*, 2012; Bocker *et al.*, 2008 ; Bocker *et al.*, 2006). La spectroscopie infrarouge (NIRS et la spectroscopie de moyen infrarouge MIR) a également été appliquée à la caractérisation utilisée pour caractériser la composition et la qualité du lait (Grappin *et al.*, 2006). C'est la MIR qui est aujourd'hui utilisée en routine pour déterminer les éléments de paiement du lait : taux butyreux, taux protéique, comptage de cellules somatiques, mais aussi d'autres caractères comme l'urée, le lactose, le point de congélation du lait... L'utilisation des spectres MIR pour le phénotypage de nouveaux caractères commence au milieu des années 2000 avec la composition en acides gras du lait. Depuis, cette utilisation s'est étendue à d'autres caractères quantitatifs (teneurs en protéines, en minéraux et en corps cétoniques du lait) et qualitatifs (balance énergétique, maladies métaboliques, …). La spectrométrie MIR présente de nombreux avantages (rapidité, faible coût) qui lui permettent une utilisation en routine et à grande échelle[17].

La NIRS a montré sa capacité à prédire la qualité des œufs au cours de leur conservation et à caractériser leur composition. La solidité des coquilles d'œuf peut être prédite à l'aide de spectroscopie de moyen infrarouge (MIR) (Karoui *et al.*, 2009).

---

[16] https://www.es-france.com/7848-analyseur-portable-de-maturite-fruit-da-meter.html [Consulté le 23/01/2020]

[17] http://idele.fr/domaines-techniques/publication/idelesolr/recommends/quest-ce-quun-spectre-mir.html [Consulté le 23/01/2020]

Depuis quelques années, des spectromètre NIRS portable ont été développés et permettent une caractérisation des produits en ligne. Récemment, l'utilisation d'un spectromètre NIRS portable a été testé en abattoir pour prédire certains paramètres de qualité de viande (Savoia *et al.*, 2019). Dans cette étude, les paramètres de couleur de la viande sont prédits à partir de mesure sur la carcasse en Vis-NIRS avec un R^2 allant de 0,62 à 0,88 et en Micro-NIRS avec un R2 allant de 0,51 à 0,81. En revanche, le pH, les paramètres de rétention d'eau et de texture étaient faiblement prédits (R2 allant de 0,26 à 0,34).

La spectroscopie de fluorescence constitue une autre méthode rapide et non-destructive de caractérisation des produits alimentaires, avec deux technologies différentes : la spectroscopie de fluorescence frontale et la spectroscopie de fluorescence synchrone. La fluorescence frontale est surtout utilisée pour évaluer la composition chimique (matière grasse, protéines eau) de produits alimentaires (lait, fromage, viande, poisson, œuf, miel…) (Andueza *et al.*, 2015). En permettant d'évaluer les teneurs en collagène, élastine et tissu adipeux, cette technique a été utilisée pour prédire la tendreté de la viande bovine, avec toutefois des résultats variables (Andueza *et al.*, 2015 ; Clerjon *et al.*, 2011; Egelandsdal *et al.*, 2002 ; Frencia *et al.*, 2003 ; Sahar *et al.*, 2009 ; Skjervold *et al.*, 2003 ; Swatland, 2000 ; Swatland *et al.*, 1998 ; Swatland et Findlay, 1997 ; Wold *et al.*, 1999). Cette méthode a également permis de prédire la fraicheur de poissons (Dufour *et al.*, 2003 ; Karoui *et al.*, 2006) et d'accéder à la composition de divers aliments (Kulmyrzaev et Dufour, 2002 ; Kulmyrzaev *et al.*, 2007).

A l'inverse, la spectroscopie de fluorescence synchrone n'a été considérée que récemment dans le domaine alimentaire pour discriminer différents produits (fromages) en fonction de leur origine, étudier les changements de structure des composants de produits laitiers et carnés au cours de traitements technologiques (chauffage, cuisson et acidification) ou prédire leur composition, et ces travaux restent encore au stade de la recherche (Andueza *et al.*, 2015).

La spectroscopie Raman, est également utilisée pour prédire différents paramètres biochimiques (composition en AG), technologiques (rendement de fabrication) ou sensoriels (force de cisaillement, tendreté) des viandes, avec des exemples d'application chez le bovin et le porc (Font-i-Furnols *et al.*, 2015b; Yang et Ying, 2011). La corrélation entre la réponse spectrale, la force de cisaillement et les pertes de jus de cuisson de viande ovine étaient respectivement de R2 = 0,82 et R2 = 0,81 (Schmidt *et al.*, 2013) ce qui est encourageant quant à l'utilisation de cette approche future dans le secteur industriel.

Le pH de muscle de porc a également été prédit avec une bonne précision (R2 = 0,58 à 0,83 selon les études) à l'aide de spectroscopie Raman (2015; Scheier et Schmidt, 2013).

Une étude récente a également montré l'intérêt majeur de la spectroscopie Raman pour caractériser l'évolution de la viande en cours de cuisson. Les résultats mettent en évidence d'étroites corrélations entre les réponses spectrales et la température de cuisson (R2=0,96), les pertes de jus à la cuisson (R2 = 0,82) et le temps de cuisson (R2 = 0,78) (Berhe *et al.*, 2014).

Au-delà de la prédiction du comportement de produit alimentaire au cours des transformations, la spectroscopie Raman permet également de détecter des additifs, des résidus de pesticides et d'antibiotiques, de micotoxines ou encore de drogues illégales, dans les denrées alimentaires (Zheng et He, 2014).

La visionique et l'imagerie hyperspectrale constituent des technologies à fort potentiel pour le secteur abattage/découpe. En effet, comparativement à la SPIR, elles présentent l'intérêt d'une mesure sans contact et peuvent s'intégrer facilement à une ligne de production car elles ne nécessitent pas l'intervention d'opérateur (Berri *et al.*, 2016). Les champs d'applications sont les mêmes que pour la SPIR. L'analyse hyperspectrale se caractérise par l'acquisition d'un spectre continu dans une gamme de longueurs d'onde donnée, généralement correspondant aux domaines du visible et du proche-infrarouge (400 à 2 500 nm), avec un pas d'échantillonnage de l'ordre de 10 nm. Néanmoins les nouvelles technologies permettent aujourd'hui de faire de l'analyse hyperspectrale dans le domaine du moyen infrarouge, du Raman ou encore de la fluorescence UV (Pu *et al.*, 2019). Ces avancées technologiques laissent présager de conséquentes évolutions dans la caractérisation des aliments (animaux ou végétaux). D'ores et déjà, cette approche présenterait des aptitudes pour prédire les pertes en eau (Qiao *et al.*, 2007) ou classer les viandes selon leur qualité technologique (Liu *et al.*, 2010). Des travaux en cours (CASDAR HYPERSCAN) visent à évaluer la capacité prédictive des caractéristiques sensorielles ou technologiques des viandes porcines par cette technologie.

La résonance magnétique nucléaire (RMN) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont d'autres méthodologies dont les applications dans le domaine de l'alimentaire sont croissantes, cependant leur coût élevé constitue encore un frein à leur utilisation en ligne de production (Damez et Clerjon, 2013). Au niveau de la recherche-développement, la RMN permet de prédire certains caractères technologiques (perte à la cuisson) ou sensoriels (jutosité, tendreté) (Font-i-Furnols *et al.*, 2015b). L'IRM est utilisée pour caractériser la composition des tissus, comme par exemple pour quantifier les lipides intramusculaires dans la longe de porc à des cadences élevées (400 à 500/jour) (Schwob *et al.*, 2018) ou encore pour cartographier le sodium dans des viandes ou poissons saumurés et étudier la diffusion du sel (Bertram *et al.*, 2005 ; Gudjonsdottir *et al.*, 2015).

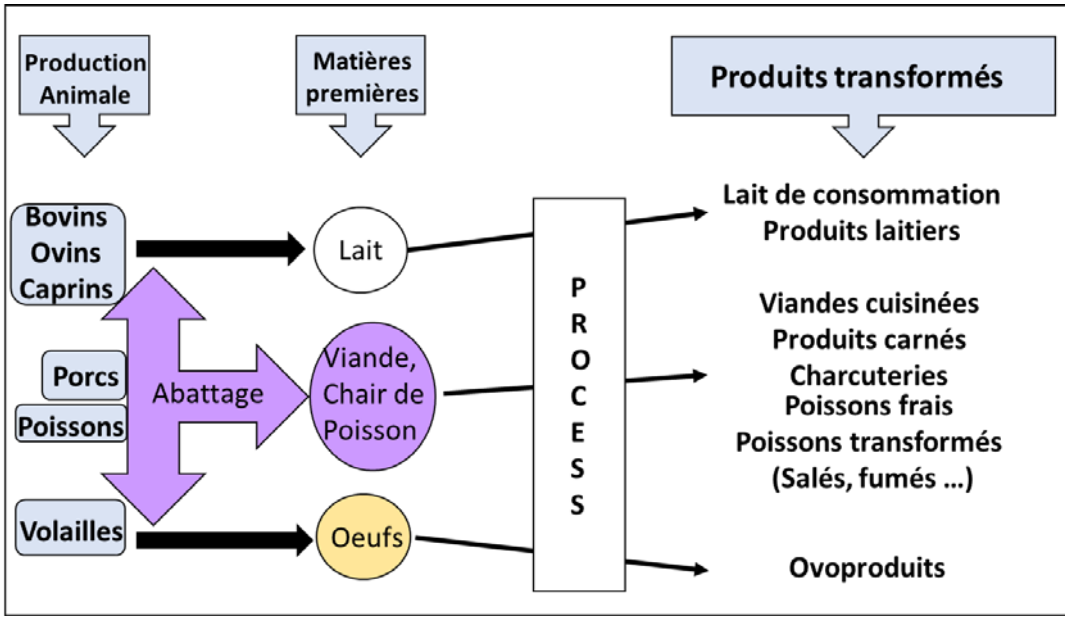
A côté de ces méthodes utilisées sur les pièces de viandes ou produits transformés, il faut rappeler les méthodes d'ultra-sons utilisées couramment chez l'animal in vivo pour déterminer des paramètres associés à la valeur commerciale (épaisseur de gras dorsal) ou aux caractéristiques sensorielles (teneur en lipides intramusculaires), ainsi que les méthodes d'imagerie utilisées en abattoirs pour le classement commercial des carcasses (Schwob *et al.* 2019).

1.2 Les étapes successives de l'élevage à la consommation

D'une façon générale, les matières premières d'origine animale subissent des transformations technologiques avant d'être consommées (Figure 1-11). Ces transformations ont pour principal but d'allonger la durée de conservation du produit, d'améliorer ses qualités sensorielles ou encore de faciliter son utilisation ultérieure par les différents acteurs de la chaine alimentaire.

Les trajectoires technologiques varient en fonction de la matière première : la première transformation sera l'abattage pour la production de viande et de poisson alors qu'elle consistera en une réfrigération pour les œufs et le lait.

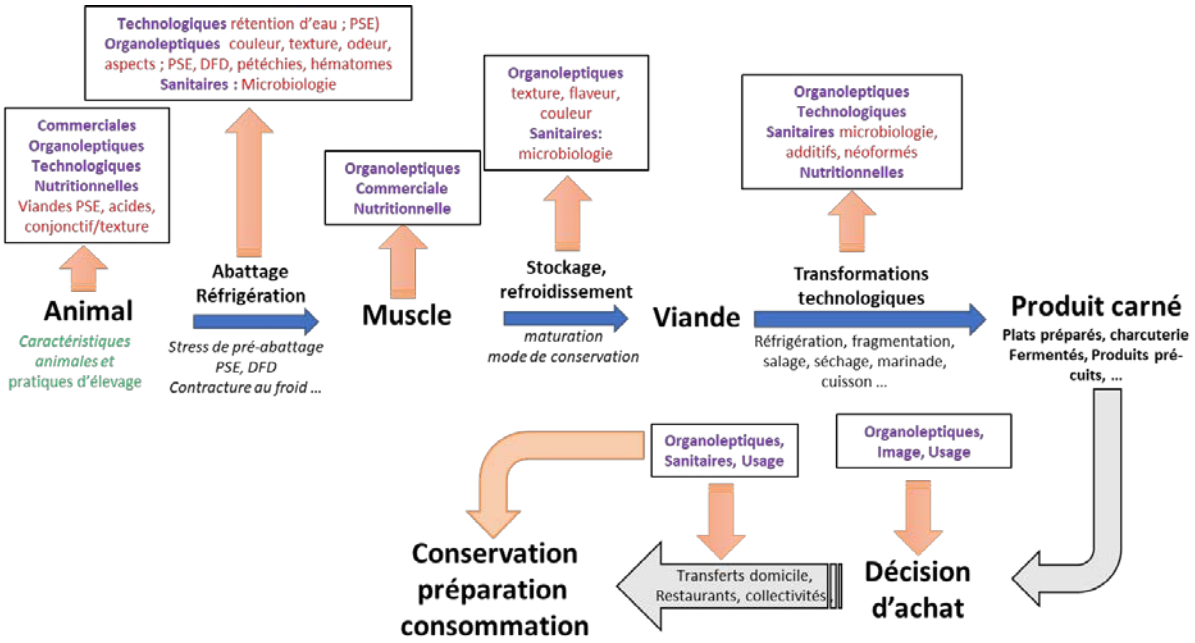
Figure 1-11 : Les étapes de transformation depuis la production animale jusqu'à l'aliment pour l'homme



1.2.1. Trajectoires et procédés de transformations dans les filières viande et poisson

Un schéma spécifique de la filière viande est donné en figure 1-12.

Figure 1-12 : Les différentes étapes de transformation des viandes



Qu'est-ce que la viande ? La viande et la chair de poisson résultent de la transformation physicochimique du muscle après l'abattage. La structure et la composition de la viande et de la chair de poisson sont néanmoins étroitement liées à celles du muscle squelettique dont elle est issue.

- Le muscle squelettique

Le muscle contient environ 75 % d'eau, 19 % de protéines et 3-5 % de lipides, le reste étant composé de glucides, et micronutriments tels que les vitamines. La principale fonction physiologique du muscle squelettique est la contraction musculaire qui réclame une grande quantité d'énergie. Cette énergie est libérée par la dégradation de l'ATP qui est régénéré, en majeure partie, par la dégradation de la phosphocréatine et du glycogène stocké dans les cellules (Westerblad *et al.*, 2010). Sur le plan structural, le muscle des animaux terrestres est composé de cellules musculaires enveloppées dans des gaines de tissu conjonctif à plusieurs niveaux d'organisation : l'endomysium, le périmysium et l'épimysium qui enveloppent respectivement les fibres musculaires, les faisceaux de fibres et le muscle (Astruc, 2014a). Chez le poisson, l'organisation dite « métamérique » résulte d'une alternance de feuillets musculaires et conjonctifs.

- Fibres musculaires

Quelle que soit l'espèce, les fibres musculaires sont toutes composées de myofibrilles, alignées en faisceaux qui occupent presque tout le volume intracellulaire (Listrat *et al.*, 2015) qui sont elles-mêmes composées de myofilaments fins et épais. Les cellules musculaires contiennent plusieurs noyaux et divers organites cellulaires dont certains, se sont spécialisés pour assurer la fonction contractile du muscle (réticulum sarcoplasmique qui concentre le calcium lors de la relaxation et le relargue lors d'un influx nerveux pour activer la contraction de la fibre musculaire).

Bien que leur structure intracellulaire soit similaire, toutes les fibres musculaires qui composent le muscle ne sont pas identiques. Il en existe 4 types en proportion différente (I, IIA, IIX et/ou IIB) selon l'espèce, le muscle considéré, l'âge de l'animal ou encore son niveau d'activité physique (Astruc, 2014b ; Astruc et Venien, 2017 ; Lefaucheur, 2010 ; Listrat *et al.*, 2015 ; Listrat *et al.*, 2018 ; Schiaffino et Reggiani, 2011). Elles sont classées selon leurs caractéristiques contractiles et métaboliques et selon l'isoforme de chaîne lourde de myosine qui les compose.

Les fibres de type I sont caractérisées par leur métabolisme oxydatif et leur contraction lente. Elles sont de couleur rouge car riches en myoglobine, un transporteur d'oxygène qui pigmente les fibres. Elles sont de faible diamètre. Ces fibres sont résistantes à la fatigue et généralement en proportions élevée dans les muscles respiratoires et de maintien de la posture. La proportion de ces fibres est élevée chez le bovin, l'ovin, le cheval et chez les oiseaux migrateurs.

Les fibres de type IIA sont caractérisées par leur métabolisme oxydatif-glycolytique et leur contraction rapide. Riches en myoglobine, elles sont de couleur rouge. Elles sont nombreuses dans les muscles qui doivent se contracter rapidement tout en résistant à la fatigue, dans de moindres proportions cependant que les fibres de type I.

Les fibres de type IIB et IIX sont à métabolisme glycolytique (IIX<IIB) et à contraction rapide. Elles sont de couleur blanche car pauvres en myoglobine. Elles composent majoritairement les muscles sollicités pour fournir des efforts violents mais de courte durée car elles sont peu résistantes à la fatigue. Les fibres de types IIX et IIB sont les plus grosses comparativement aux fibres à métabolisme oxydatif (I et IIA). On les rencontre en large majorité dans les muscles et viandes blanches issues de poulet, poisson blanc et dans une moindre mesure de porc.

Certaines espèces ne contiennent pas ou peu de fibres IIB (mouton, cheval, bovins), mais beaucoup d'autres espèces contiennent les 4 types de fibre (porcs, rats) (Lefaucheur, 2010 ; Schiaffino et Reggiani, 2011).

La proportion de chacun de ces types de fibre dans les muscles conduit à des appellations simplifiées : les muscles rouges, car riches en myoglobine et par conséquent essentiellement composés de fibres à métabolisme oxydatif de types I et IIA ; et les muscles blancs car pauvres en myoglobine et par conséquent essentiellement composés de fibres à métabolisme glycolytique de type IIX et /ou IIB.

Chez les oiseaux, les fibres musculaires sont également classées sur la base de leur activité contractile et métabolique, mais les muscles aviaires contiennent en plus des fibres lentes toniques multi-innervées de type IIIA et IIIB (Berri et Duclos, 2003). Les poissons contiennent également différents types de fibres musculaires caractérisés par leur type contractile et métabolique, mais leur assemblage diffère de celui des espèces terrestres. Chez la truite par exemple, les fibres à contraction rapide et métabolisme glycolytique (analogue au IIB des mammifères, de couleur blanche) sont majoritaires et situées au centre du filet. Des fibres rouges lentes (analogue au type I) et des types intermédiaires (rose, analogue au type IIA) sont situés en périphérie de la darne (Alami-Durante et Rescan, 2003). Chez les oiseaux et la volaille, le lien entre le type de fibre et leur contenu en isoforme de chaine lourde de myosine est moins systématique que chez les animaux terrestres (Listrat *et al.*, 2015).

Quelle que soit l'espèce, la composition en type de fibre est un déterminant important de la qualité des viandes, poissons et produits carnés (Chapitre 2). L'abattage, entre autres, va provoquer des changements métaboliques et structuraux dans les fibres musculaires dont les amplitudes sont dépendantes du type de fibre, avec des conséquences différentes sur les propriétés des muscles selon leurs proportions de fibres I, IIA et IIX/IIB.

- Tissu conjonctif intramusculaire

Le tissu conjonctif intramusculaire qui compose le perimysium et l'endomysium contient un mélange de polysaccharides et de protéines fibreuses. Il est constitué de 90 % de collagène. On recense 28 types de collagènes dans le règne animal. Les collagènes I et III sont les types prédominants dans les muscles, mais les collagènes IV, V, VI, XII, XIV, XV et XIX sont également présents en quantités mineures (Astruc, 2014a). Chez les poissons, les collagènes de type I et V prédominent (Sato *et al.*, 1991).

Le collagène est composé de 3 chaînes alpha de polypeptides avec une structure primaire répétitive simple, Gly-X-Y, où X est souvent la proline et Y est souvent l'hydroxyproline. Les trois chaînes sont assemblées en une triple hélice de tropocollagène. Les molécules de tropocollagène sont assemblées pour former des fibrilles qui sont ensuite regroupées pour constituer des fibres de collagène. Le collagène fibreux est réticulé par un mécanisme basé sur la formation d'aldéhyde à partir de chaînes latérales de lysine ou d'hydroxylysine. Les fibrilles et les fibres sont stabilisées par des réticulations intermoléculaires dérivées de lysine formées entre lysine aldéhyde ou hydroxylysine aldéhyde et hydroxylysine pour former une liaison aldimine ou oxo-imine. Ces liaisons sont remplacées au cours du vieillissement par des liaisons croisées matures multivalentes stables, censées lier les microfibrilles et augmenter la stabilité de la matrice. Ainsi, la résistance mécanique du collagène augmente avec son degré de réticulation, ce qui affecte significativement la qualité de la viande et des produits à base de viande, en particulier la texture et la capacité de rétention d'eau.

- Lipides intramusculaires

La viande comprend de 1 % à près de 50 % de lipides dans le cas extrême du bœuf de Kobbé (Motoyama *et al.*, 2016). Mais d'une façon générale, le taux de lipides intramusculaires dans les viandes et le poison se situe entre 3 et 11 % (Bauchart et Gandemer, 2010 ; Hocquette *et al.*, 2010). Les lipides intramusculaires ont plusieurs localisations. Les lipides neutres (triglycérides, esters de cholestérol) sont majoritairement stockés dans les adipocytes musculaires localisés dans le périmysium (tissu conjonctif qui enveloppe les faisceaux de fibres musculaires). Les fibres musculaires contiennent essentiellement des phospholipides, composants des membranes plasmiques et des organites cellulaires et des lipides neutres qui composent les gouttelettes lipidiques des fibres musculaires. Les caractéristiques des acides gras qui composent les lipides varient avec l'espèce et l'alimentation. La teneur et les caractéristiques des lipides affectent la qualité des viandes, en particulier la flaveur, la texture et l'aptitude à la transformation et à la conservation.

1.2.1.1 Abattage

Qu'il s'agisse de la filière viande ou de la filière poisson, la première transformation est relative à l'abattage. L'abattage des animaux de boucherie qui est le préalable indispensable à la production de viande est réglementé par la directive européenne n°93/119 du 22 décembre 1993 (Commission européenne, 1993). Le bien-être animal doit être pris en compte et le règlement impose d'épargner aux animaux toute excitation, douleur ou souffrance évitables pendant toutes les opérations entourant la mise à mort.

Dans cette partie, relative à la description des différentes étapes de l'abattage, seront intégrées les étapes de pré-abattage initiées quand l'animal quitte la ferme ou son lieu de production. La mise à jeun, le chargement des animaux, le transport, le déchargement, l'hébergement à l'abattoir sont des sources importantes de stress (Alcalde *et al.*, 2017 ; Chulayo *et al.*, 2016 ; Chulayo et Muchenje, 2013 ; Losada-Espinosa *et al.*, 2018 ; Njisane et Muchenje, 2017 ; Terlouw, 2018 ; Terlouw *et al.*, 2007 ; Wigham *et al.*, 2018) qui affectent de façon plus ou moins importante le bien-être des animaux et les qualités des viandes qui en sont issues (Alvarez *et al.*, 2009 ; Faucitano, 2018 ; Ferguson et Warner, 2010 ; Njisane et Muchenje, 2017; Stajkovic *et al.*, 2017).

Pré-abattage

Animaux terrestres

Sauf exception (abattage d'urgence ; dérogations), la loi oblige d'abattre les animaux dans un bâtiment agréé par les autorités (abattoir). Il est donc nécessaire de transporter les animaux de leur lieu d'élevage vers l'abattoir.

- Départ de la ferme-chargement

Les **bovins-ovins porcins** sont généralement amenés au camion par l'éleveur. Ils gravissent une rampe de chargement ou pénètrent horizontalement dans le camion si un quai de chargement est disponible.

Les **volailles** sont en général collectées manuellement dans les bâtiments d'élevage et déposés dans des caisses de transport ajourées qui sont chargées sur les camions.

L'étape de chargement constitue une source de stress importante. Au changement d'environnement viens s'ajouter l'activité physique inhabituelle que rencontrent les animaux lors du chargement, en particulier si la rampe présente une pente importante. Cette étape est particulièrement stressante pour les volailles qui sont collectées manuellement par des opérateurs, de nuit et rapidement.

- Transport

Les conditions de transport des animaux sont très variables puisqu'elles dépendent de sa durée, de l'état de la route (virages, nids de poules…) de la conduite du chauffeur, des conditions météorologiques…

- Déchargement-hébergement

En arrivant à l'abattoir, les animaux sont déchargés et généralement hébergés à l'abattoir jusqu'à l'abattage du lendemain matin. À la réception, la traçabilité est contrôlée grâce aux boucles d'identification en lien avec le passeport individuel ou document de circulation. L'état de santé des animaux est vérifié par les inspecteurs vétérinaires (inspection *ante-mortem*). Malgré le fait que les locaux d'hébergement soient équipés d'abreuvoirs et théoriquement conçus pour faciliter le repos des

animaux, les conditions d'hébergement représentent des facteurs importants de variations du stress et du bien-être animal, et des qualités des viandes (voir chapitre 2 et figure 1-13).

Les volailles sont abattues le jour même. Afin de limiter les contaminations microbiennes éventuelles lors de l'abattage, les animaux sont mis à jeun avant abattage. Pour les volailles, la durée du jeûne est d'au moins 8 h ce qui correspond à la vidange du tube digestif.

Figure 1-13 : Effet des étapes de pré-abattage sur le bien-être animal et les qualités de viandes (Source : Njisane et Muchenje 2017)

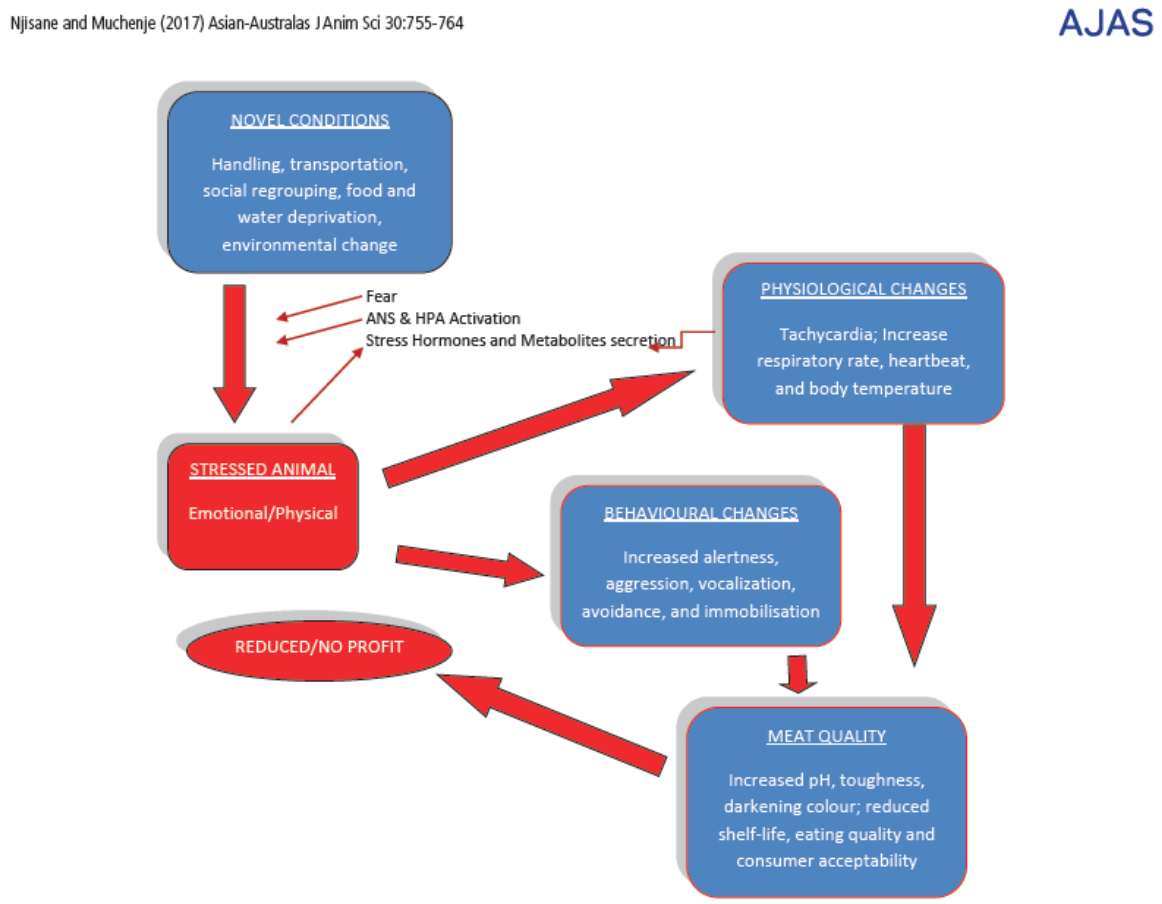


Figure 1. Diagram showing a detailed summary of the effects of the pre and slaughter process on the animals and the quality of meat, as described in literature. ANS, autonomic nervous system; HPA, hypothalamic pituitary adrenal.

Étapes de l'abattage

- Amenée des animaux

Pour les animaux de boucherie (bovins, ovins et porcs), l'amenée des animaux consiste à transférer des groupes d'animaux du local d'hébergement jusqu'au poste d'étourdissement. Bien que les infrastructures soient conçues pour limiter leur état d'inconfort (sol antidérapants, dispositifs anti-reculs), cette étape est particulièrement stressante pour les animaux. Les animaux les plus réactifs peuvent présenter un état de stress exacerbé, des mouvements de fuite, une activité physique intense avec pour conséquence une accélération du métabolisme musculaire qui est maintenue après la mort de l'animal et qui peut conduire à la production de viandes défectueuses (viandes PSE, voir chapitre 2).

Les volailles sont amenées en caisses jusqu'au poste d'accrochage. Elles sont suspendues par les pattes sur un support disposé sur le rail d'abattage. Cette étape est une source de stress élevée pour les animaux qui se retrouvent dans une position non naturelle, tête en bas bien que cette opération soit réalisée en lumière bleue pour limiter le stress des animaux.

- Contention –étourdissement

Les animaux de boucherie sont transférés vers des équipements adaptés pour les immobiliser (cage de contention, box d'abattage, *restrainer*), individuellement (bovins, ovins, porcs) ou parfois en groupe (porcs). Les matériaux et équipements sont adaptés à l'espèce et aux gabarits des animaux. L'immobilisation permet de protéger les employés et leur permettre d'assurer un bon étourdissement. Pour limiter le stress de l'animal, l'immobilisation doit être de courte durée et l'abattage doit se faire sans délai.

Sauf dérogation liée à des questions religieuses, l'étourdissement est obligatoire depuis 1964 en France (Décret n°64-334 du 16 avril 1964 relatif à la protection de certains animaux domestiques, et aux conditions d'abattage » ; Arrêté du 12 décembre 1997 relatif aux procédés d'immobilisation, d'étourdissement et de mise à mort des animaux et aux conditions de protection animale dans les abattoirs (République Française, 1964 ; 1997)). Il désigne tout procédé qui provoque une perte de conscience immédiate et supprime la perception de la douleur par l'animal jusqu'à sa mort (Verhoeven *et al.*, 2015). Les employés responsables de l'étourdissement sont titulaires d'un certificat de compétence et capables de réaliser et de reconnaitre un étourdissement efficace. Un second système d'étourdissement doit obligatoirement être disponible en cas de dysfonctionnement du premier système (p. ex : panne de matériel ou mauvaise efficacité de l'étourdissement). Un étourdissement mal réalisé (sous dimensionnement du système d'étourdissement, mauvaise application des règles d'étourdissement, mobilité de l'animal…) conduit à la souffrance de l'animal et déclenche des réponses de stress exacerbées qui dégradent sensiblement les qualités des carcasses et des viandes (Chapitre 2). Les méthodes d'étourdissement employées sont les suivantes :

- L'étourdissement électrique

Le matériel d'étourdissement électrique est adapté à l'espèce et à sa taille. Les électrodes doivent être placées autour du cerveau et une tension suffisante (>200 volts) doit être appliquée pendant au moins 3 secondes pour provoquer un état d'inconscience immédiat. Chez le bovin, l'étourdissement électrique, rarement appliqué en France pour cette espèce, possède une 3ème électrode appliquée sur le corps qui permet le passage du courant par le cœur, qui approfondi et prolonge l'état d'inconscience (Terlouw, 2018). Dans les petits abattoirs, l'étourdissement électrique est réalisé manuellement à l'aide de pinces appliquée au niveau de la tête (porcs, moutons, chèvres et veaux). Le système est automatisé dans les grands abattoirs de porcs et volailles. Les porcs amenés à l'aide d'un convoyeur (convoyeur a bande ventrale, convoyeur en V, tapis roulant) entrent en contact avec le système d'électronarcose. Pour les volailles, pendues par les pattes tête en bas, c'est le contact de la tête avec un bain d'eau situé sur le parcours qui déclenche la décharge électrique.

- L'étourdissement mécanique

L'étourdissement mécanique entraine une inconscience immédiate provoquée par un coup violent sur la boite crânienne**.** Les dispositifs sont généralement des pistolets d'abattage perforants ou non-perforants (Kamenik *et al.*, 2019 ; Oliveira *et al.*, 2018).

Les pistolets perforants disposent d'une tige de 15 à 20 cm qui pénètre dans le cerveau. Ils sont utilisés principalement pour l'étourdissement des bovins et plus rarement pour les moutons, les chèvres, les porcs, les cerfs, les chevaux et les lapins.

Les pistolets non perforants (*knocker*) appliquent un coup contrôlé sur la tête de l'animal. Ils sont utilisés chez les ovins et les jeunes bovins.

- L'étourdissement en atmosphère modifiée

Dans la majorité des cas Les animaux sont étourdis par immersion dans une fosse contenant du dioxyde de carbone ou quelquefois de l'azote ou de l'argon, ou un mélange de ces gaz. Ce mode d'étourdissement est employé pour l'étourdissement des porcs (Verhoeven *et al.*, 2016), plus particulièrement dans les pays du nord de l'Europe, et pour la volaille (Berg et Raj, 2015).

- Saignée-habillage/échaudage-éviscération

Après l'étourdissement, les animaux sont inconscients. Les mammifères (bovins, ovins, porcs) sont généralement positionnés sur le rail d'abattage à l'aide d'un système de levage et transférés au poste suivant ou un opérateur le saigne manuellement au niveau de la veine jugulaire. Le sang est récupéré dans des containers pour traitement ultérieur. Les bovins et les ovins

sont débarrassés de la tête et des sabots puis dépouillés à l'aide d'un outil spécifique. Les porcs sont échaudés par immersion dans une échaudeuse remplie d'eau à 62°C et munie de pales dont la fonction est de retirer les soies. A la sortie de l'échaudeuse, les carcasses traversent un environnement muni de brûleurs puis ils sont grattés (à l'aide de machines ou manuellement) pour retirer les dernières soies. Parfois, les porcs ne subissent pas la phase d'échaudage et les soies sont retirées par passage dans un couloir équipé de brûleurs industriels, puis soumis à l'action de pales souples qui retirent les résidus de soies brulées.

Les volailles étourdies sur la chaine sont transférées au poste de saignée automatique, effectuée à l'aide d'une lame circulaire horizontale, puis elles sont échaudées. Les plumes sont retirées à l'aide de plumeuses industrielles. Pour les canards non gavés, la finition peut être faite à l'aide de cire chaude.

L'abdomen est ouvert et les viscères et abats sont retirés par des opérateurs (bovins, ovins, porcs, volailles) ou automatiquement (volailles). Chez les gros animaux, on distingue les abats blancs (tripes, intestins, panses…) des abats rouges (poumons, cœur, reins, langue, rate et foie) qui sont identifiés pour inspection vétérinaire en fin de chaine d'abattage.

Un accident d'éviscération peut conduire à la perforation du contenu digestif qui se répand sur la carcasse et la contamine avec les bactéries du tube digestif dont certaines sont très pathogènes (p. ex. *Salmonella*).

- Préparation commerciale

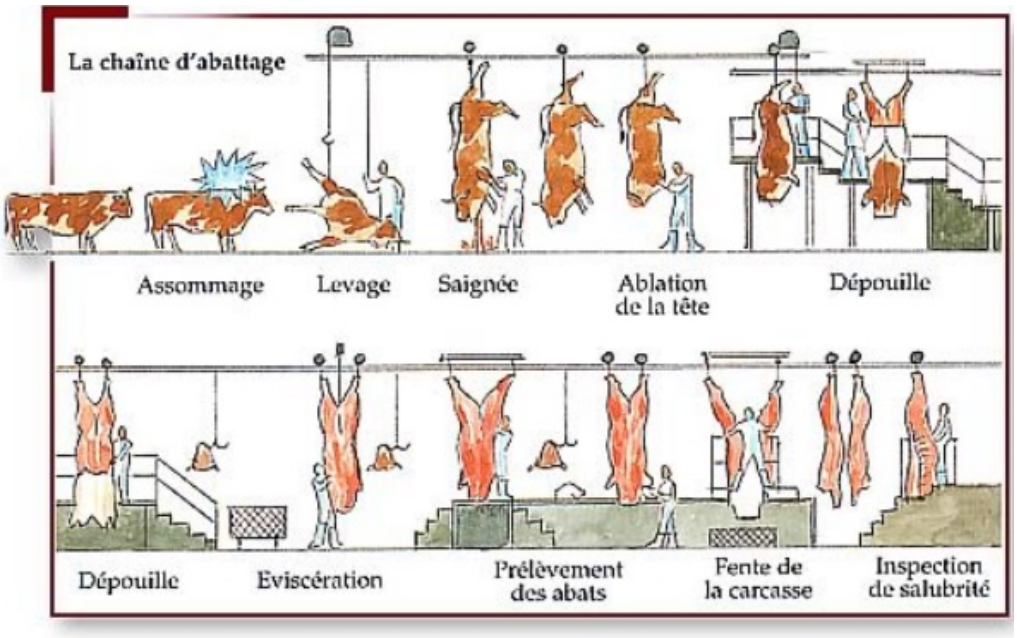
Pour les gros bovins et les porcs, les carcasses sont fendues manuellement ou automatiquement selon l'axe de la colonne vertébrale. En France, une partie du gras de couverture est retirée (émoussage) pour une meilleure présentation de la carcasse.

- Inspection *post mortem*-pesée-classement-marquage-réfrigération-stockage

En fin de chaine, la carcasse (bovin, ovin, porc) est inspectée par un agent des services vétérinaire qui l'estampille s'il juge qu'elle ne présente pas de risque sanitaire.

Les carcasses de volailles sont observées individuellement après le poste d'éviscération par un opérateur formé. Les carcasses non conformes sont aussitôt retirées de la chaîne alimentaire et stockées à +4°C pour une inspection vétérinaire. Le nombre de carcasses saisies est communiqué à l'éleveur.

Figure 1-14 : Opérations d'abattage pour les gros bovins



Source "Le frise-livre des vaches", France UPRA Sélection

Source : Dubois (2002)

La carcasse (bovins, ovins) est pesée, classée selon la classification EUROP (conformation, couleur, état d'engraissement) puis réfrigérée progressivement avant d'être stockée en chambre froide pour qu'elle atteigne 4°C après 24 heures. Si la carcasse a subi une stimulation électrique peu après la saignée, le refroidissement peut être plus rapide sans que cela ne génère une contraction au froid, néfaste à la tendreté de la viande.

La carcasse de porc est également pesée et classée selon la classification EUROP (mesure du taux de muscle des pièces ou TMP). Le porc, qui possède des muscles moins sensibles à la contracture au froid que les ruminants, peut être refroidi rapidement par passage dans un tunnel réfrigérant avec des températures négatives.

Les carcasses de volailles sont refroidies rapidement dans des tunnels réfrigérés.

Abattage des poissons

- Départ de la ferme-chargement-transport

Les poissons sont regroupés, transférés dans des cuves disposées sur un camion et amenés au poste d'abattage.

- Contention –étourdissement

Les poissons sont sortis des cuves puis étourdis. Il existe différentes méthodes d'étourdissement : la percussion, l'anesthésie gazeuse par CO_2 ou CO, l'électrocution, le refroidissement et le *spiking* (perforation du cerveau) (Concollato *et al.*, 2019 ; Daskalova *et al.*, 2016 ; Terlouw *et al.*, 2015). L'utilisation de l'asphyxie, qui provoque la mort, est plus rare, car considérée comme non respectueuse du bien-être animal (van de Vis *et al.*, 2003).

Impact de l'abattage sur la physiologie et la biochimie du muscle

L'abattage entraine de larges modifications de la composition physico-chimique et de la structure du muscle qui, peu à peu, se transforme en viande.

Mécanismes biochimiques

Après la saignée, les cellules sont privées des nutriments et de l'oxygène qui *in vivo* étaient véhiculé par le sang. Les cellules survivent quelque temps en régénérant l'ATP, indispensable au maintien des gradients ioniques et potentiels de membranes, par des voies métaboliques anaérobies. La synthèse de l'ATP repose alors sur la dégradation de la phosphocréatine et surtout sur la glycolyse anaérobie. La resynthèse d'ATP est efficace tant qu'il reste de la phosphocréatine dans le muscle. La glycolyse ne régénère que 3 ATP par résidu glycosyl (contre 37, au maximum, *in vivo*) et quand la phosphocréatine est épuisée, la faible performance de la glycolyse ne permet pas de maintenir l'ATP à une valeur constante. Sa concentration cellulaire va peu à peu diminuer. A l'issue de la glycolyse, le pyruvate est réduit en acide lactique et pour chaque molécule de lactate produite, le système libère un proton. A mesure que le taux d'ATP diminue et que le glycogène est dégradé, les protons et les molécules de lactate s'accumulent dans les cellules musculaires entraînant une diminution du pH du muscle (Bendall, 1973 ; Greaser, 1986 ; Monin, 1988). Le pH se stabilise à une valeur appelée pH ultime quand le glycogène est épuisé, quand l'AMP qui est un cofacteur d'enzymes de la glycogénolyse disparait ou quand la valeur de pH inhibe les enzymes du métabolisme glycolytique anaérobie.

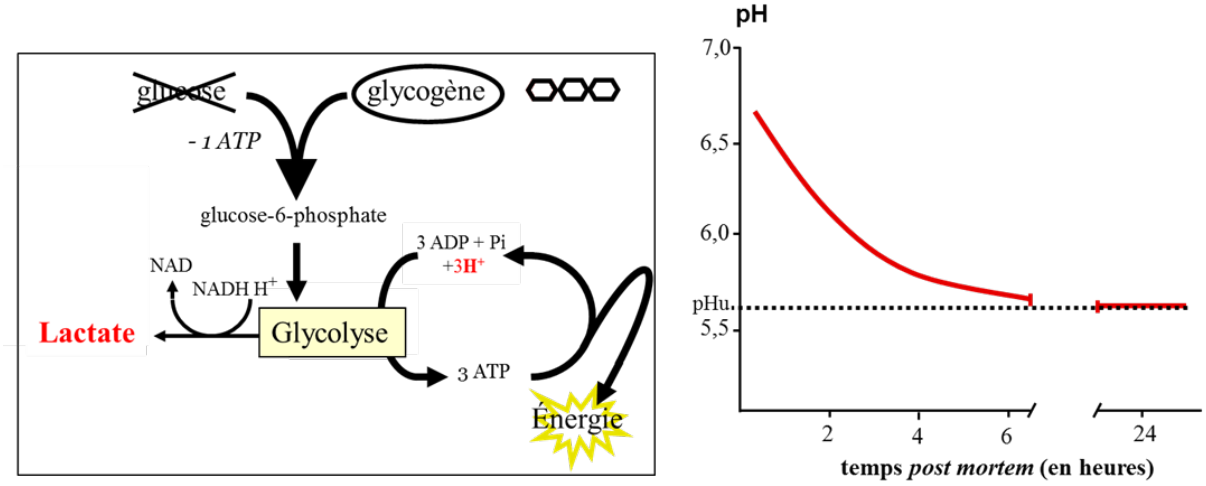


Figure 1-15 : Dégradation post mortem du glycogène

Accumulation de protons et de lactate dans la cellule musculaire avec pour conséquence une diminution du pH musculaire qui se stabilise au pH ultime (pHu).

Mécanismes structuraux

Des modifications physiques sont perceptibles lors de la transformation du muscle en viande, en particulier l'installation de la rigidité cadavérique qui est directement perceptible sur la carcasse dans les heures qui suivent la mort de l'animal. La musculature devient progressivement raide et inextensible. *In vivo* et peu après la saignée, la présence d'ATP permet le glissement des filaments fins (actine) par rapport aux filaments épais (myosine), ce qui permet l'extension du muscle lorsqu'une traction est appliquée à ses extrémités, et son retour à sa longueur initiale lorsque la traction cesse (Bendall, 1973). Le muscle est extensible et élastique. Lorsque le taux d'ATP s'abaisse de la moitié de la teneur du muscle au repos (correspondant à une valeur de pH de l'ordre de 6), les molécules d'actine et de myosine se lient pour former un complexe actomyosine. Le glissement relatif des filaments devient impossible et l'ensemble de l'appareil myofibrillaire se transforme en un système rigide : le muscle devient inextensible. Par la suite, la rigidité musculaire s'estompe progressivement, mais pas l'inextensibilité. Cette « résolution » de la *rigor mortis* découle de la dégradation subie par les protéines constituant la structure myofibrillaire au cours de la période dite de maturation.

À l'échelle ultra structurale, la conversion du muscle en viande s'accompagne d'un resserrement des myofilaments avec pour conséquence une contraction latérale des myofibrilles et des fibres musculaires (Pearce *et al.*, 2011). Ces évolutions ultra structurales sont concomitantes avec des transferts d'eau qui transitent vers l'extérieur des cellules musculaires, dans l'espace extracellulaire.

1.2.1.2 Réfrigération

Dès la fin de la pesée et du classement/calibrage, les carcasses et poissons sont refroidis par passage dans un couloir de refroidissement (air pulsé en froid négatif) ou stockage dans une chambre froide maintenue généralement à 4°C. L'abaissement de température réduit l'activité des enzymes, ralentit la transformation du muscle en viande et la vitesse de maturation mais limite les développements bactériens et améliore la durée de conservation.

Pour les espèces à viande rouge (bovins, ovins), la cinétique de refroidissement doit être contrôlée pour refroidir progressivement la carcasse pour éviter de provoquer une contracture au froid qui va nuire à la tendreté de la viande (Ouali, 1991) (voir Chapitre 2 ; lien avec la stimulation électrique des carcasses).

Pour les denrées d'origine animale ou les aliments à base de denrées d'origine animale, les températures d'entreposage, de transport et de mise en vente, comprises entre 2 et 4°C, sont fixées par l'arrêté du 21 décembre 2009 et le règlement n°853/2004 (Commission européenne, 2004a).

1.2.1.3 Découpe-Piéçage-Conditionnement-Fragmentation

Les carcasses sont transférées vers une salle de découpe ou elles sont désossées, les muscles sont extraits et conditionnés pour la vente en gros ou fragmentés pour certains d'entre eux (muscles riches en tissu conjonctif de qualité insuffisante pour consommation en viande à griller).

L'étape de maturation est importante pour optimiser la tendreté des viandes de ruminants encore souvent consommées en frais. Elle peut se faire sur la carcasse entière stockée en frigo (10 à 15 jours) ou sur des pièces de viande conditionnées sous vide (jusqu'à 1 mois) ou stockée dans des enceintes gérant la température et l'hygrométrie de l'air (maturation sèche ; jusqu'à 2 mois de maturation). La durée et la méthode de maturation influencent la texture et la flaveur des viandes (voir Chapitre 2).

1.2.1.4 Congélation-surgélation

Les carcasses et les pièces de découpe peuvent être congelées. En France, la note de service DGAL/SDSSA/n°2013-8083 du 14 mai 2013[18] donne des lignes directrices en matière de congélation des denrées animales ou d'origine animale dans les établissements agréés. Elle précise les obligations des opérateurs en ce qui concerne la provenance des produits, les délais de congélation, l'étiquetage et les obligations des opérateurs en matière de transmission des informations relatives aux denrées congelées. Il s'agit en fait de surgélation qui contrairement à la congélation est un procédé industriel qui consiste à transformer rapidement en glace l'eau contenue dans les aliments. En utilisant de très basses températures, on stabilise les denrées à -18°C. Ce procédé permet de stopper l'activité bactérienne et garantit ainsi la qualité sanitaire des denrées alimentaires. La surgélation permet de conserver plusieurs mois la viande. Elle est très utilisée pour la commercialisation des produits à des pays tiers. Par exemple, en 2018, la France a importé 333 700 tonnes équivalent carcasses de gros bovins dont 104 000 sous forme congelée (FranceAgriMer, 2018a). Néanmoins, ce mode de conservation peut impacter la qualité de la viande en particulier son pouvoir de rétention en eau, sa couleur et sa tendreté après décongélation (James et James, 2002 ; Leygonie *et al.*, 2012).

1.2.1.5 Fragmentation, viandes hachées

Les viandes peuvent être fragmentées mécaniquement pour la production de viandes hachées, chair à saucisse ou encore émulsions à pâte fine.

Les viandes hachées sont des viandes bovine, porcine, ovine, caprine et chevaline désossées qui ont été fragmentées et contenant moins de 1 % de sel (Commission européenne, 2004a) sauf pour l'appellation 100 % [nom de l'espèce] où l'ajout de sel est interdit. Les mélanges de viandes hachées fabriquées à partir de viandes d'espèces différentes restent des viandes hachées au sens du paquet hygiène1 défini par l'ensemble de textes législatifs adoptés par l'Union européenne.

[18] https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-N2013-8083/telechargement [Consulté le 24/01/2020]

Les matières premières doivent provenir d'ateliers de découpe agréés et ne doivent pas excéder 6 jours après abattage pour la viande réfrigérée et 15 jours après abattage pour la viande bovine conditionnée sous vide. Les viandes congelées peuvent être utilisées pour la fabrication de viandes hachées surgelées ou congelées.

Les viandes hachées ne peuvent pas être obtenues à partir de parage de muscles, de viandes séparées mécaniquement, de viandes de la tête, carpe, tarse, queue, diaphragme, de cœur, de langue ou de viandes contenant des fragments d'os ou de peau.

Les préparations de viandes hachées (Commission européenne, 2004a) doivent contenir au moins 51 % de viande et peuvent contenir les parages de muscle, des chutes de découpe. Les VSM « haute qualité » de porc, volaille, lapin peuvent être utilisées pour la fabrication des préparations de viande hachée destinées à être consommées après cuisson. L'utilisation de protéines végétales doit être conforme au règlement (CE) n°1830/2003 du Parlement européen et du Conseil du 22 septembre 2004 (Commission européenne, 2003a) qui instaure l'obligation de traçabilité des OGM et de leurs dérivés alimentaires. Les viandes hachées et les préparations de viandes hachées doivent satisfaire au minimum aux critères microbiologiques fixés par le règlement (CE) n°2073/2005 (Commission européenne, 2005).

La teneur en matière grasse et le rapport collagène/protéines de viandes hachées doivent satisfaire aux limites réglementaires définies par le règlement (UE) n°1169/2011 (Union européenne, 2011) depuis le 1er janvier 2014.

Catégorie de viande hachée	Taux de matière grasse (MG en %)	Rapport collagène sur protéines de viande (C/P en %)
Viande hachée maigre	≤ 7	≤ 12
Viande hachée pur bœuf	≤ 20	≤ 15
Viande hachée contenant du porc	≤ 30	≤ 18
Viande hachée d'autres espèces	≤ 25	≤ 15

Les critères microbiologiques réglementaires applicables aux viandes hachées et aux préparations de viandes hachées diffèrent selon que les produits sont destinés à être consommés crus ou cuits (Commission européenne, 2005).

Viande hachée destinée à être consommées crue

Microorganisme	n	c	Limite (m=M)	Méthode de référence (3)	Stade d'application
L. monocytogenes **(2)** (denrées permettant la croissance de Lm)[7]	5	0	absence ds 25 g	EN/ISO 11290-1	denrée chez le producteur
	5	0	100 ufc/g	EN/ISO 11290-2	produits sur le marché jusqu'à DLC si étude de durée de vie
Salmonella **(2)**	5	0	absence ds 25 g	EN/ISO 6579	produits sur le marché jusqu'à DLC

Viande hachée destinée à être consommée cuite

Microorganisme	n	c	Limite (m=M)	Méthode de référence (3)	Stade d'application
Salmonella **(2)** (viandes des autres espèces que volailles)	5	0	absence ds 10 g	EN/ISO 6579	produits sur le marché jusqu'à DLC

Préparation de viande hachée destinée à être consommées cuite

Microorganisme	n	c	Limite (m=M)	Méthode de référence (3)	Stade d'application
Salmonella **(2)** (viandes des autres espèces que volailles)	5	0	absence ds 10 g	EN/ISO 6579	produits sur le marché jusqu'à DLC

m = seuil limite en dessous duquel tous les résultats sont considérés comme satisfaisants.
M = seuil limite d'acceptabilité au-delà duquel les résultats ne sont plus considérés comme satisfaisants.
n = nombre d'unités composant l'échantillon.
c = nombre d'unités de l'échantillon donnant des valeurs situés entre m et M.

ufc := unité formant colonie

Source : GEMRCN (2015)

Ce type de produit est très sensible aux développements bactériens et quelques épidémies d'intoxications alimentaires sont à déplorer ces dernières années (Delmas *et al.*, 2010).

La fraude est également plus aisée, en incluant par exemple des muscles issus d'autres espèces à moindre valeur ajoutée (p. ex. le scandale associé à la substitution de viande bovine par de la viande équine dans la viande hachée incorporée aux lasagnes), malgré les nombreuses méthodes développées ces dernières années pour détecter des viandes illicites dans les préparations de viandes hachées (Chen *et al.*, 2019 ; Deniz *et al.*, 2018; Li et Guan, 2019).(Voir section authentification du chapitre 2).

Cependant, le problème révèle la nécessité de développer des méthodes supplémentaires complémentaires aux approches existantes pour lutter efficacement contre la fraude (Cavin *et al.*, 2018).

1.2.1.6 Salage

Il est généralement accepté que le procédé de salage comme méthode principale de conservation des aliments remonte à 3 000 ans avant JC. Plus récemment l'invention de la réfrigération et des technologies d'emballage a complété ces méthodes de préservation.

Le salage au sel sec (chlorure de sodium ou NaCl) essentiellement destiné aux produits secs permet d'abaisser l'activité de l'eau, et par conséquent, d'inhiber les développements bactériens de sorte que le produit peut ensuite être séché à l'air sans putréfaction. Ce procédé présente l'avantage d'être peu onéreux mais il nécessite une étape de dessalage (par immersion dans des bains d'eau douce), de fumage et/ou de séchage avant que le produit puisse être consommé.

Pour d'autres types de produits, et en particulier des produits qui sont suivi de cuisson, le salage est réalisé par immersion ou injection de saumure (eau salée). Dans ce cas, le produit n'est pas destiné à un séchage, mais plutôt à une cuisson lente à basse température (type jambon cuit, rôti cuit). Le saumurage limite les développements bactériens et améliore sensiblement le pouvoir de rétention d'eau à la cuisson (Offer et Knight, 1988). Sur le plan physicochimique, le sel augmente la force ionique du milieu et conduit à la dénaturation de certaines protéines musculaires qui se solubilisent avec un maximum de solubilisation de la myosine pour 1 M de NaCl (58,8 g/litre). Au-delà de cette valeur, la solubilisation diminue avec le taux de sel (Offer et Knight, 1988). Le saumurage entraîne une augmentation de volume des différentes structures (myofibrilles, fibres musculaires, muscle) (Offer et Knight, 1988 ; Xiong, 2005). L'intercalage des ions Cl^- entre les myofilaments (Hamm, 1986) ou entre les molécules de myosine (Offer et Knight, 1988) créerait de la place disponible pour retenir les molécules d'eau dans le produit (Ruusunen et Puolanne, 2005).

L'ajout d'additifs dans la saumure, tels que les polyphosphates, augmente la rétention d'eau dans les produits saumurés cuits (Offer et Knight, 1988 ; Xiong, 2005; Xiong *et al.*, 2000) améliorant de fait les qualités technologiques alors que les qualités sensorielles sont dégradées.

De nombreuses études scientifiques ont montré que la surconsommation de sel est associée à une augmentation de la pression artérielle et de la fréquence d'apparition de maladies cardiovasculaires (Karppanen et Mervaala, 2006; Meneton *et al.*, 2005) et de cancer de l'estomac (Cohen *et al.*, 2006; Peleteiro *et al.*, 2011 ; Tsugane, 2005).

Dans les pays développés, la consommation moyenne de NaCl est comprise entre 10 et 12 g par jour alors que les organismes de santé publique comme le *Consensus Action on Salt and Health* recommandent un apport journalier de 6 g. Les matières premières alimentaires sont peu concentrées en NaCl, cet élément est ajouté dans les denrées au cours des procédés de transformation. Dans les pays industrialisés 80 % du sel consommé provient des produits industriellement transformés dont 20 % provenant des produits carnés (plats préparés, produits de charcuterie).

C'est en réalité le sodium qui est responsable de ces problèmes sanitaires, le chlore n'étant pas incriminé. Pour réduire la quantité de sodium dans les produits carnés divers substituts du NaCl ont été testés (KCl, $MgCl_2$) avec plus ou moins de succès car ces sels donnent un goût amer ou métallique à l'aliment (Desmond, 2006).

1.2.1.7 Marinage

Les marinades sont plus rarement appliquées. Elles consistent à immerger les muscles ou filets de poisson dans une solution constituée de divers ingrédients (vin, aromates, épices…). Qu'elles soient acides ou basiques, les marinades entraînent le gonflement des cellules et augmentent la rétention d'eau de la viande (Offer et Knight, 1988). Les marinades peuvent modifier la flaveur des produits et leur texture. Une marinade acide attendrit la viande par une action sur le tissu conjonctif intramusculaire (Aktas et Kaya, 2001a ; 2001b ; Chang *et al.*, 2010 ; Ke *et al.*, 2009).

1.2.1.8 Fermentation

La fermentation de la viande est une méthode de conservation traditionnelle utilisée pour améliorer la durée de conservation des produits carnés fermentés tels que saucisse et saucissons secs. Le procédé consiste en un certain nombre d'étapes : une acidification par fermentation des sucres, une baisse de l'activité de l'eau (Aw) par l'addition de sel, un séchage par évaporation de l'eau. Ces conditions physico-chimiques permettent d'inhiber la croissance des bactéries aérobies en créant un environnement anaérobie. De plus l'addition de nitrate ou de nitrite inhibe la croissance microbienne, et qu'une étape de fumage peut renforcer dans certaines recettes. Il existe une grande variété de saucisses fermentées. Le plus souvent, elles sont produites à base de deux tiers de la viande maigre (porc ou bœuf) et un tiers du gras, presque toujours du lard de porc. La viande est coupée et mélangée avec le lard, des épices, du sel, du sucre, du sel nitrité et des bactéries lactiques mélangées à d'autres bactéries telles que *Staphylococcus xylosus* ou *S. carnosus*. Après embossage dans des boyaux naturels ou synthétique, le procédé de fermentation s'opère. Les bactéries lactiques convertissent le sucre en acide lactique, lequel conduit à une diminution du pH de de 5,8 à 5,3–4,6 environ, en fonction de la quantité des sucres présents. Outre l'acidification, la fermentation des viandes conduit à la solubilisation et la gélification de certaines protéines myofibrillaires et sarcoplasmiques, la dégradation totale ou partielle de protéines et de lipides, la réduction des nitrates en nitrites, la formation de nitrosomyoglobine. Les phases de séchage et d'affinage sont effectuées dans des hâloirs dont la température et l'humidité sont contrôlées. La fermentation de la viande provoque de nombreux changements physiques, biochimiques et microbiens, qui confèrent à ces produits des propriétés fonctionnelles, des caractéristiques sensorielles et nutritionnelles et inhibent la croissance de divers micro-organismes pathogènes et d'altération. Les saucisses sèches fermentées sont de plus en plus utilisées comme vecteur de probiotiques. La production d'amines biogènes au cours de la fermentation peut être contrôlée en choisissant des ferments appropriés, en sélectionnant les matières premières tout en maitrisant l'hygiène et la température (Kumar *et al.*, 2017).

1.2.1.9 Fumage

Au cours des dernières décennies, le fumage a été largement appliqué pour limiter le développement microbien mais il est actuellement remis en cause en raison de la formation de composés délétères pour la santé que sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP (Simko, 2002). Néanmoins, le fumage peut être considéré comme une méthode pour

produire des produits à haute valeur ajoutée issus de poissons de faible valeur. Il faut souligner l'augmentation rapide de la production annuelle de saumon fumé (de 850 000 tonnes en 1985 à 1,460 million de tonnes en 2018), qui a été de pair avec les travaux scientifiques menés sur le processus de fumage, les conditions de stockage et l'impact sanitaire.

La technologie du fumage est de plus en plus utilisée de nos jours pour conférer des caractéristiques organoleptiques particulières aux poissons et pour maintenir et prolonger la durée de conservation de ces produits périssables. Cette opération peut être réalisée à froid ou à chaud. Une grande variété de bois est utilisée pour fumer, notamment le chêne, le noyer, l'acajou, le pin, le cerisier, l'aulne, le hêtre, le bouleau et l'érable pour conférer diverses saveurs et couleurs.

Les effets antimicrobiens et antioxydants du fumage ont récemment fait l'objet d'une étude approfondie. Diverses méthodes de fumage sont appliquées dans le monde entier, principalement pour des groupes d'espèces tels que le saumon et d'autres poissons et fruits de mer. Malgré les avantages évidents du procédé, il existe également un certain nombre de risques liés à la consommation de produits fumés. L'un des exemples les plus représentatifs est l'épidémie de divers cancers fréquents dans des pays tels que le Nigéria et les pays baltes en raison de la forte teneur des aliments en HAP générés par le procédé. En outre, de nombreuses études ont démontré que le fumage réalisé avec des gaz de combustion pyrolytiques est une source de pollution environnementale. Ces faits peuvent avoir un impact significatif sur l'acceptation de ces produits par les consommateurs. La revue de Ledesma *et al*. (2016) s'est focalisée sur les produits à base de viande contaminés par des HAP cancérogènes suite un procédé de fumage. Le processus de génération de fumée (température de pyrolyse et flux d'air), la distance et la position entre l'aliment et la source de chaleur, la teneur en matière grasse du produit et son oxydation, la durée d'application, la température mais aussi des critères en lien avec les installations (la conception de la chambre de fumage et de l'équipement) impacte le niveau de contamination par les HAP des viandes fumées.

Le procédé de fumage nécessite une préparation en amont des poissons en lien avec la qualité hygiénique des produits. Les poissons à fumer doivent être frais car la qualité du produit final dépend directement de la qualité de la matière première. Le nettoyage des poissons, l'éviscération, la levée des filets, le salage le cas échéant et la suspension sont les étapes critiques en amont du fumage. Le processus de fumage peut varier en termes de température d'application, de densité de fumée et de concentration en substances antimicrobiennes. Des exemples sont reportés dans le tableau 1-7.

Lorsque le bois est utilisé comme combustible pour le fumage du poisson, des composés phénoliques sont libérés. Ces composés protègent le poisson des microorganismes nuisibles et réactions d'oxydation et confère aux aliments fumés des caractéristiques organoleptiques particulières. En fonction des espèces d'arbre, la concentration de substances phénoliques varie (Conde *et al.*, 2006). La méthode la plus courante pour le fumage est la combustion lente du bois (processus de fumage à froid et à chaud). Il existe cependant d'autres méthodes qui font appel à des plaques thermostatées ou une atomisation par friction ou par fumée liquide. En 2002, 65 % des poissons fumés l'ont été par combustion lente, 30 % avec des plaques thermostatées et 5 % avec une vaporisation.

Un des désavantages de la combustion lente est la production d'HAP due à une combustion incomplète. La pulvérisation de fumée liquide obtenue par condensation de la fumée du bois, limite la production d'HAP. De plus, la conservation des aliments fumés dans des emballages en polyéthylène peut limiter considérablement la production d'HAP.

Le fumage du poisson lorsqu'il est réalisé à chaud permet de satisfaire les conditions requises pour les aliments prêts à consommer. La numération bactérienne totale est égale à 10^2 UFC par cm^2 de peau environ. En général, la contamination par des bactéries pathogènes (*Clostridium botulinum*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* et *Vibrio parahaemolyticus*) est très faible. Cependant dans des locaux où les conditions d'hygiène sont moins bien maitrisées, la contamination peut augmenter en raison de procédures de la rotation des tâches et/ou de microorganismes en suspension dans l'air au moment de la phase d'emballage du produit. Il se trouve que fumer à chaud dans des conditions de température dans le poisson ne dépassant pas 65°C et avec une faible concentration de sel n'inactive pas tous les agents pathogènes ni n'inhibe les bactéries pendant le stockage. Dès lors, il est absolument nécessaire de maitriser la charge microbiologique du poisson (poisson très frais manipulé dans des conditions hygiéniques) et de refroidir le produit à 2°C. A titre indicatif, la durée de conservation du maquereau légèrement fumé à chaud et conservé à une température d'environ 2°C est de 3 semaines environ. L'utilisation de conservateurs pour prolonger la durée de conservation du poisson fumé fait l'objet d'études.

Tableau 1-7 : Exemple représentatif de procédé de fumage et produits associés (d'après Arvanitoyannis et Kotsanopoulos 2012)

Species	Smoke process	Food product
Mackerel (fillets)	Hot	Smoked mackerel
Herring (fillets)	Cold	Kipper fillets
Haddock	Cold	Haddock
Salmon (gutted, split)	Cold	Smoked salmon
Trout (gutted, split)	Cold/hot	Smoked trout
Eel (gutted)	Cold/hot	Smoked eel

Le fumage à froid est défini par les caractéristiques des protéines de la chair de poisson présentant une coagulation incomplète et/ou l'absence de dénaturation.

Un certain nombre de procédures de fumage à froid impliquent une étape de séchage sans fumée ajoutée au produit. La durée et la température de cette étape de « séchage initial » constituent « l'art » de fumer du poisson et dépendent de l'espèce de poisson, de sa teneur en graisse et de son humidité. L'étape de fumage doit être appliquée avant qu'une pellicule (couche ressemblant à de la peau séchée) se forme en surface des filets de poisson pour une meilleure efficacité. Habituellement, les poissons sont suspendus pour éviter tout contact entre eux et sont exposés de manière uniforme à la fumée. Les fumoirs ou fours traditionnels permettent un flux d'air naturel généralement par convection. Les fumoirs modernes contrôlent le flux d'air de manière mécanique ou électrique.

1.2.1.10 Séchage et affinage des produits carnés

Le séchage de la viande et des poissons est le plus souvent consécutif à une opération de salage au sel sec, souvent additionné de nitrite et parfois des nitrates, ou de fumage. L'opération de séchage permet de conserver les aliments en éliminant l'humidité et en réduisant l'activité de l'eau de la viande (Parthasarathy et Bryan, 2012) et par conséquent le risque de développement de germes pathogènes et d'altération. L'ajout de nitrites protège de l'oxydation des lipides, contribue à la formation d'une couleur et d'une saveur spécifiques (Sindelar et Milkowski, 2012). Les nitrates peuvent être réduits en nitrites pour remplir les mêmes fonctions au cours du temps de séchage. Dans ce cas les nitrates présents naturellement dans la viande ou ajoutés artificiellement au sel sec doivent être converti en nitrite par la flore bactérienne de la viande ou par addition de bactéries possédant une activité nitrate réductase.

Le procédé de séchage initialement conduit « à l'air libre » est aujourd'hui industriellement mis en œuvre dans des séchoirs perfectionnés qui permettent une excellente maitrise de la température et du degré d'hygrométrie, ce qui limite très sensiblement le risque de perte par putréfaction. Le procédé est néanmoins très long, d'autant plus si la teneur en sel a été réduite pour des raisons sanitaires mais aussi sensorielles (p. ex. jusqu'à 36 mois pour les jambons de Parme). Des études sont conduites pour tenter de réduire ces durées de séchage tout en préservant les qualités du produit (Bosse *et al.*, 2018)

Une difficulté majeure dans la filière consiste à suivre l'évolution de la transformation du jambon tout au long de son process. La variabilité de la matière première (jambons frais – pH, taux de lipides, poids…) peut entrainer l'opérateur à faire varier les conditions environnementales pour obtenir une qualité homogène des jambons commercialisables. Encore faut-il accéder aux informations d'évolution de composition dans le jambon sans faire de prélèvement. De récentes recherches ont été entreprises pour identifier des méthodes de caractérisation non invasives telles que l'IRM, la spectroscopie infrarouge, la microtomographie X ou encore les ultra-sons (Perez-Santaescolastica *et al.*, 2019).

1.2.1.11 Cuisson

Le traitement thermique est une technique physique normalement utilisée pour modifier les propriétés des aliments et notamment de la viande. L'application du traitement thermique conduit à des changements à la fois physique et chimique de la viande, y compris les changements protéiques qui vont moduler des attributs sensoriels comme la texture, la capacité de rétention d'eau, la jutosité, la couleur et la saveur. De plus de nombreux changements morphologiques s'opèrent dans le

tissu musculaire pendant le chauffage (Astruc *et al.*, 2007 ; Astruc *et al.*, 2010 ; Palka et Daun, 1999 ; Purslow, 1985) quelle que soit l'espèce considérée. Le traitement thermique peut induire des changements au sein de la viande, ce qui se traduit par une dénaturation protéique et des pertes en eau et protéines solubles. Par ailleurs la myoglobine et son pigment le fer héminique responsable de la couleur de la viande va voir son fer héminique s'oxyder à la chaleur. Cela se traduit par un brunissement de la viande. La myoglobine est dénaturée dès 80°C (Lawrie, 1994; Suman et Joseph, 2013).

En fonction des modes de cuisson (couple temps/température ; en présence d'humidité…) l'impact sur les attributs sensoriels de la viande est variable. L'objectif est toujours le même : obtenir une texture et une tendreté optimale, une saveur et du plaisir à consommer de la viande. Les traitements thermiques varient considérablement d'un pays à l'autre en fonction de facteurs environnementaux, économiques et culturels. Il y a beaucoup de méthodes de cuisson mais les plus largement utilisées sont le grill, le rôtissage et la friture (Obuz *et al.*, 2003).

Le rôtissage ou cuisson au four

C'est une méthode de cuisson traditionnelle, d'application de chaleur sèche, avec une petite quantité de graisse ou d'huile. L'évaporation en surface de la viande peut conduire à la formation d'une croûte et à celle de certains composés mutagènes, les amines hétérocycliques (AHA) dès 180°C. Des travaux de Skog et Jagerstad (1991) ont montré une diminution de la production des AHA pour des hamburgers de poulet et de bœuf cuits dans un four à chaleur humide ; cela en raison de l'abaissement de la température de surface des aliments.

- Grillage

Le grillage est une méthode de cuisson à la chaleur rapide et sèche, principalement par rayonnement thermique. Les aliments sont en contact avec une surface dont la température dépasse souvent 260°C. Ce mode de cuisson confère à la viande un arôme distinctif grâce à un processus chimique appelé la réaction de Maillard dont certains produits sont nocifs pour la santé.

- Friture

Avec ce mode cuisson, les aliments sont immergés dans de l'huile ou de la graisse chaude. C'est une méthode de cuisson sèche parce que sans eau. La température de friture correcte est souvent comprise entre 175°C et 190°C. C'est une méthode de cuisson très rapide et un croustillant se développe. Les AHA produits par cette technique de friture sont inférieurs à 1 ng/g.

Effet de la cuisson sur les protéines (Shabbir *et al.*, 2015)

Table 1 Effect of cooking temperature on meat proteins

Degree of doneness	Internal core temperature (±2°C))	Internal description	Approximate oven roasting times @ 160–180°C for primal	Touch test descriptions for grills and pan-fried cuts
Very rare	40–45°C	Internal deep red color, very moist with warm juices, red color	18–20 minutes per 500 g 10–15 minutes resting	Very soft to touch
Rare	45–50°C	Internal very red color, very moist with warmer juices, quite red in color	20–25 minutes per 500 g 10–15 minutes resting	Soft to touch
Medium rare	55–60°C	Internal lighter red color, moist with pink, warm juices	25–30 minutes per 500 g 10–15 minutes resting	Soft and springy to touch
Medium	60–65°C	Internal pink red color, moist with clear pink juices	30–35 minutes per 500 g 10–15 minutes resting	Firm and spongy
Well done	70–75°C	Internal light gray color, a little moist with clear or no pink juices	30–40 minutes per 500 g 10–15 minutes resting	Firm to touch
Very well done	75–80°C	Internal stone gray color, dry with clear or no sign of juices	40–45 minutes per 500 g 10–15 minutes resting	Very firm to touch

Le traitement thermique dénature les protéines selon un gradient de température : à basse température, la myoglobine est peu modifiée et la couleur de la viande reste rouge ou rose. A plus haute température, la myoglobine et l'ensemble des protéines solubles sont dénaturées : la couleur est grise/marron.

L'effet de la cuisson sur certains contaminants a été évaluée par les travaux de Tressou *et al.* (2017). Ils ont montré qu'il était préférable de bien cuire la viande : concernant les DL-PCB (*dioxine-like PCB*), une intensité de cuisson de type bien cuit réduit de 20 % leur concentration (0,058 pg WHO-TEQ2005 pour cuisson bien cuit et 0,066 et 0,069 pg WHO-TEQ2005 pour des intensités de cuisson saignant et moyenne respectivement).

La cuisson est susceptible de générer la formation de néocomposés. Les amines aromatiques hétérocycliques (AHA) sont formées lors du traitement thermique des aliments riches en protéines, notamment la viande et les produits carnés (Pais *et al.*, 1999). Les amines aromatiques et les AHA sont des classes de cancérogènes apparentées sur le plan structurel qui se forment lors de la combustion du tabac ou lors de la cuisson à haute température des viandes. Les deux classes de procarcinogènes subissent une activation métabolique par N-hydroxylation du groupe amine exocyclique pour produire un intermédiaire commun, qui est le métabolite essentiel impliqué dans la toxicité et les dommages au niveau de l'ADN. Toutefois les propriétés chimiques de ces composés sont distinctes et différents biomarqueurs d'amines aromatiques et d'AHA ont été développés pour les études de surveillance chez l'homme. Un certain nombre d'études épidémiologiques portant sur la consommation alimentaire de viande bien cuite en relation avec différents sites tumoraux ont montré une association positive entre le risque de cancer et la consommation de viande bien cuite, bien que certaines études n'aient montré aucune association entre la viande bien cuite et le risque de cancer. L'incertitude dans les estimations quantitatives de l'exposition chronique aux AHA constitue un facteur limitant majeur dans la plupart des études épidémiologiques.

La formation d'AHA dans les viandes traitées thermiquement dépend de nombreux facteurs, y compris des méthodes de cuisson, de la température, la durée de cuisson et type de viande. La cuisson à haute température de la viande produit des AHA et leur concentration varie selon les conditions dans une gamme allant de 1 à 100. La quantité d'AHA augmente avec la température et la durée de la cuisson (Knize *et al.*, 1994).

Les AHA les plus courants sont le 2-amino-1-méthyl-6-phénylimidazo [4,5-b] pyridine (PhIP) et 2-amino 3,8-diméthylimidazo [4,5-f] quinoxaline (8-MeIQx) formés dans la volaille grillée, le bœuf, le poisson et le bacon (Knize *et al.*, 1994). Le tableau ci-dessous résume les principales amines hétérocycliques. En termes de mécanismes de formation, les acides aminés, la créatine et les hexoses de la viande agissent en tant que précurseurs pour la formation de ces composés mutagènes (Jagerstad *et al.*, 1984).

La créatine contribue à la formation de l'amino-imidazole par cyclisation et élimination de l'eau. Les produits de dégradation Strecker sont responsables de la formation d'imidazoquinolines et d'imidazoquinoxalines (IQ) mutagènes. Le 7,8-DiMeIQx se forme lorsque le glucose a été chauffé avec de la glycine, et créatine à 130°C pendant deux heures (Jagerstad *et al.*, 1984). Nyhammar (1986) a proposé un mécanisme complet pour produire des composés mutagènes comme les IQ. Il a été suggéré que la réaction de condensation se produit entre la créatine et l'aldéhyde avant la réaction avec la pyrazine ou la pyridine. Une autre hypothèse implique des réactions radicalaires où les produits résulteraient de la réaction entre la créatinine et radicaux libres d'alkylpyridine (Pearson *et al.*, 1992).

D'un point de vue quantitatif, les données obtenues à partir de divers produits alimentaires, notamment à base de viande et de poisson, suggèrent que le niveau pour PhIP, principale AHA est de 480 ng/g de produits. Les niveaux des AHA restants sont extrêmement bas ; même ceux-ci ne sont pas détectés dans certains produits carnés et se situent principalement entre 50 ng/g pour MeIQx et 15 ng/g pour 4,8-DiMeIQx, MeIQ et IQ (Rivera *et al.*, 1996). C'est au niveau de la croûte de la viande cuite que ces quantités sont décelées. Dans le bœuf grillé, la quantité de IQ est de 1,5 ng/g. La fumée des viandes générée lors de la cuisson contient également des AHA, que la viande soit grillée ou frite (Thiebaud *et al.*, 1995; Vainiotalo et Matveinen, 1993).

Chemical Names of HAAs	Abbreviation	Year of discovery
3-Amino-1,4-dimethyl-5H-pyrido 4,3-b indole	Trp-P-1	1977
3-Amino-1-methyl-5H-pyrido 4,3-b indole	Trp-P-2	1977
2-Amino-5-phenylpyridine	Phe-P-1	1977
2-Amino-6-methyldipyrido 1,2-a:3,2 -d imidazole	Glu-P-1	1978
2-Aminodipyrido 1,2-a:3,2 -d imidazole	Glu-P-2	1978
2-Amino-9H-pyrido 2,3-b indole	A a C	1978
2-Amino-3-methyl-9H-pyrido 2,3-b indole	MeA a C	1978
2-Amino-3-methylimidazo 4,5-f quinoline	IQ	1980
2-Amino-3,4-dimethylimidazo 4,5-f quinoline	MeIQ	1980
2-Amino-3, 8-dimethylimidazo 4,5-f quinoxaline	MeIQx	1981
4-Amino-6-methyl-1 H-2, 5, 10, 10b-tetraazafluoranthene	Orn-P-1	1981
2-Amino-3,7,8-trimethylimidazo 4,5-f quinoxaline	7,8-DiMeIQx	1984
2-Amino-3,4,8-trimethylimidazo 4,5-f quinoxaline	4,8-DiMeIQx	1985
2-Amino-1-methyl-6-phenylimidazo 4,5-b pyridine	PhIP	1986
2-Amino-3-methylimidazo 4,5-f quinoxaline	IQx	1988
2-amino-1,5,6-trimethyl-imidazopyridine)	TMIP	1988
4-Amino-1,6-dimethyl-2-methylamino-1H,6 H-pyrrolo 3,4-f benzimidazole-5,7-dione	Cre-P-1	1991
2-Amino-1-methyl-6- 4-hydroxyphenyl imidazo 4,5-b pyridine	4 -OH-PhIP	1992
2-Amino-4-hydroxymethyl-3,8-dimethylimidazo 4,5-f quinoxaline	4-CH OH-8-MeIQx	1994
2-amino-3,4,7,8-tetramethylimidazo[4,5-f]quinoxaline	4,7,8-TriMeIQx	1992
2-Amino-1,7,9-trimethylimidazo 4,5-g quinoxaline	7,9-DiMeIgQx	1994

Tableau 1-8 : Découverte et nomenclature des différentes AHA (Shabbir *et al.*, 2015)

D'autres produits néoformés apparaissent au cours de la cuisson de viandes préalablement saumurées à l'aide de sel nitrité. En effet, les recherches et la monographie du IARC ont souligné un risque concernant l'exposition des consommateurs à certains produits nocifs pouvant se former dans les produits de charcuterie (nitrosamines), **surtout quand ceux-ci sont poêlés ou passés au four** (Herrmann *et al.*, 2015). Dans cette optique, les travaux de recherche s'orientent vers les moyens de réduire le risque de formation de nitrosamine par la substitution de nitrite avec des ingrédients alternatifs ayant des caractéristiques comparables sans causer de danger pour la santé. C'est aussi un défi pour l'industrie de la viande que de rechercher des stratégies réduire les nitrites additionnés et résiduels dans la viande à partir de sources naturelles et d'autres techniques de conservation telles que les hautes pressions (en anglais, *high pressure processing* ou HPP). Des légumes comme le céleri, les épinards, le radis et la laitue peuvent contenir jusqu'à 2 500 mg de nitrate/kg. Le jus de céleri et la poudre de céleri sont fréquemment utilisés comme sources de nitrates naturels, car ils ne confèrent pas de mauvais goût ou de goût inhabituel aux produits de charcuterie. Certains acides organiques comme le lactate, le sorbate et le citrate ont également des propriétés antimicrobiennes à la fois contre les microorganismes aérobies et anaérobies dans la viande et des travaux sont menés en ce sens.

Concernant l'alternative au sel et au nitrite dans les produits de charcuterie, l'utilisation de traitement technologique comme les HPP se révèle très à propos. Les travaux de Pietrzak *et al*. (2007) ont démontré que le traitement HHP (600 MPa, 31 C,

6 min) améliore considérablement la durée de conservation des jambons emballés sous vide à teneur réduite en sel et nitrite de sodium.

1.2.2. Trajectoires et procédés de transformations dans la filière lait

1.2.2.1 Production et collecte de lait

La fabrication de produits laitiers représente en valeur autour de 16 % de la production de l'industrie agro-alimentaire française (CNIEL, 2017). En France, la production de lait de vache occupe une place prépondérante par rapport à celle de lait de chèvre ou de brebis, en termes de cheptel et de volumes produits (tableau 1-9). En France, la très grande majorité du lait de vache (>98 %) et dans une moindre mesure de lait de brebis (93,6 %) est collecté par l'industrie laitière. La proportion du lait de chèvre transformé directement à la ferme est plus importante si bien que la collecte ne concerne que 76 % du lait produit.

Tableau 1-9. Effectif de femelles laitières, volume de lait produit et part collectée par l'industrie laitière (2017).

	Vache	Chèvre	Brebis
Effectif (1000 têtes)	3 591	851	1 247
Lait produit (millions de litres)	24 323	618	305
Lait collecté par l'industrie (%)	98,1	76,0	93,6

Source : CNIEL (2019)

Après la traite, réalisée de façon mécanique (machine à traire ou robot de traite), le lait est stocké à la ferme dans un tank à lait où il est réfrigéré à des températures voisines de 4°C (ne pouvant pas dépasser 12°C). Après une durée maximale de conservation à la ferme de 72 h, le lait du tank de chaque producteur est collecté dans un camion-citerne réfrigéré où il est mélangé au lait des autres producteurs de la tournée du collecteur. Ce lait de mélange est alors acheminé dans les laiteries où il est mélangé avec le lait d'autres tournées de collecte et stocké au froid dans des tanks de plus grande capacité jusqu'à son utilisation (Figure 1-16).

Environ 24 millions de tonnes de lait de vache ont été collectés en France en 2017. Ce lait a été utilisé pour la production d'une multitude de produits laitiers différents, qui vont des produits les plus traditionnels comme les laits conditionnés, la crème, le beurre, les yaourts ou les fromages jusqu'à des constituants extraits du lait ou des co-produits de la fabrication du fromage et du beurre. Ces produits sont fabriqués par plus de 60 000 salariés dans 734 établissements (CNIEL, 2019). Ce tissu industriel est constitué à la fois de très grands groupes à renommée mondiale (Lactalis, Danone, Bongrain, Bel…), de coopératives importantes (Sodiaal, Laita…) et de nombreuses PME-PMI, exerçant leur activité dans la transformation fromagère principalement, ce qui contribue indéniablement à maintenir la diversité de celle-ci. Les fusions et les regroupements animent en permanence le secteur laitier si bien que plus de 75 % du lait collecté en France est aujourd'hui transformé par seulement quelques groupes industriels et coopératifs dans une trentaine d'établissements.

La production de fromages et de matières grasses laitières (incluant les beurres et autres matières grasses laitières concentrées) valorise environ 55 % de la matière sèche utile (protéines et matières grasses) du lait collecté. La production de lait et de crème conditionnés, de yaourts et de desserts lactés utilise environ 24 % du lait collecté et enfin, la production de lait en poudre en utilise 15 %. L'essentiel de la transformation en volume du lait collecté est ainsi à l'origine des produits de grande consommation, très diversifiés en termes de qualité organoleptique, de fonctionnalités et de présentation (Figure 1-16).

Figure 1-16 : Utilisation du lait pour la fabrication de produits laitiers en 2018 – Valeurs exprimées en pourcentage de la matière sèche utile (MSU : protéines et matières grasses) du lait (CNIEL, 2019)

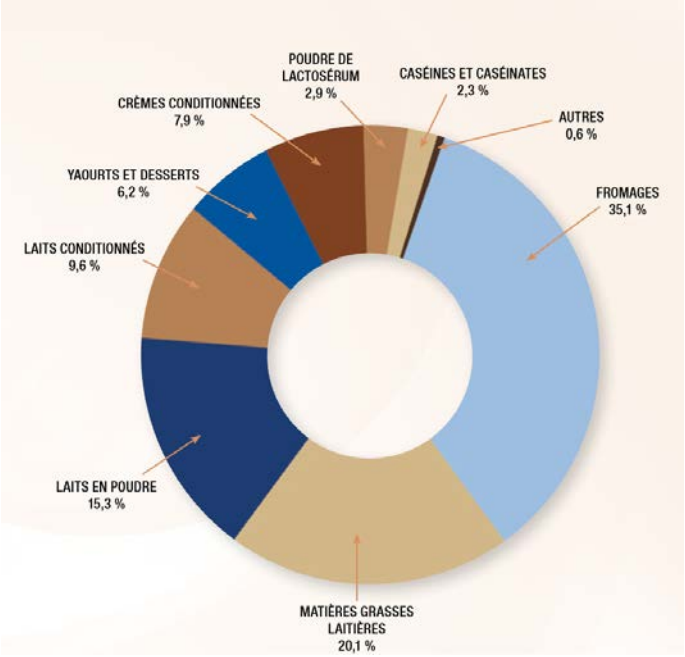


Figure 1-16 : Extrait de CNIEL (2017)

Ces différentes fabrications génèrent également des co-produits, le principal étant le lactosérum, issu de la fabrication des fromages. Ce co-produit, traditionnellement utilisé sous forme liquide pour l'alimentation des porcs, subit le plus souvent un séchage. Les poudres de lactosérum (2,9 % de la MSU du lait collecté) rentrent dans la formulation d'aliments pour les porcelets ou pour les veaux et sont aussi largement utilisées en alimentation humaine (panification, crèmes glacées, charcuteries, pâtisseries) en raison de leurs pouvoir moussant et de leur capacité à fixer de l'eau. Grace au développement continu depuis plusieurs décennies, des technologies de séparation des constituants du lait (dites de *craking*) le lactosérum, puis le lait sont devenus progressivement des sources d'ingrédients laitiers certes limités en volume mais à haute valeur ajoutées (protéines, peptides, minéraux, lactose…). Les propriétés fonctionnelles et/ou nutritionnelles de ces molécules les rendent incontournables dans la formulation de nombreux produits alimentaires et pharmaceutiques.

Les Français sont les plus forts consommateurs au monde de beurre et parmi les plus forts consommateurs de fromages et de yaourts alors que la consommation de laits liquides et de boissons lactées est relativement faible en France comparativement aux autres pays européens (Tableau 1-10).

Tableau 1-10 : Consommation de produits laitiers en Europe en 2017 (en kg par habitants) – Source : Idele et CNE (2019)

Pays	Laits liquides et boissons lactées	Beurre	Fromages
France	47,4	8,0	26,4
Allemagne	52,8	5,9	24,0
Royaume-Uni	104,6	2,7	11,8
Italie	46,6	2,5	21,7
Espagne	78,8	0,3	8,9
Pologne	39,6	4,4	18,7
Pays-Bas	42,0	4,0	21,7
Belgique	47,4	2,2	14,7
UE à 28	57,8	4,1	18,8

1.2.2.2 Les principales technologies utilisées en industrie laitière

Les procédés technologiques mis en œuvre pour la fabrication des produits laitiers sont très variés. Ils correspondent à la succession de diverses opérations unitaires de nature physique ou biochimique dont les principales caractéristiques sont décrites ci-dessous.

• **Les traitements thermiques** permettent de garantir la qualité sanitaire des produits et, conditionnent leur durée de vie et leurs caractéristiques technologiques et texturales. Ils sont caractérisés par des couples temps/température variables selon les produits et les objectifs visés. On distingue, la thermisation, la pasteurisation, le traitement UHT et la stérilisation.

• **L'écrémage,** réalisé le plus souvent par centrifugation, consiste à séparer les globules gras en suspension (la crème) du lait. La crème peut ensuite être utilisée après différents traitements thermiques pour la production de crème de consommation ou pour la production de beurre après barattage.

• **L'homogénéisation** consiste à réduire la taille des globules gras en fines gouttelettes lipidiques qui se répartissent de façon homogène dans la phase aqueuse du lait. Elle permet d'éviter la remontée de la crème à la surface, même après un entreposage de plusieurs jours. Ce procédé est utilisé dans la fabrication du lait de consommation, de yaourts et lors de la préparation du lait pour certaines technologies fromagères.

• **Le séchage** permet de transformer le lait ou différents co-produits (lactosérum) ou composés en poudre, ce qui facilite leur conservation, leur stockage et leur transport. C'est une méthode combinant évaporation sous vide et déshydratation thermique par atomisation (« spray process » : le lait est vaporisé sous forme de gouttelettes au sein d'une chambre à séchage (air chaud et sec) et est récupéré sous forme de poudre) ou par cylindre chauffant (« roller process » : le lait circule entre les parois externes de deux cylindres rotatifs proches, chauffés de l'intérieur ; il est récupéré sous forme de paillettes).

• **Les techniques de filtration** sont des procédés physiques de séparation consistant à filtrer les liquides laitiers au travers de différentes membranes de porosité contrôlée. Dans les techniques de filtration communément utilisées, on distingue la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse qui diffèrent entre elles par la taille des pores et la pression appliquée. Ces techniques de filtration sont à la base de la séparation des différents constituants du lait, selon leur taille et leurs propriétés physicochimiques.

• **La fermentation** correspond à une série de réactions biochimiques réalisées sous l'influence d'enzymes microbiennes. On distingue la fermentation lactique (transformation du lactose en acide lactique par des bactéries comme *Lactobacillus sp., Streptococcus sp., Leuconostoc sp*…) utilisée notamment dans la fabrication des fromages affinés ou des laits fermentés, de la fermentation propionique (transformation du lactose en acide propionique, acide acétique et dioxyde de carbone (CO_2) par des bactéries du genre *Propionibacterium)* qui joue un rôle important au cours de l'affinage des fromages à pâte pressée cuite (Emmental notamment). Cette technique de conservation ancestrale est utilisée pour valoriser environ la moitié du lait collecté en France.

• **La standardisation** consiste à amener le lait à une concentration donnée en matière grasse (par écrémage d'une partie du lait ou par addition de crème) ou en protéines (par ultrafiltration ou par ajout de poudre de lait ou de protéines). Ces ajustements permettent aux laiteries de s'affranchir des variations de composition naturelles de composition du lait dues aux caractéristiques des animaux, à leur alimentation ou à la saison.

• **La coagulation** correspond la transformation du lait en caillé. Elle est essentielle pour la fabrication des laits fermentés, des fromages et de certains desserts lactés. La coagulation est consécutive de la déstabilisation des micelles de caséines provoquée par une modification de leurs propriétés de surface, soit par une acidification du milieu, soit par l'hydrolyse enzymatique d'une partie de la caséine kappa. Elle est réalisée grâce à l'emploi de bactéries lactiques et/ou d'agents coagulants qui peuvent être d'origine microbienne, fermentaire, végétale ou animale (présure).

1.2.2.3 Fabrication des produits laitiers traditionnels

• Lait de consommation

En 2018, la France a produit 3 174 millions de litres de lait de consommation. Le lait peut être vendu cru mais il est généralement homogénéisé, standardisé et commercialisé après avoir subi un traitement thermique (pasteurisation,

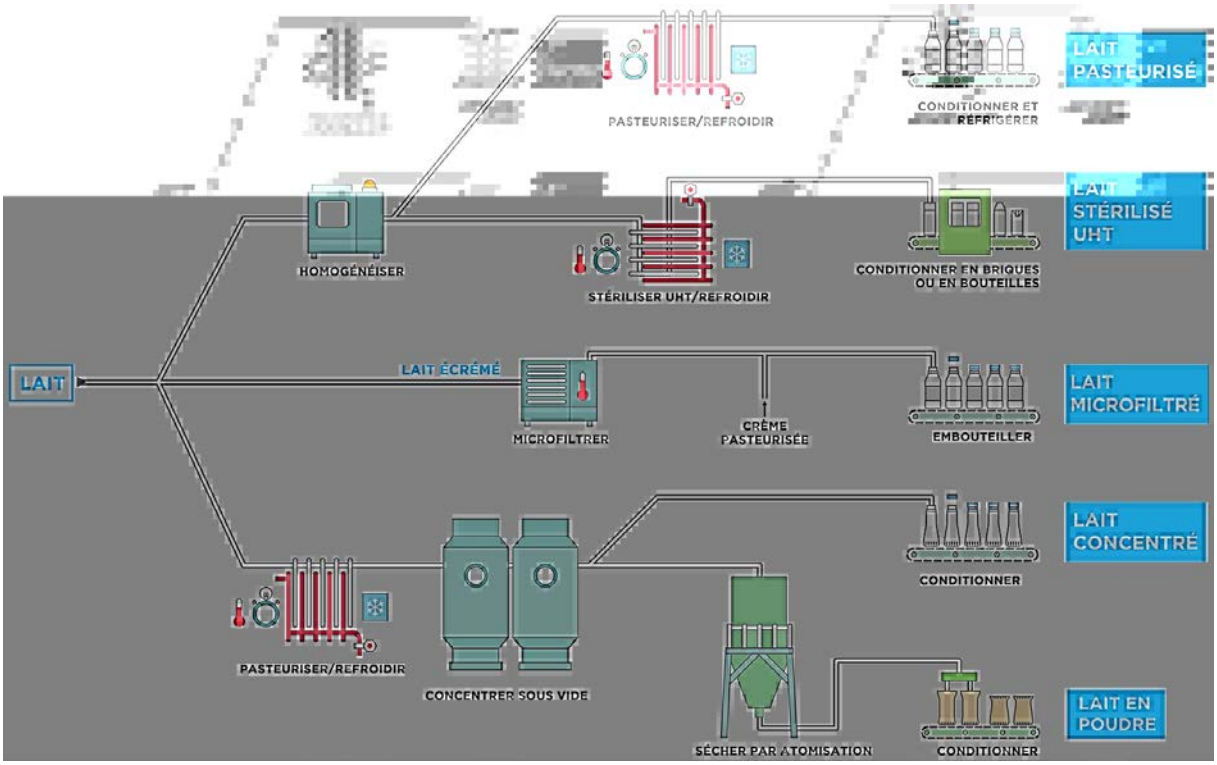
stérilisation, UHT…) ou une microfiltration. Le lait pasteurisé est généralement chauffé au minimum à 72°C pendant 15 à 20 secondes ou en employant d'autres combinaisons température/temps ayant un effet équivalent. Le lait peut aussi être stérilisé (environ 115°C – 120°C pendant 15 à 20 minutes) ou subir un traitement UHT (environ 140°C pendant quelques secondes). Le lait UHT représente plus de 92 % du marché français des laits liquides conditionnés. La microfiltration consiste à faire passer le lait écrémé, porté entre 37°C et 50°C, à travers une membrane dont les pores micrométriques sont capables de retenir les micro-organismes. Le lait est ensuite enrichi le cas échéant en crème pasteurisée.

Le **lait** est vendu **entier** (3,5 % de MG), **demi-écrémé** (entre 1,5 et 1,8 %) ou **écrémé** (moins de 0,5 %). En pratique, le lait est totalement écrémé puis on lui ajoute de la crème à la concentration souhaitée. Le lait UHT demi-écrémé a représenté 84 % du lait UHT produit en 2017. La production de lait liquide conditionné est en constante baisse en France (-13 % entre 2008 et 2017).

Le **lait concentré** est généralement obtenu par évaporation sous vide. Le vide permet d'abaisser la température d'évaporation de l'eau et limite la dénaturation thermique des constituants. Ce procédé permet d'éliminer environ 60 % de l'eau. On distingue le lait concentré sucré (ajout de saccharose) et non sucré. Une fois conditionnés dans des contenants stériles, ces produits présentent une longue durée de conservation.

Le **lait en poudre** est obtenu par déshydratation d'un lait pré-concentré par évaporation sous vide. La teneur finale en eau du lait en poudre n'excède pas 5 % en poids du produit fini. Cette déshydratation permet au lait en poudre de se conserver à température ambiante plusieurs mois dès lors qu'il est conservé à l'abri de la chaleur et l'humidité.

Le **lait sans lactose** subit un délactosage qui permet d'éliminer l'essentiel du lactose du lait afin de proposer des produits à teneur réduite en lactose ou sans lactose. Cette opération technologique peut être réalisée par hydrolyse enzymatique (à l'aide d'une lactase) ou grâce à des procédés membranaires.



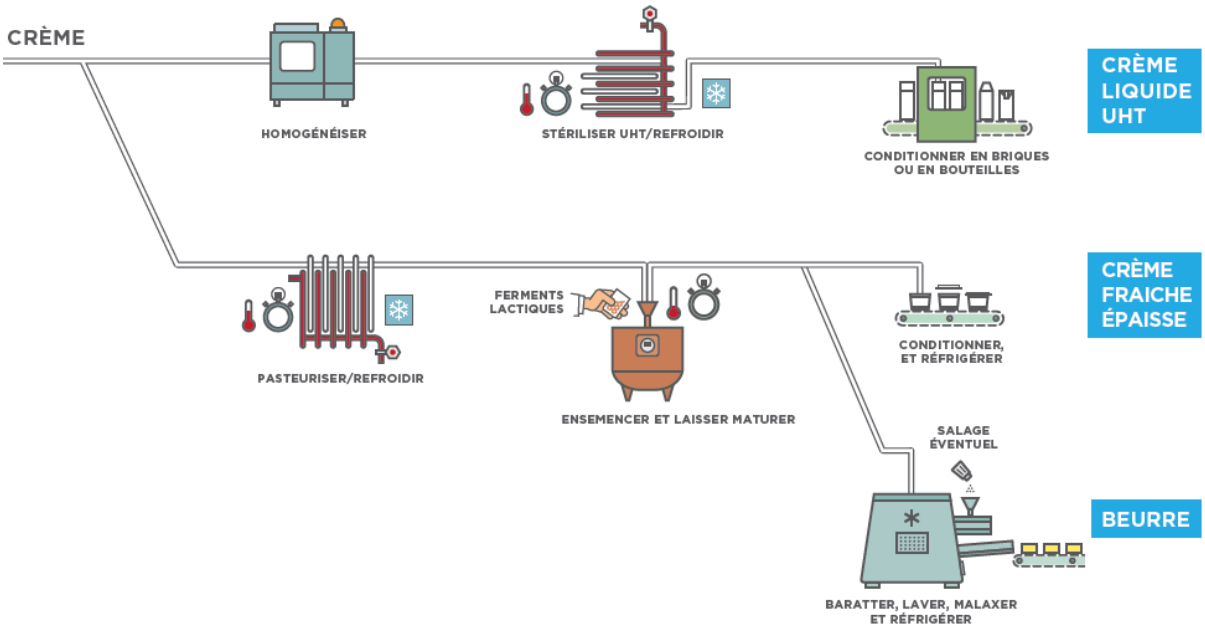
La crème et le beurre : En 2017, la France a produit environ 350 000 tonnes de beurre et 450 000 tonnes de crème. Trois beurres (33 403 tonnes) et deux crèmes (6 319 tonnes) bénéficient d'une AOP.

- La **crème** est un concentré des globules gras obtenu par écrémage du lait. La crème peut ensuite être épaissie ou aromatisée grâce à une opération de maturation (physique et/ou biologique). On distingue la maturation physique (obtenue par des traitements thermiques, elle conduit à la cristallisation de la matière grasse) et la maturation

biologique obtenue par l'ensemencement de la crème en ferments lactiques, elle conduit à l'acidification de la crème et à la production de composés aromatiques. La crème ainsi maturée peut être utilisée dans la fabrication de crèmes fraîches (épaisses) ou de beurres. Elle peut aussi subir une homogénéisation et un traitement thermique UHT pour une longue conservation (crème UHT). Les fabrications de crème ont augmenté de 25 % au cours des 10 dernières années.

- Le **beurre** contient au moins 82 % de matière grasse. La fabrication traditionnelle repose sur une concentration par étape de la matière grasse laitière. La crème (contenant 40 à 50 % de MG) est d'abord maturée, puis elle subit une action mécanique (avec une baratte ou un butyrateur) permettant de concentrer la matière grasse. La maturation facilite le barattage et permet d'obtenir un produit à la consistance voulue. Les grains sont séparés de la partie liquide non grasse du lait (le babeurre) puis sont lavés et malaxés pour former une masse compacte qui constitue le beurre. Les beurres peuvent être crus (la crème utilisée n'est ni chauffée, ni congelée, ni surgelée), extrafins (crème pasteurisée ni congelée ni surgelée) ou fins (pas plus de 30 % de crème congelée). Il existe d'autres types de beurre à usages surtout industriels : beurre concentré (99,8 % de MG au moins ; beurre aéré (volume *x* 3,5 grâce à de l'air) ... L'ajout de caroténoïdes (des colorants comme le bêta-carotène) est autorisé (sauf pour les AOC) mais ils sont peu utilisés. Les beurres allégés contiennent des additifs (épaississants et gélifiants notamment). Les fabrications de beurre, après fortement diminué se sont stabilisées au cours des dix dernières années.

La fabrication des beurres et crèmes génère différents coproduits de type babeurre source de nombreuses molécules à haute valeur ajoutée.



Les fromages : En 2018, la France a produit 1 739 000 tonnes de fromages au lait de vache, 103 000 tonnes au lait de chèvre et 59 000 tonnes au lait de brebis. Quarante-cinq de ces fromages bénéficient d'une appellation d'origine protégée ou AOP (202 317 tonnes, dont 75 % au lait cru).

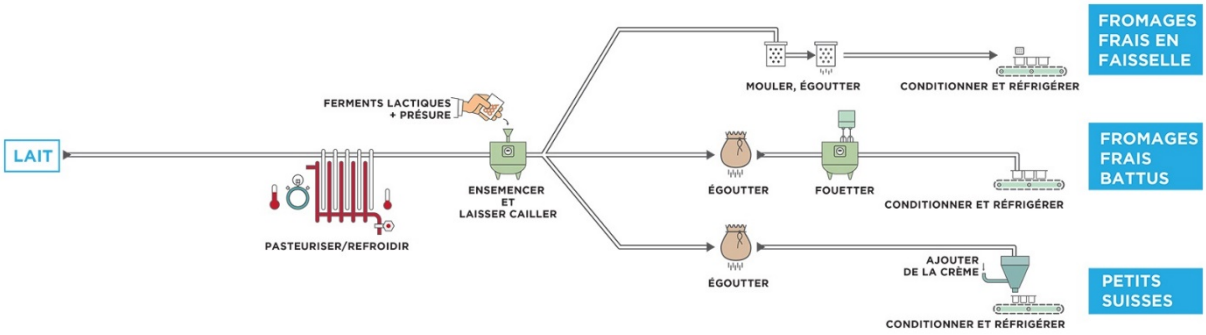
La fabrication de fromage débute avec la préparation du lait (avec éventuellement traitement thermique du lait et maturation). La maturation du lait de fromagerie consiste généralement à maintenir le lait entre 10°C et 15°C de 16 à 18 heures afin de favoriser un développement modéré des micro-organismes rajoutés par les ferments (et naturellement présents dans le lait cru). La maturation favorise la coagulation ultérieure du lait par la présure et permet la libération de composés d'arômes tels que des peptides ou des acides aminés. Lors de la fabrication des fromages traditionnels, l'étape suivante est la coagulation du lait. Ce passage de l'état liquide à l'état solide (gel) est consécutif à une déstabilisation des micelles de caséines qui constituent un réseau emprisonnant les autres constituants du lait. Cette déstabilisation des micelles de caséines se fait sous l'action d'agents coagulants rajoutés dans le lait (présure ou enzyme coagulante…) et par acidification. L'acidification est consécutive à la conversion du lactose en acide lactique par les bactéries lactiques apportées

par les ferments. Ces ferments (ou levains) sont des micro-organismes (bactéries, levures, moisissures) ajoutés intentionnellement au lait afin de provoquer des fermentations sous l'action de leurs enzymes spécifiques. On peut les utiliser sous forme liquide, congelée, lyophilisée ou en poudre. La présure quant à elle est un agent coagulant d'origine animale extrait de la caillette des jeunes ruminants. Elle est constituée d'enzymes, essentiellement la chymosine qui hydrolyse spécifiquement la caséine kappa et également la pepsine. Cette présure animale est essentiellement utilisée dans la fabrication de fromages AOP et des fromages Label rouge. D'autres agents coagulants (d´origine microbienne, fermentaire ou végétale) sont également utilisés en fabrication fromagère. Les étapes qui suivent la coagulation sont le tranchage, l'égouttage et le moulage qui permettent d'éliminer plus ou moins d'eau selon l'extrait sec final recherché et de donner au fromage sa forme définitive. Le moulage est suivi ou non du salage et de l'affinage, période au cours de laquelle les fromages développent leurs qualités organoleptiques finales.

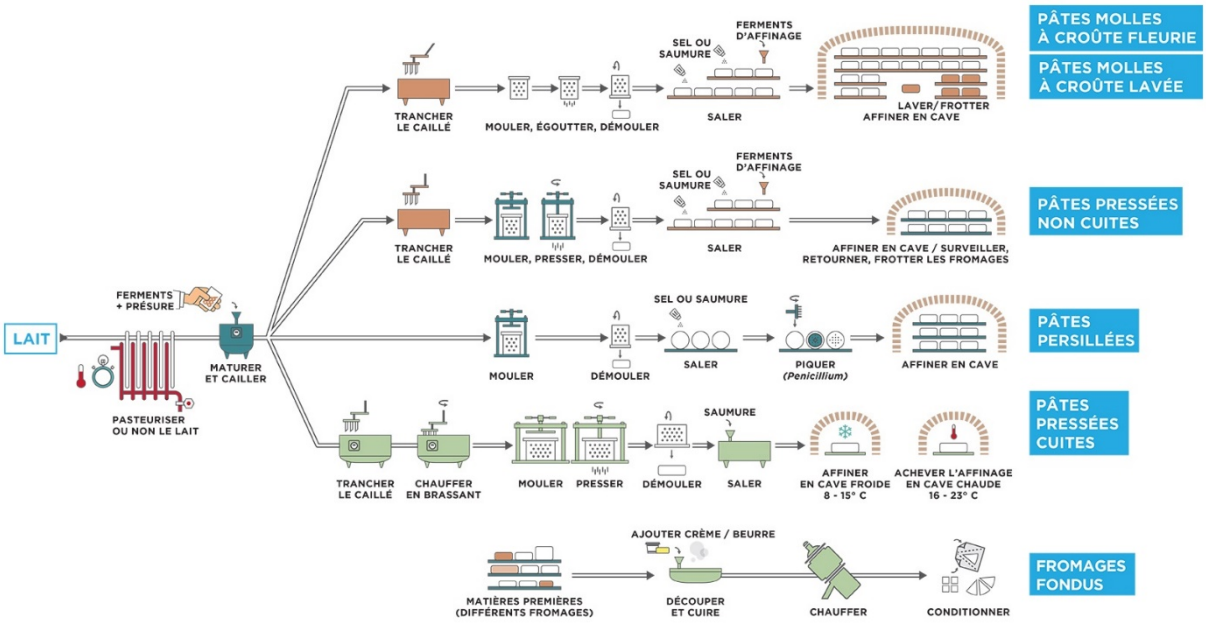
Un autre procédé d'obtention du fromage (procédé MMV, du nom de ses inventeurs Maubois, Mocquot et Vassal) a été proposé par l'Inra en 1969. Il permet de supprimer le tranchage et surtout l'égouttage du caillé, à l'origine de la perte dans le lactosérum d'une partie des éléments dissous dans la phase aqueuse du lait. Il augmente notablement les rendements fromagers (+18 à 20 %) en raison de la rétention dans le fromage des protéines du lactosérum et de la partie de la caséine kappa hydrolysée par la présure (5 % du poids total des caséines). Ce procédé consiste à concentrer les protéines et les matières grasses du lait par ultrafiltration sur membrane préalablement à la coagulation. La membrane, dont le diamètre des pores est compris entre 1 et 10 nm, permet de séparer un ultrafiltrat constitué d'eau, de lactose, de minéraux et de vitamines solubles et d'azote non protéique, d'un rétentat qualifié de « préfromage » liquide, qui concentre l'ensemble des protéines et des matières grasses à des niveaux variables selon l'intensité de l'ultrafiltration. Il suffit alors d'ajouter à ce préfromage liquide les levains et la présure pour le faire coaguler et obtenir en quelques dizaines de minutes un fromage ayant la composition et les dimensions désirées. Ce procédé est utilisé actuellement pour la production industrielle de fromages à pâte fraiche type « faisselle » ou de fromages de lactosérum type « ricotta » et de fromages à pâte molle comme la feta ou le Pavé d'Affinois®.

Les fromages sont regroupés en grandes familles technologiques : fromages frais, pâtes molles à croûte fleurie, pâtes molles à croûte lavée, pâtes persillées, pâtes pressées non cuites, pâtes pressées cuites, fromages fondus… La qualité sensorielle des fromages varie grandement selon le type de lait utilisé et la technologie de fabrication. La fabrication des fromages génère un coproduit, le lactosérum (plus ou moins acide et minéralisé selon la technologie fromagère utilisée), source de nombreuses molécules à haute valeur ajoutée.

Fromages frais



Autres fromages



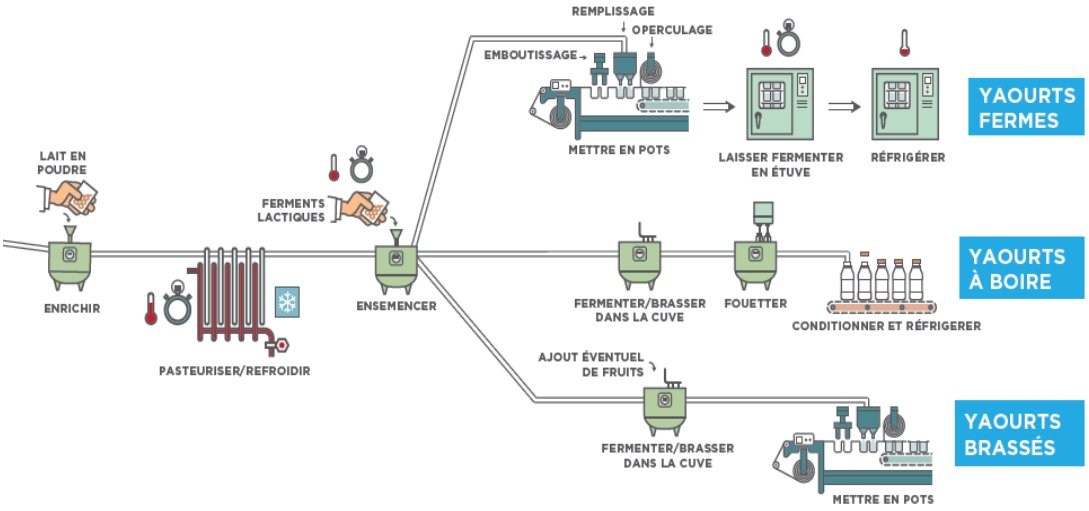
Les produits fermentés : Les produits fermentés à base de lait sont des produits traditionnels existant depuis des millénaires dans le monde entier. On peut citer le kéfir, le kymus, le yaourt, le dahi et le fromage. Les fromages et laits fermentés représentent en France un héritage gastronomique et culturel de première importance et ils valorisent près de la moitié du lait collecté. Le principe du procédé est une acidification par des bactéries, levures, ou moisissures, présents et/ou rajoutés, qui renferment des enzymes protéolytiques et lipolytiques ou bien ou des enzymes exogènes ajoutées provenant des agents coagulants utilisés.

Dans la production de fromage, ces biotransformations sont nécessaires pour établir les caractéristiques typiques du produit. Les enzymes lipolytiques sont des hydrolases d'esters d'acides gras à longue chaîne, à l'exception des glycosidases, qui génèrent des résidus de glucides provenant de glycolipides. Les enzymes dégradant les protéines et les peptides sont classés en hydrolases, peptidases et protéases. Elles sont divisées en endo-peptidases, coupant la liaison peptidique au sein de la chaîne d'acides aminés, et en exo-peptidases, coupant au niveau des acides aminés terminaux. La coagulation du lait est la première étape du procédé, avec un clivage spécifique du caséinomacropeptide, à partir des micelles de caséine. En présence de calcium (Ca^{2+}), la partie des micelles digérées s'agrègent en amas insolubles. Pendant l'affinage du fromage, des acides gras sont libérés, ainsi que des peptides solubles et des acides aminés ; ces composés étant soit des précurseurs d'arôme soit des arômes. Le développement de la saveur est également corrélé à la longueur des acides gras libres libérés. Les acides gras à chaîne courte (C_2 à C_6) ont une note plutôt beurrée et ceux à chaine longue ($>C_{16}$) une note plutôt de « saponification ».

En 2017, la France a produit 1 450 000 tonnes de laits fermentés. La dénomination laits fermentés est réservée aux produits laitiers préparés à partir de différents types de laits (écrémé ou non, concentré, en poudre…) ayant subi un traitement thermique au moins équivalent à la pasteurisation et ensemencés avec des micro-organismes appartenant à l'espèce ou aux espèces caractéristiques de chaque produit. Le type de micro-organisme utilisé donne au produit ses propriétés particulières. Les bactéries lactiques principalement utilisés en France sont les lactobacilles (*Lb. bulgaricus, Lb. acidophilus et Lb. casei*), les lactocoques (*Lc. lactis*), les streptocoques (*S. thermophilus*) et les bifidobactéries (*B. bifidum et B. longum*). Le yaourt est le lait fermenté le plus consommé en France. La réglementation française impose que le lait soit ensemencé avec deux bactéries lactiques spécifiques : *Lb. bulgaricus* et *S. thermophilus*, pour utiliser la dénomination « yaourt ». De plus, ces bactéries doivent être vivantes et en abondance dans le produit fini (au moins 10 millions de bactéries/g). Pour fabriquer un yaourt, du lait entier, écrémé ou demi écrémé peut être utilisé et il est possible d'ajouter d'autres ingrédients laitiers tels que du lait en poudre, de la crème pasteurisée, des protéines laitières ou encore du babeurre. Les yaourts « classiques » sont fabriqués à partir de lait 1/2 écrémé dans lequel de la poudre de lait a été ajoutée pour améliorer la texture du produit. Le lait est chauffé pendant quelques minutes de manière intense (de l'ordre de 90°C). Il est ensuite refroidi et ensemencé avec ses 2 bactéries spécifiques : la fermentation se fait à 40 - 45°C en 2 à 5 heures. Il existe sur le marché de nombreux types de yaourts : ils peuvent être fermes, brassés ou encore liquides, natures, sucrés ou édulcorés, additionnés de fruits ou encore aromatisés. En

2017, les 2/3 des yaourts produit en France étaient aromatisés ou au fruits. Après avoir progressé pendant longtemps, la production de yaourts en France diminue depuis 2013 (-14 % entre 2013 et 2017).

LAIT



Les ingrédients laitiers : En 2018, la France a produit 501 400 tonnes de poudres de lait, 510 180 tonnes de poudres de lactosérum. Ces produits correspondent à une première génération d'ingrédients laitiers très basiques obtenus par séchage du lait ou du lactosérum et du babeurre, considérés autrefois comme des sous-produits utilisés essentiellement pour l'alimentation animale.

La seconde génération d'ingrédients laitiers s'est développée grâce aux progrès réalisés sur les techniques membranaires de fractionnement du lait (telles que les méthodes d'ultrafiltration et de microfiltration) qui ont notamment permis l'obtention de fractions protéiques à haute valeur ajoutée issues du lait ou du lactosérum comme les caséines, les caséinates ou les concentrés de protéines du sérum ou du lait. La France a ainsi produit 47 534 tonnes de caséines et caséinates en 2018, ce qui correspond à 2,3 % de la matière sèche utile du lait collecté. Les protéines laitières sont dotées d'excellente valeur nutritionnelle, elles présentent aussi des propriétés technofonctionnelles (texturantes, émulsifiantes, organoleptiques) qui les rendent incontournables comme ingrédients dans de nombreux produits alimentaires : produits laitiers, biscuiterie, charcuterie, aliments hypo- ou hyper-caloriques, pharmacie, cosmétologie, diététique, chocolaterie, sauces, crèmes glacées, dessert lactés, gâteaux, plats cuisinés, boissons énergétiques…) et naturellement comme ingrédient dans la nutrition infantile. Ces techniques ont également permis de concentrer sélectivement les d'autres constituants du lait ou du lactosérum comme les minéraux ou le lactose.

Le développement des nouvelles technologies (choix de membranes toujours plus fines, couplage avec d'autres techniques comme la chromatographie...) a ensuite rendu possible la production de molécules individuelles. Il s'agit de la troisième génération d'ingrédients laitiers comprenant par exemple l'alpha-lactalbumine, la beta-lactoglobuline, la lactoferrine, la lactoperoxydase, la lysozyme, les phospholipides (croissance cérébrale de l'enfant), les concentrés de calcium du lait, les oligosaccharides naturels du lait (prébiotiques), des facteurs de croissance (TGF beta, effet anti-psoriasis), l'ostéopontine et protéines associées (lutte contre l'ostéroporose), protéines de transport de vitamines, immunoglobulines (principalement extraites du colostrum, pour accroitre les défenses immunitaires), ainsi que tous les dérivés du lactose : lactulose, lactitol, acide poly-lactique, galacto-oligo-saccharides, acide lactobionique. Ces molécules, notamment utilisées dans l'industrie pharmaceutique, sont toutes à très haute valeur ajoutée.

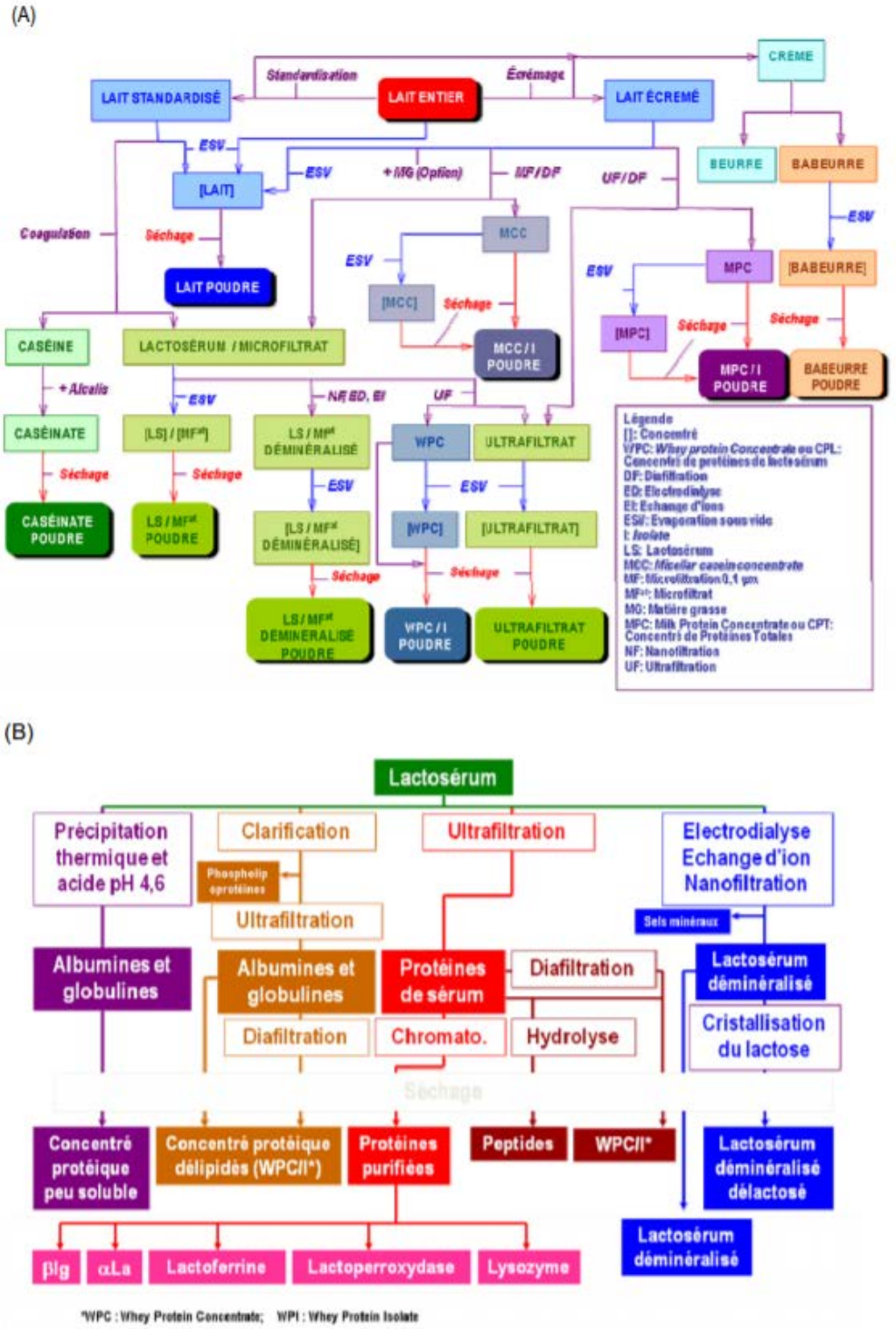


Figure 1-17 : Cracking du lait (A) et du lactosérum (B). Source : Lortal et Boudier (2011)

Le « cracking » du lait et du lactosérum ne cesse de s'affiner et de se complexifier (Figure1-17). A cette liste s'ajoute maintenant une 4ème génération d'ingrédients dits biofonctionnels, qui répond directement aux préoccupations de santé. Elle est constituée par des protéines, hydrolysats et peptides bioactifs. En effet, les caséines et les protéines sériques contiennent des séquences bioactives qui sont obtenues par hydrolyse ciblée, éventuellement par voie microbienne, et dont la valeur ajoutée atteint celle pratiquée dans l'industrie pharmaceutique soit un facteur 1 000 par rapport aux ingrédients basiques.

Les technologies à membrane appliquées au lait de fromagerie ont également été sources d'évolutions extrêmement fortes des procédés, des rendements, de leur régularité et de leur diversité. Il est intéressant de noter que les matières premières qui étaient considérées d'abord comme des sous-produits (lactosérum, babeurre), puis des co-produits dont le traitement et la valorisation s'imposaient pour des raisons économiques et environnementales, sont devenus en deux décennies une source de molécules à haute valeur ajoutée. A tel point que certains regardent aujourd'hui le fromage comme le co-produit.

1.2.4. Transformation des œufs en ovoproduits

La filière de transformation de l'œuf en ovoproduit se décline en deux grandes catégories :

- Les ovoproduits de 1ère transformation : qui regroupent des produits destinés aux industries agro-alimentaires, comme par exemple des blancs, des jaunes et des œufs entiers vendus liquides ou congelés, de la poudre d'œuf.
- Les ovoproduits de 2ème transformation : destinés aux consommateurs, généralement via la restauration hors domicile, avec les œufs durs, pochés, au plat ou en omelette.

L'enjeu principal de la transformation est d'augmenter la durée de vie du produit par l'amélioration de sa qualité sanitaire et/ou en conditionnant le produit dans un milieu non propice au développement de microorganismes pathogènes.

Le ovoproduits de 1ère transformation

L'utilisation de ce type de produit par les industriels de la transformation permet, outre l'aspect sanitaire, de s'épargner des étapes de transformation complexes et sensibles. Les ovoproduits de 1ère transformation pourront, de plus, présenter des propriétés physico-chimiques améliorées par la transformation et ainsi représenter des atouts technologiques, le blanc peut être plus moussant, le jaune plus émulsifiant… (Voir partie 1)

À température ambiante, le pH de l'œuf fraichement pondu passe de 7,43 à 9,32 en 10 jours. Cette évolution du pH jouera un rôle significatif lors de la mise au point d'opération de pasteurisation, une basification du milieu peut altérer l'efficacité du traitement (Silversides et Scott, 2001). La membrane vitelline, qui sépare le jaune du blanc, sera de moins en moins résistante au court du temps de stockage. Elle perdra 18 % de sa résistance après 8 jours à 18°C (Berardinelli *et al.*, 2003). Ces phénomènes peuvent être délétères pour la qualité de la séparation du blanc et du jaune lors de l'étape qui suit le cassage de l'œuf (figure 1-18). Un stockage réfrigéré permet de limiter la perte de résistance et ainsi d'éviter les difficultés à la casse.

Le lavage des œufs est une étape interdite lors du conditionnement des œufs de table mais autorisée concernant la transformation des œufs en ovoproduits. Elle est cependant très rarement pratiquée en Europe du fait de sa difficulté technique et de son coût (filtres à changer, eaux usées à traiter…). En outre, il a été démontré que le lavage des coquilles n'avait pas d'influence sur la flore mésophile des produits pasteurisés (Aragon-Alegro *et al.*, 2005).

La manutention des œufs se fait à l'aide de ventouses qui maintiennent l'œuf par un vide partiel, les œufs sont positionnés dans une casseuse, en position horizontale, un couteau vient rapidement couper la coquille et les deux morceaux de coquille sont écartés pour laisser tomber le contenu de l'œuf dans un godet qui permet la séparation du blanc et du jaune. Il est primordial pour la qualité des ovoproduits de ne pas contaminer le blanc avec du jaune, en effet la moindre trace de matière grasse dans le blanc limitera son pouvoir moussant (Wang et Wang, 2009). Une filtration est ensuite effectuée pour éliminer les éventuels morceaux de coquille. Cette étape est source potentielle de contamination de l'œuf par les microorganismes présents sur la coquille, aussi elle doit être effectuée le plus rapidement possible et les filtres doivent être débourbés régulièrement.

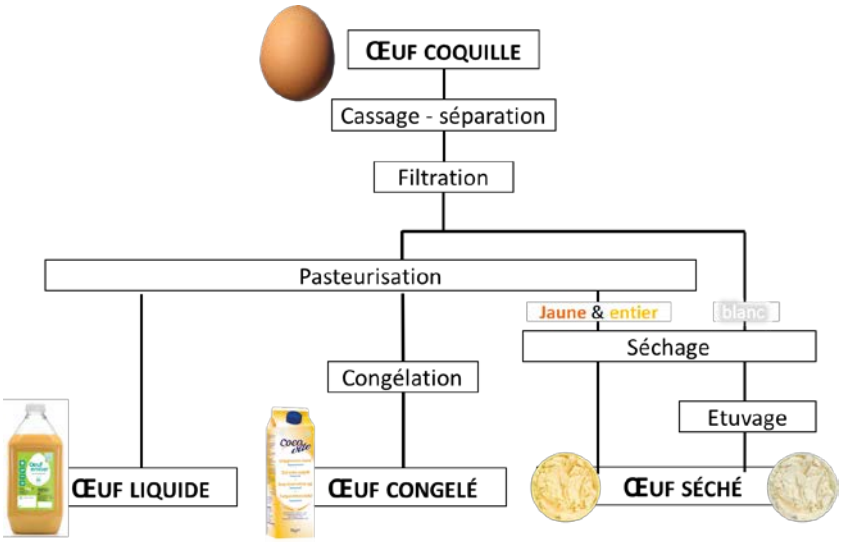


Figure 1-18 : Diagramme de fabrication des principaux ovoproduits de 1ère transformation

a. L'œuf liquide et congelé

Une fois séparés, le blanc, le jaune ou une combinaison des deux (appelé entier) vont être pasteurisées. Chaque fraction de l'œuf a ses caractéristiques physico-chimiques propres, la viscosité différente entre un jaune et un blanc va entraîner des comportements rhéologiques différents. Les procédés sont donc adaptés au milieu traité. Il est assez usuel en France pour le jaune et l'entier d'appliquer un traitement de 5 à 6 min à 65-68°C, ce traitement permet la destruction des salmonelles et listeria, sur le blanc le traitement équivalent sera de 2 à 5 min à 55-57°C. La pasteurisation peut se faire dans des appareillages en batch ou bien directement dans l'emballage final, mais le plus répandu est l'utilisation d'appareils de type échangeur à plaque (Figure 1-19) ou échangeur à chaleur tubulaire qui permettent un processus en continu et donnent donc des niveaux de productivité satisfaisant.

L'œuf liquide est ensuite conditionné en bidons, briques, poches souples, selon la destination du produit, il sera conservé pendant 35 à 56 jours à 4°C.

Une étape de congélation ou de surgélation du produit peut être ajoutée. La difficulté de cette étape sera de conserver l'œuf dans un état acceptable après décongélation. Il existe un risque lors de la congélation du blanc d'avoir des gros cristaux qui se forment et qui entraîneront une coagulation partielle du blanc à la décongélation. De la même manière, le jaune aura tendance à gélifier avec le froid et donnera un produit plus visqueux à la décongélation. Un œuf congelé peut être conservé pendant 12 à 24 mois à -18°C.

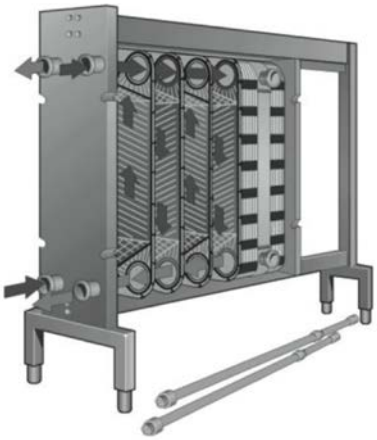


Figure 1-19 : schéma d'un échangeur à plaque (Ahmed et Rahman, 2012)

b. L'œuf en poudre

La dessiccation d'un œuf permet de diminuer son Aw, c'est-à-dire sa quantité d'eau libre et donc disponible pour les micro-organismes et les réactions chimiques. La pasteurisation n'est effectuée pour ce produit que sur le jaune et l'entier. En effet, le blanc est, de par sa composition, plus résistant aux microorganismes, le traitement thermique appliqué sera alors plus doux, il consistera en un étuvage de la poudre après séchage. Le blanc d'œuf est le produit le plus séché, il est facile à transporter en cuve réfrigéré et comme il contient très peu de matière grasse, il se conserve longtemps sans modification de ses caractéristiques organoleptiques.

Avant de sécher le produit, un déglucosage du blanc est souvent réalisé. Le glucose présent est source de problème, il peut, entre autres, faire brunir la poudre lors du séchage par réaction de Maillard. Ce déglucosage peut être fait par une fermentation impliquant des levures ou des bactéries, mais aussi par fermentation enzymatique, celle-ci permet un déglucosage efficace et rapide (Sisak *et al.*, 2006).

Le blanc peut également être concentré par osmose inverse ou ultrafiltration avant séchage. Cette concentration permettra un gain d'énergie conséquent. La réduction volumique sera d'un facteur 2.

Le séchage est réalisé la plupart du temps par atomisation (figure 1-20). Le produit est pulvérisé en microgouttelette dans une chambre de séchage, un flux d'air chaud et sec est envoyé à co-courant du produit. La surface d'échange importante permet un séchage quasi-instantané du produit et une conservation des qualités de celui-ci, en effet la température du produit reste proche de 49°C (Bergquist, 1995).

La poudre de blanc est ensuite étuvée pour détruire les formes végétatives des bactéries, les formes sporulées ne sont pas détruites mais ne peuvent se développer en raison de la trop faible quantité d'eau libre disponible. L'étuvage se déroule en mélangeur agité pendant 21 h à 90°C ou en étuve. Dans ce cas la poudre est conditionnée et doit passer entre 7 et 14 jours à 65-68°C.

La poudre d'œuf présente une date de durabilité minimale (DDM) de 12 mois.

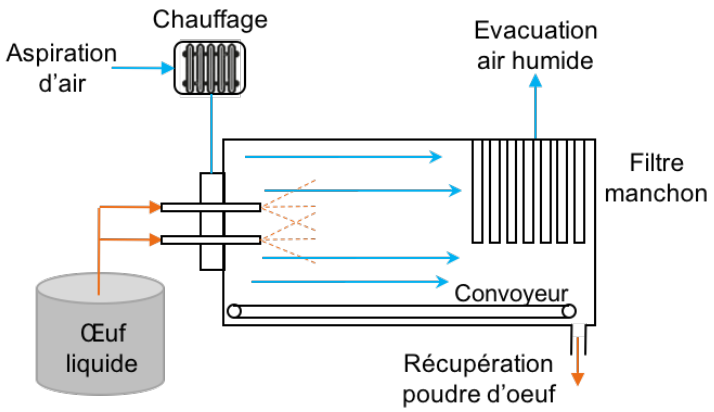


Figure 1-20 : Exemple d'appareillage permettant le séchage d'œuf par atomisation (SAVANO TECHNOLOGY GROUP)

Les ovoproduits de 2ème transformation

Le produit dominant les ovoproduits de 2ème transformation est l'œuf dur écalé, que l'on retrouve régulièrement en restauration commerciale, restauration collective et snacking.

L'œuf destiné à être durci et écalé ne doit pas être un œuf frais. En effet la facilité d'écalage est corrélée au pH du blanc, qui doit être supérieur à 8,5 avant cuisson. L'œuf, avant la cuisson, va subir une étape de fragilisation de la coquille pour éviter tout risque d'éclatement lié à la pression interne lors de la cuisson. Cette fragilisation peut être réalisée par un perçage au niveau de la chambre à air ou par un lâché à quelques centimètres au-dessus d'une surface plate. La cuisson (figure 1-21) se fait par de la vapeur d'eau ou dans un bain d'eau chaude à 95-100°C pendant 13 à 20 min, l'objectif étant d'atteindre une

température à cœur du jaune de 85°C et du blanc de 92°C. L'œuf est refroidi à 30°C avant d'être écalé. Il est alors placé entre deux plaques métalliques et frictionné pour détacher la coquille du blanc cuit. La difficulté de cette étape réside dans le réglage de l'écaleuse afin de limiter au maximum le risque de pénétration de petits morceaux de coquille dans l'œuf cuit. Après cuisson, l'œuf peut être plongé dans un bain d'acidification réfrigéré pour éviter la formation d'un liseré noir entre le jaune et le blanc.

Les œufs sont ensuite conditionnés en saumure acidifiée ou sous atmosphère protectrice. La date limite de consommation est de 35 jours.

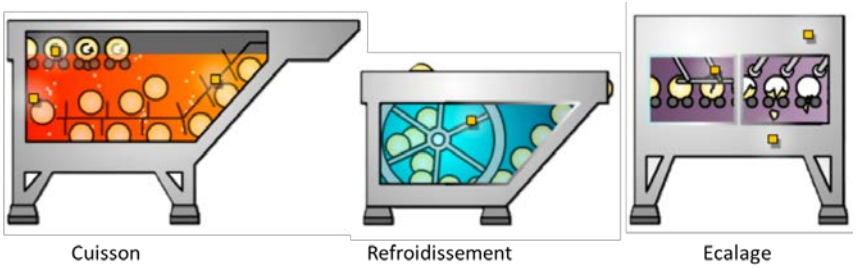


Figure 1-21 : Procédé de fabrication des œufs durs écalés

Les autres produits de 2ème transformation dit « cuisinés » (de type omelette, œuf au plat ou le mystérieux œuf en barre) sont fabriqués en quantité très restreinte. Il existe des difficultés technologiques dans leur fabrication qui rendent ces produits économiquement peu intéressants et donc peu développés. L'exemple des œufs au plat ou des œufs pochés illustre bien ce phénomène puisqu'il s'agit de produits aux exigences élevées. Ils sont mangés mi-cru, l'œuf doit donc être très frais et d'une qualité sanitaire irréprochable. Le blanc après cuisson doit être coagulé et le jaune rester liquide ou légèrement cuit. Ce type de produit se conserve à 4°C et pendant une durée de 38 à 35 jours.

1.2.3. L'organisation des contrôles officiels

1.2.3.1 Contrôle des produits animaux en général

Les produits animaux tels qu'ils sont abordés dans l'expertise entrent dans le champ de la définition énoncée à l'article 2 du règlement (CE) n°178/2002 (Commission européenne, 2002) :

« Aux fins du présent règlement, on entend par « denrée alimentaire » (ou « aliment »), toute substance ou produit, transformé, partiellement transformé ou non transformé, destiné à être ingéré ou raisonnablement susceptible d'être ingéré par l'être humain » (…).

Le terme « denrée alimentaire » ne couvre pas :

a. les aliments pour animaux ;
b. les animaux vivants à moins qu'ils ne soient préparés en vue de la consommation humaine (…) »

Ainsi, les produits animaux sont soumis aux principes généraux de la législation alimentaire européenne. Le premier alinéa de cette définition étant large, le législateur européen a exclu certains produits, dont deux sont en lien avec les produits animaux : les aliments pour animaux qui sont définis à l'article 3[19] et les animaux vivants sauf ceux qui sont consommés dans cet état comme les huîtres.

[19] Aliment pour animaux : toute substance ou produit, y compris les additifs, transformé, partiellement transformé ou non transformé, destiné à l'alimentation des animaux par voie orale. A ce sujet : Viste-Martin et Schmidely Viste-Martin, C.; Schmidely, P., 2018. Encadrement réglementaire de la sécurité sanitaire des aliments pour animaux producteurs de denrées alimentaires. In: Berthelot, V.d., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Lavoisier Tec & Doc (Coll. Agriculture d'aujourd'hui).

L'annexe I du règlement (CE) n°853/2004 du 29 avril 2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale7 définit les « produits d'origine animale » comme (Commission européenne, 2004a) :

- « les denrées alimentaires d'origine animale, y compris le miel et le sang,
- les mollusques bivalves, les échinodermes, les tuniciers et les gastéropodes marins vivants destinés à la consommation humaine, et
- les autres animaux destinés à être préparés en vue d'être fournis vivants au consommateur final » ;

L'annexe I précise les catégories de produits qui sont couverts par cette notion. Il y a 6 catégories (viandes, mollusques bivalves vivants, produits de la pêche, lait, œufs, cuisses de grenouilles et escargots, produits transformés). Cette annexe précise l'ensemble des définitions relatives aux aliments d'origine animale comme :

- « viandes fraîches » : les viandes n'ayant subi aucun traitement de conservation autre que la réfrigération, la congélation ou la surgélation, y compris les viandes conditionnées sous vide ou sous atmosphère contrôlée
- « préparations de viandes » : les viandes fraîches, y compris les viandes qui ont été réduites en fragments, auxquelles ont été ajoutés des denrées alimentaires, des condiments ou des additifs ou qui ont subi une transformation insuffisante pour modifier à cœur la structure fibreuse des muscles et ainsi faire disparaître les caractéristiques de la viande fraîche
- « produits à base de viande » : les produits transformés résultant de la transformation de viandes ou de la transformation de produits ainsi transformés, de sorte que la surface de coupe à cœur permet de constater la disparition des caractéristiques de viande fraîche

Chaque État étant souverain sur son territoire, l'organisation des contrôles officiels diffère d'un pays à l'autre. Du fait de l'intégration européenne, il existe des principes communs à l'organisation des contrôles par les États membres de l'Union européenne[20]. L'expertise n'a pas pour objet de présenter les différentes manières de contrôler la qualité (principalement sanitaire)[21] des produits animaux, mais il est important pour la compréhension du lecteur de connaître les grandes lignes de l'organisation française.

L'organisation des contrôles officiels en France[22] est complexe. Elle résulte de choix politiques étatiques et de l'influence de la réglementation européenne. La rationalisation de cette organisation a été plusieurs fois envisagée (Babusiaux et Guillou, 2014)[23]. Cela pourrait prendre la forme d'une répartition des contrôles (unification des compétences par site de production) ou encore la création d'une agence unique de contrôle de la chaîne alimentaire.

---

[20] En particulier *:* Règlement (UE) 2017/625 du 15 mars 2017concernant les contrôles officiels et les autres activités officielles servant à assurer le respect de la législation alimentaire et de la législation relative aux aliments pour animaux ainsi que des règles relatives à la santé et au bien-être des animaux, à la santé des végétaux et aux produits phytopharmaceutiques (…) abrogeant les règlements du Parlement européen et du Conseil (CE) no 854/2004 et (CE) no 882/2004 (…) [applicable au 14 décembre 2019] Union Européenne, 2017. Règlement (UE) 2017/625 du Parlement européen et du Conseil du 15 mars 2017 concernant les contrôles officiels et les autres activités officielles servant à assurer le respect de la législation alimentaire et de la législation relative aux aliments pour animaux ainsi que des règles relatives à la santé et au bien-être des animaux, à la santé des végétaux et aux produits phytopharmaceutiques. *JOUE L 95 du 07.04.2017*.

[21] La Commission européenne met à disposition les informations clés relatives à l'organisation des contrôles pays par pays. *Cf.* [en ligne] : http://ec.europa.eu/food/audits-analysis/country_profiles/index.cfm

[22] Pour une vision plus détaillée, v. not. : Plan national de contrôles officiels pluriannuel (PNCOPA) 2016-2020, Contrôles de la chaîne alimentaire en France (47 p.), [en ligne] : https://agriculture.gouv.fr/securite-sanitaire-le-plan-national-de-controles-officiels-pluriannuel-2016-2020-pncopa Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017c. *Sécurité sanitaire : le plan national de contrôles officiels pluriannuel 2016-2020 (PNCOPA). Contrôle de la chaîne alimentaire en France*. Paris: Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 51 p.

[23] V. not. : Assemblée Nationale, Rapport fait au nom de la commission d'enquête chargée de tirer les enseignements de l'affaire Lactalis et d'étudier à cet effet les dysfonctionnements des systèmes de contrôle et d'information, de la production à la distribution, et l'effectivité des décisions publiques, juillet 2018 Hutin, C.; Besson-Moreau, G., 2018. *Rapport fait au nom de la commission*

Elle est répartie entre quatre autorités compétentes[24] :

- La Direction générale de l'alimentation (DGAL) au ministère chargé de l'Agriculture ;
- La Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), au ministère chargé de l'Économie ;
- La Direction générale de la santé (DGS), au ministère chargé de la Santé ;
- L'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO) chargé du contrôle des produits sous signe de qualité avant la mise sur le marché de ces produits.

Elles interviennent toutes, d'une manière ou d'une autre, sur la qualité des produits animaux. Depuis l'amont vers l'aval, la répartition des compétences peut être résumée comme il suit :

- Importations : Les contrôles des importations sont opérés par la DGAL ou la DGCCRF.
- Intrants : Les contrôles de la distribution des produits vétérinaires sont partagés entre la DGAL et la DGS.
- Les contrôles dans le secteur de l'alimentation animale sont partagés entre la DGCCRF et la DGAL.
- Production : Le contrôle en production primaire animale (utilisation de médicaments vétérinaires, santé et bien-être animal) relève de la DGAL. La sécurité sanitaire des denrées alimentaires : suivant la nature et les étapes (production, transformation, distribution), les contrôles sont opérés par la DGAL, la DGCCRF ou la DGS. La DGAL dispose d'un pouvoir exclusif s'agissant des abattoirs et du contrôle des filières animales.
- Qualité des produits et loyauté des transactions : les contrôles sont assurés par la DGCCRF. Les agents recherchent notamment les infractions relatives à l'étiquetage, aux méthodes de transformation et de conservation (comme l'ionisation ou les matériaux en contact).

* Produits sous signes officiels de qualité : l'INAO et la DGCCRF sont compétents pour les contrôles. En principe, les contrôles sont opérés directement par les autorités compétentes. Toutefois, certaines missions font l'objet de délégations à des personnes privées ou parapubliques (vétérinaires mandatés, FranceAgriMer…). Afin d'assurer une répartition des contrôles sur l'ensemble du territoire français, les administrations centrales s'appuient sur des administrations déconcentrées en leur mettant à dispositions certains agents et certaines compétences.

Niveau national DGAL DGCCRF DGS INAO : missions de pilotage, coordination et harmonisation des contrôles. Certains contrôles sont réalisés par la Brigade d'enquêtes vétérinaires et phytosanitaires (DGAL) et le Bureau national Service national d'enquête (DGCCRF)

Niveau régional, Préfet de région Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAAF) Préfet de région Directions régionales des entreprises, de la concurrence, de la consommation, du travail et de l'emploi (DIRRECTE) Agences régionales de santé (ARS) Délégation régionale : missions Pilotage, coordination et harmonisation des contrôles et réalisation de certains contrôles

Niveau départemental Préfet de département Direction départementale (de la cohésion sociale et) de la protection des populations (DD(CS)PP) Direction départementale des territoires et de la mer (DDTM) Délégation départementale des ARS : missions de réalisation de contrôles -

Les départements et régions d'outre-mer disposent d'une organisation spécifique. Le double statut département/région implique une fusion des missions au sein d'autorités administratives particulières.

---

d'enquête chargée de tirer les enseignements de l'affaire Lactalis et d'étudier à cet effet les dysfonctionnements des systèmes de contrôle et d'information, de la production à la distribution, et l'effectivité des décisions publiques - Tome I : travaux de la commission d'enquête. Paris: Assemblée Nationale (Coll. Documents d'information de l'Assemblée nationale), 237 p.

[24] Une cinquième autorité intervient de manière également dans le domaine alimentaire. Il s'agit du Service de santé des armées (SSA) au ministère chargé de la défense. Il est responsable des contrôles officiels dans les établissements relevant de son ministère.

En 2013, la Cour des comptes avait pointé l'insuffisance des contrôles effectués par le ministère en charge de l'Agriculture (Cour des comptes, 2014). Dans un nouveau rapport de 2019, la Cour des comptes a relevé des progrès qui ont permis d'améliorer les procédures de contrôles et les suites données à ceux-ci en cas de non-conformité (Cour des comptes, 2019).

La réalisation des contrôles officiels peut aboutir à la constatation de non-conformité à la réglementation de produit ou d'activités d'un exploitant du secteur alimentaire. Les agents disposent alors de différents pouvoirs leur permettant de réagir de manière proportionnée par rapport à la non-conformité constatée.

Des mesures de police administrative peuvent d'abord être mobilisées. Elles peuvent prendre la forme d'un avertissement envoyé à l'exploitant lui permettant d'identifier et de corriger les non-conformités. De manière plus contraignante, en particulier dans des cas où la non-conformité présente un danger pour la santé publique ou la sécurité des consommateurs, l'administration peut prononcer des injonctions de mise en conformité[25] (comme le nettoyage ou la rénovation d'un atelier), demander la destruction, le retrait, le rappel ou la consigne d'un produit[26]. Quand la situation le justifie, ces mesures peuvent être prises en urgence (République Française, 2017)[27].

Dans les cas les plus graves, l'agent de contrôle peut réaliser des constats d'infraction qui seront transmis au procureur de la République qui décidera de l'opportunité des poursuites sur le plan pénal. Les sanctions pénales prévues pour les infractions dans le domaine de la sécurité sanitaire des denrées alimentaires sont des amendes (jusqu'à 750 000 euros et portées de manière proportionnée à 10 % du chiffre d'affaires annuel pour les personnes morales) et des peines d'emprisonnement (jusqu'à 7 ans).

1.2.3.2 Contrôle de systèmes de production sous SIQO

Les systèmes de production sous SIQO sont soumis à des systèmes de contrôle qui leur sont propres et sont définis dans des **cahiers des charges**, détenus par l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO). Les AOP (Appellation d'origine protégée), IGP (Indication géographique protégée), STG (Spécialité traditionnelle garantie), en tant que systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires, sont régis par le règlement (UE) n°1151/2012 du 21 novembre 2012 (Union Européenne, 2012). L'AB (Agriculture biologique) est quant à elle régie par les règlements (CE) n°834/2007 (Commission européenne, 2007b) et n°889/2008 (Commission européenne, 2008c). En 2021, ces deux règlements de l'AB seront respectivement abrogés par le règlement (UE) n°2018/848 du 30/05/18 (Commission européenne, 2018a) et complété par le règlement d'exécution (UE) n°2018/1584 du 22/10/18 (Commission européenne, 2018b). Ces règlements définissent les critères pour les **plans de contrôle** à mettre en œuvre, les **enregistrements** qui doivent être effectués et les règles d'**étiquetage** des produits avec utilisation de logos spécifiques. Un plan de contrôle définit les contrôles à réaliser, leurs modalités, leur fréquence et le traitement des manquements au respect du cahier des charges (plan d'action, sanction…).

A l'échelle de l'Union européenne, le règlement (CE) n°882/2004 (Commission européenne, 2004b) prévoit le déroulement des contrôles officiels relatifs aux denrées alimentaires. La Commission européenne est ainsi en charge d'effectuer des audits dans les Etats membres, au sujet de la santé et de l'alimentation, en coopération avec l'autorité compétente de l'Etat audité et prévoit un programme annuel en ce sens (Commission européenne, 2004b). Le thème « qualité des denrées alimentaires » correspond à des audits dont le but est de veiller à la conformité du système de contrôle AB, AOP, IGP, STG avec la législation européenne. Par exemple, en 2019, la Croatie, les Pays-Bas et l'Espagne doivent faire l'objet d'un audit sur l'AB, tandis que

---

[25] Art. L. 521-1 du Code de la consommation : https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006069565&idArticle=LEGIARTI000032223185&dateTexte=&categorieLien=cid.

[26] Art. L. 231-1 du Code rural et de la pêche maritime : https://www.senat.fr/application-des-lois/pjl13-279.html

[27] Art. L. 521-17 du Code de la consommation. : https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000032224935&cidTexte=LEGITEXT000006069565&dateTexte=20160701 V. par exemple : Arrêté du 9 décembre 2017 portant suspension de l'exportation et de la mise sur le marché de certains produits d'alimentation infantile fabriqués par la société Celia-laiterie de Craon, JORF n°0289 du 12 décembre 2017 République Française, 2017. Arrêté du 9 décembre 2017 portant suspension de l'exportation et de la mise sur le marché de certains produits d'alimentation infantile fabriqués par la société Celia-laiterie de Craon. *JORF n°0289 du 12 décembre 2017, texte n° 17* .

Chypre, l'Irlande et la Suède seront audités sur les AOP, IGP, STG. Ces audits donnent lieu à la production d'un rapport par la Commission présentant des recommandations à l'Etat-membre et auxquelles l'autorité compétente peut répondre (Commission européenne DG de la santé et sécurité alimentaire, 2019).

A l'échelle nationale, les SIQO sont régis par un système de contrôle dont la structure est définie par l'Etat membre et par une ou des autorités compétentes désignées par l'Etat membre afin de vérifier le respect des exigences légales. L'Etat français a ainsi chargé de la protection et du contrôle des SIQO l'INAO, établissement public initialement fondé en 1935 pour la défense du marché des vins.

En France, le système de contrôle des SIQO repose sur les acteurs suivants : l'INAO (et les OC, Organisme certificateur) et la DGCCRF. L'INAO intervient avant la mise sur le marché des produits SIQO et en gère le dispositif de contrôle. L'INAO délègue en revanche son rôle de contrôle des opérateurs aux Organisme de contrôle (OCO), tout en continuant à superviser et évaluer ces derniers afin de garantir la qualité du suivi des opérateurs SIQO (Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt et Direction générale de l'alimentation, 2017). Les OC doivent être agréés par l'INAO et accrédités par le Comité français d'accréditation (COFRAC). Ces organismes permettent de certifier le respect du Cahier des charges (CDC) propre à chaque produit. Les OC élaborent le plan de contrôle, celui-ci devant être validé par l'INAO.

La DGCCRF, quant à elle, contrôle les produits une fois mis sur le marché, notamment par rapport à l'obligation de certification et à l'étiquetage des produits SIQO. En d'autres termes, elle vérifie la loyauté des informations sur les produits commercialisés. Des plans de contrôle annuels programmés par filière au niveau national sont ainsi suivis par la DGCCRF. Par exemple, en 2017, 43 741 opérateurs SIQO hors AB ont été contrôlés au cours desquels 5 376 manquements ont été constatés. Quant à l'AB, 1 690 opérateurs AB ont été contrôlés (sur environ 54 000 opérateurs engagés), avec un taux de non-conformité (toute catégorie de produit confondue) vis-à-vis de l'AB de 18 % (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017b). En outre, des analyses de résidus de pesticides sont prévues (DGCCRF, 2019).

Les SIQO hors AB et l'AB présentent chacun des particularités en termes de système de contrôle qui sont détaillées ci-après.

SIQO hors AB

Concernant les acteurs intervenant dans le système de contrôle, les SIQO hors AB en France présentent la spécificité de faire intervenir des OCO et des Organisme de défense et de gestion (ODG). En effet, à la place des OC, les SIQO hors AB du secteur viticole peuvent être contrôlés par des Organisme d'inspection (OI). C'est pourquoi dans le cas des SIQO hors AB on parle d'OCO qui regroupe à la fois les OC et les OI. Les OC, au contraire des OI, doivent prévoir un plan d'action et des sanctions en cas de non-conformité constatée[28]. Pour information, la liste des OCO pour les SIQO (seulement hors AB) est disponible sur le site de l'INAO[29]. Un ODG rassemble les acteurs de la filière concernée et en défend les intérêts. Pour être effectif, l'ODG doit être reconnu par un comité de l'INAO à raison d'un seul ODG pour produit sous SIQO. Il est à noter qu'un même ODG peut prendre sous sa responsabilité un ou plusieurs produits, d'une ou plusieurs filières. Chaque ODG choisit un OCO et émet un avis sur le plan de contrôle élaboré par ce dernier (INAO, 2017).

Les produits agricoles et alimentaires issus de systèmes de qualité sont contrôlés selon des plans de contrôle propres à chacun des produits et qui sont soumis à la validation préalable de l'INAO en tant qu'autorité compétente.

---

[28] INAO. *Le contrôle des signes officiels d'identification de la qualité et de l'origine.* https://www.inao.gouv.fr/content/download/897/8186/version/1/file/Plaquette %20Contro %CC %82le %20des %20SIQO.pdf

[29] INAO. (2019, 04 18). *Liste des organismes de certification et d'inspection.* Récupéré sur https://extranet.inao.gouv.fr/fichier/CoordonneesdesorganismesdecontroleagreesINAO.pdf

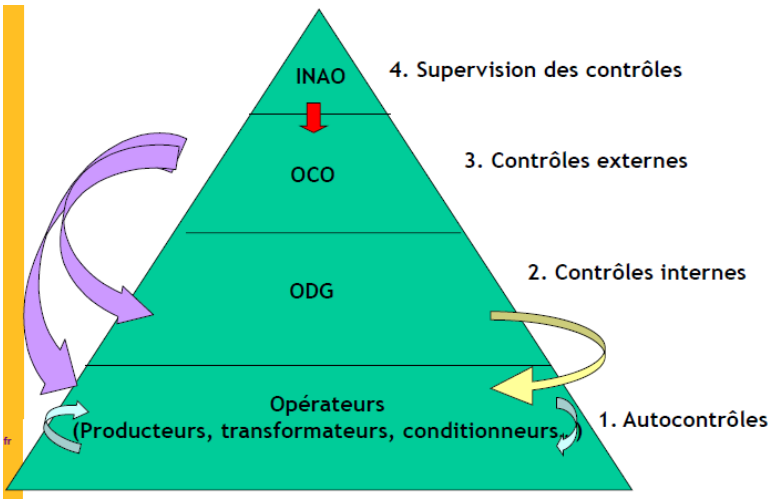


Figure 1-22 : Organisation des contrôles (INAO, 2016)

Le plan de contrôle, tel que défini par l'INAO, se décompose parmi les 3 niveaux suivants (Figure 1-23) :

1 Autocontrôles réalisés par l'opérateur sur sa propre activité, notamment par les enregistrements et la traçabilité de ses activités
2 Contrôles internes réalisés sur ses opérateurs par l'ODG, apportant ainsi un support pour une amélioration continue
3 Contrôles externes réalisés par les OCO sous 2 formats : sur les ODG et sur les opérateurs.

Suite à une modification du Code rural en 2015, des Dispositions de contrôle communes (DCC) ont été instaurées. Ces DCC ayant pour objectif de simplifier les plans de contrôle des SIQO, elles permettent d'offrir un socle commun et cohérent à l'ensemble des produits sous SIQO. Ainsi les plans de contrôle comportent désormais à la fois des DCC au SIQO (hors AB) et à la filière, et des dispositions de contrôle spécifiques à chaque produit (INAO, 2019e). Il est à noter que l'actualisation des plans de contrôle en vigueur est requise pour le 6 janvier 2020 (INAO, 2019c).

Figure 1-23 : Composition des plans de contrôle[30]

[30] https://www.inao.gouv.fr/Espace-professionnel-et-outils/Controles-des-signes-d-identification-de-l-origine-et-de-la-qualite-SIQO/Dispositions-de-controle-communes

Les contrôles ont pour objet de garantir le respect des critères de production tels que présentés dans les CDC. Le plan de contrôle définit ainsi les fréquences et modalités de ces contrôles (INAO, 2016). Chaque filière SIQO applique ces modalités de contrôle en faisant valider un plan de contrôle propre à chaque produit sous SIQO. Ainsi le plan de contrôle type des fromages AOP détaille les points à contrôler de même que le niveau (autocontrôle, interne ou externe) la méthode (visuelle, documentaire, analytique) et la fréquence. Le déroulé des examens, notamment organoleptiques et analytiques, y sont détaillés, tout comme le traitement aux manquements (INAO, 2019a). À titre d'exemple (non exhaustif), le plan de contrôle du fromage Salers AOP prévoit une liste de points à maitriser et les modalités des contrôles pour chacun de ces points. La ration de base de l'alimentation du cheptel doit ainsi être exclusivement composée d'herbe pâturée. Ce point est vérifié par l'autocontrôle (à travers la déclaration dite PAC (accès aux subventions de la Politique agricole commune)et la tenue d'un registre), par le contrôle interne et le contrôle externe (vérification documentaire et visuelle). Les propriétés organoleptiques sont contrôlées sur 3 éléments : la flaveur (goût, odeur) et la pâte (aspect, texture), puis la croûte, et selon deux modalités : le gradage et l'évaluation par une commission sensorielle. Le gradage est inclus dans le contrôle interne et effectué par les techniciens de l'ODG en cave d'affinage. La commission sensorielle doit se réunir pour noter les fromages lors de sessions dédiées. Pour harmoniser les notations, un lexique de défauts est élaboré : une pâte « sèche » désigne un fromage mettant du temps à se déliter sur la langue[31]. Ces contrôles sensoriels sont très normés et encadrés. Un cas médiatisé, celui de Charlotte Salat, a fait émerger le débat concernant les critères jugés trop stricts et fermés des caractéristiques sensorielles. En effet, les fromages Salers Tradition de l'éleveuse sont produits à partir d'un cheptel exclusivement de race Salers, trait à la main, n'ont pas reçu la note minimale pour rester dans l'AOP, et elle en a donc été exclue en 2018 (Bayssat, 2018 ; Reynel, 2018) [32].

Plus précisément, un contrôle des propriétés organoleptiques du produit est imposé aux AOP et aux LR (et facultatif pour les IGP et STG). Dans le cas des AOP, le contrôle organoleptique consiste en un examen sensoriel par une Commission dédiée. Le jury, composé des professionnels/techniciens, d'experts « porteurs de mémoire », d'usagers du produit, s'assure que le produit examiné est en adéquation avec le profil sensoriel attendu et décrit par le cahier des charges. Quant au LR, le contrôle organoleptique vise à garantir que la qualité supérieure par rapport au produit standard est maintenue. Selon le guide du demandeur LR, le produit standard doit « *être cohérent avec les informations du CDC* » faire l'objet d'un « *choix justifié dans l'étude de faisabilité technique et économique* ». Aussi appelé « *courant de comparaison* », le produit standard est défini dans le CDC pour chaque produit. Néanmoins les caractéristiques des produits standards peuvent être très hétérogènes d'un CDC à l'autre. D'une part, un test de consommateur hédonique est réalisé pour démontrer (lors de l'évaluation) et pour attester (lors du suivi) de la supériorité de la qualité du produit LR par rapport au produit standard. Certains laboratoires indiquent que ce test implique une soixantaine de participants[33]. Concernant la comparaison sensorielle du produit LR avec un produit standard, le CDC de la viande bovine Salers LR n°LA08/04[34] décrit le produit courant de comparaison comme étant de la viande issue d'animaux de type racial laitier (majoritairement Prim'Holstein), nés, élevés et abattus en France, de même catégorie (génisse, vache, bœuf), de conformation R, O ou P, et de couleur de viande entre 1 et 4, maturée entre 3 et 5 jours pour les viandes à griller/rôtir (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a). Le plan de contrôle de ce même label indique que pour vérifier la supériorité du LR, l'OC « réalise par période de 3 ans 1 test hédonique pour tester la préférence du produit par le consommateur (jury de 60 consommateurs) et 2 profils sensoriels ». D'autre part, un profil sensoriel est établi lors de l'évaluation pour en vérifier les caractéristiques sensorielles. L'INAO a défini deux possibilités (« modes ») d'un ensemble d'outils et de méthodes destiné à évaluer et suivre la qualité supérieure (voir détails dans le tableau 1-10). Les ODG doivent prioritairement choisir le mode 1, qui est majoritaire et correspond à un programme de profils sensoriels et de tests hédoniques, alors que le mode 2 n'est qu'une alternative devant être argumentée par l'ODG (Tableau 1-10), (INAO, 2014).

---

[31] CERTIPAQ. (2014). *Plan de contrôle Salers AOP*. https://www.aop-salers.com/regles/

[32] SM avec Claude Bernard, 2018. Cantal : une jeune productrice qui fournit des grands chefs étoilés perd l'AOP Salers. *France 3*, 18 mai 2018. https://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/cantal/cantal-jeune-productrice-qui-fournit-grands-chefs-etoiles-perd-aop-salers-1477825.html

[33] Agrotec/Capinov. (2019, 04 15). *Analyse sensorielle LR / Dossier d'homologation LR*. Récupéré sur https://www.capinov.fr/analyse-sensorielle-label-rouge-inao.php; https://www.agrotec-france.com/dossier-dhomologation-label-rouge.html

[34] CERTIS, 2013. Plan de contrôle Viande bovine de race Salers LA08/04. https://www.salers.org/sites/default/files/webmaster/plan_controle_la-08-04_validation-14-03-2013.pdf

	Outils pour établir la grille de caractérisation et l'évaluation de la qualité supérieure	Outils pour assurer le suivi de la qualité supérieure
MODE 1	**Profil sensoriel** (programme 133 COFRAC) Avec une participation souhaitable des professionnels de la filière **Test hédonique** (programme 133 COFRAC) http://www.cofrac.fr/Doc/Docs2/Documentation%20spécifique/4.%20Laboratoires/Programmes/P133V0.DOC	**Test hédonique** (programme 133 du COFRAC) réalisé par un laboratoire accrédité, tous les 2 ans minimum accompagné ou non d'un profil sensoriel + actions correctives en tant que de besoin (avec nécessairement un profil sensoriel).
MODE 2	**Méthodes alternatives proposées par l'ODG et validées par l'INAO**	**Méthodes alternatives** proposées par l'ODG, validées par l'INAO, tous les 2 ans au minimum + actions correctives si nécessaire

Tableau 1-10 : Types d'analyses et fréquence pour l'évaluation et le suivi de la qualité supérieure (INAO, 2014)

Le fonctionnement du contrôle des systèmes de production de qualité est actuellement très hiérarchisé et avec de nombreux intervenants. En 2018, le Conseil économique, social et environnemental (CESE) préconisait d'analyser et de vérifier l'efficience du système de contrôle actuel, notamment en termes de coûts (Joseph et Marmier, 2018). En effet, s'agissant de démarches volontaires, la certification des produits SIQO est à la charge des opérateurs qui s'acquittent de divers frais : paiement des audits, contrôles et analyses, cotisation à l'ODG, redevance à l'INAO… Ainsi en 2018, les ressources des ODG d'AOP et IGP provenaient en moyenne à 64 % des cotisations des opérateurs, le reste étant couvert par divers fonds (subventions, prestations de services…) (INAO, 2019b).

Comme indiqué précédemment, l'INAO procède au contrôle et à l'évaluation des OCO. Bien que l'INAO soit en charge de l'agrément des ODG, en 2008, le Conseil national de l'alimentation (CNA) recommandait que l'INAO puisse également disposer d'outils juridiques relatifs au contrôle des ODG, comme c'est le cas pour les OCO (Conseil national de l'alimentation, 2008). En outre, une étude portant sur le consortium du Prosciutto di Parma AOP, pointait du doigt le fait que les ODG sont fortement hétérogènes (composition, ressources, stratégie...) et que cette hétérogénéité pouvait créer des difficultés de coopération et des tensions, notamment lorsqu'il s'agit de définir le niveau de restriction à mettre en place pour les engagements de la production du SIQO. Par exemple, les membres du consortium pratiquant des relations proches avec les consommateurs préféreront des engagements plus contraignants par rapport à l'origine de la viande, contrairement aux membres issus de grandes corporations (Dentoni *et al.*, 2012).

AB

À l'échelle européenne, le règlement (CE) n°889/2008 (Commission européenne, 2008c) précise, dans son article 65, les points relatifs aux visites de contrôle dans le secteur de l'AB détaillant l'organisation des contrôles :

- Au moins une inspection physique annuelle chez l'ensemble des opérateurs par l'organisme de contrôle (OC) ;
- Possibilité de prélever et analyser des échantillons (cette option devient obligatoire en cas de suspicion de non-respect des principes de l'AB) ;
- Visites de contrôle par sondage effectuées par l'OC (le plus souvent inopinées).

Chaque opérateur souhaitant être certifié AB choisit directement son OC parmi la liste officielle disponible sur le site de l'Agence Bio où chaque OC dispose de son identifiant « FR-bio-xx ». En outre, le système de contrôle de l'AB se caractérise par

une absence d'ODG, contrairement aux autres SIQO[35]. De plus, l'AB ne requiert pas la rédaction de CDC propre à chaque produit ni leur validation par l'INAO. L'AB se distingue également des autres SIQO par le partage de l'action publique pour sa défense et son déploiement entre deux acteurs : l'INAO et l'Agence Bio. Bien que l'INAO conserve les fonctions de protection et défense de l'AB (comprenant également la garantie des contrôles), l'Agence Bio est en charge de la communication et de la promotion de l'AB (INAO, 2019d). Par ailleurs, conformément à l'article 28.1 du RCE 834/2007, tout opérateur de l'AB doit se déclarer auprès de l'autorité compétente, à savoir l'Agence Bio en France, afin d'être enregistré[36].

La révision des règlements relatifs à l'AB concernera notamment les procédures de certification et de suivi. Ainsi l'article 38.3 du règlement (UE) 2018/848 indique qu'en cas de trois contrôles pour un opérateur sans manquement observé portant atteinte à l'intégrité des produits biologiques, alors le contrôle initialement annuel peut devenir bisannuel[37]. Les impacts d'une telle décision seront donc à étudier.

La règlementation ayant cours en UE, requiert la mise en place de la Certification par une tierce partie (CTP). Pour rappel, l'objectif premier de toute certification est de garantir les informations communiquées aux consommateurs. Or la CTP, nécessaire pour accéder au marché AB, est confiée à des organismes privés (les OC). Cette privatisation du contrôle de la qualité engendre des critiques relatives aux coûts de la certification, à la conventionnalisation et uniformisation de l'AB (Mundler et Bellon, 2011). A l'échelle internationale, l'IFOAM (en anglais, *International Federation of Organic Agriculture Movements*) reconnait d'autres formes de certification dont les Systèmes participatifs de garantie (SPG) définis comme des systèmes de certification orientés localement, basés sur la participation active des acteurs concernés, la confiance et l'échanges de connaissances (May et IFOAM, 2008). Dans ce contexte, l'IFOAM a mené une étude en 2008 en Europe sur la potentielle mise en place de certification de groupe, aussi appelée Système de contrôle interne (SCI). Les SCI sont un système d'assurance-qualité dans lequel l'OC délègue le contrôle annuel aux membres d'un groupe, tout en surveillant l'efficacité de ce contrôle entre membres du groupe. Selon cette étude, ce type de certification pourrait être effectif et efficient, mais requerrait probablement des allègements administratifs pour ces collectifs (Van Den Akker, 2009). Selon l'analyse menée sur 5 SPG de par le monde, Lemeilleur et Allaire (2018) montrent que ces modes de garantie alternatifs ont l'avantage d'offrir un cadre d'échange et de communication privilégié entre les opérateurs et parties prenantes. Bien que ce type requière un investissement bénévole supplémentaire, il permet de réduire les coûts monétaires liés à la certification. Les SPG peuvent être une alternative à la certification par tiers, mais cela nécessite la reconnaissance légale par les autorités concernées.

Conclusion

Les SIQO sont soumis à un système de contrôle très encadré. L'objectif est avant tout de protéger le produit labellisé et son image face aux fraudes, et de garantir aux consommateurs le respect des critères et des caractéristiques spécifiés dans les cahiers des charges. L'omniprésence et omnipotence de l'INAO, en tant qu'autorité compétente, est également un point clé de la structure du système de contrôle. Au vu de la multiplicité des acteurs intervenant dans les systèmes de contrôle des SIQO ainsi que les coûts engendrés, le CESE préconisait d'en évaluer l'efficience et si besoin de les réorganiser et simplifier (Joseph et Marmier, 2018). Enfin, la transparence de ce système peut être approfondie, p. ex. grâce à la publication de résultats du système, à l'instar de la plateforme Alim'confiance présentant les résultats des contrôles sanitaires le long de la chaine agro-alimentaire.

---

[35] https://www.inao.gouv.fr/content/download/897/8186/version/1/file/Plaquette %20Contro %CC %82le %20des %20SIQO.pdf

[36] Agence Bio. (2019, 04 18). *Les Organismes Certificateurs*. Récupéré sur Agence Française pour le Développement et la Promotion de l'Agriculture Biologique: https://www.agencebio.org/profil/pages-communes/les-organismes-certificateurs-en-france/

[37] Commission Européenne, 2018. Règlement (UE) n°2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CE) n°834/2007 du Conseil. *JOUE L 150 du 14.06.2018, p. 1–92*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX %3A32018R0848 Commission européenne, 2018a. Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) no 834/2007 du Conseil. *JOUE L 150 du 14.6.2018, p. 1–92*.

1.3 Diversité et classification des produits animaux transformés

Auteur : Isabelle Souchon

1.3.1 La place des aliments transformés dans la diète

Notre alimentation est constituée d'un ensemble d'aliments, eux-mêmes constitués d'un assemblage plus ou moins complexe de différentes matières premières agricoles qui sont associées à des opérations de cuisson, mélange, fractionnement etc… Quels que soient les contextes dans lesquels sont réalisés ces aliments (échelle industrielle, échelle artisanale, restauration hors foyer ou à domicile) notre alimentation est donc constituée d'un ensemble d'aliments ayant subi des transformations. Aujourd'hui les « aliments transformés » ou « aliments industriels » sont au cœur de nombreux questionnements quant à leurs incidences pour notre santé et notre environnement.

En effet, les « aliments transformés » sont les seuls produits (toutes catégories confondues) pour lesquels la confiance des consommateurs français, en termes de sécurité pour la santé humaine, a diminué entre 2011 et 2015 (Jauneau et al., 2016[38]). Pourtant, la place des aliments transformés dans le régime alimentaire des pays industrialisés n'a cessé de croître ces dernières décennies. Pratiques, bons, goûteux, ils répondent aux besoins des modes de vie contemporains et constituent désormais des contributeurs importants des apports nutritionnels et micro-nutriments (Slimani *et al.,* 2009[39]). L'étude INCA 3[40] montre que ces derniers contribuent à 50 % massique de la diète d'un adulte et à 70 % de celle d'un enfant (INCA3, Anses, 2017) (figure 1.24).

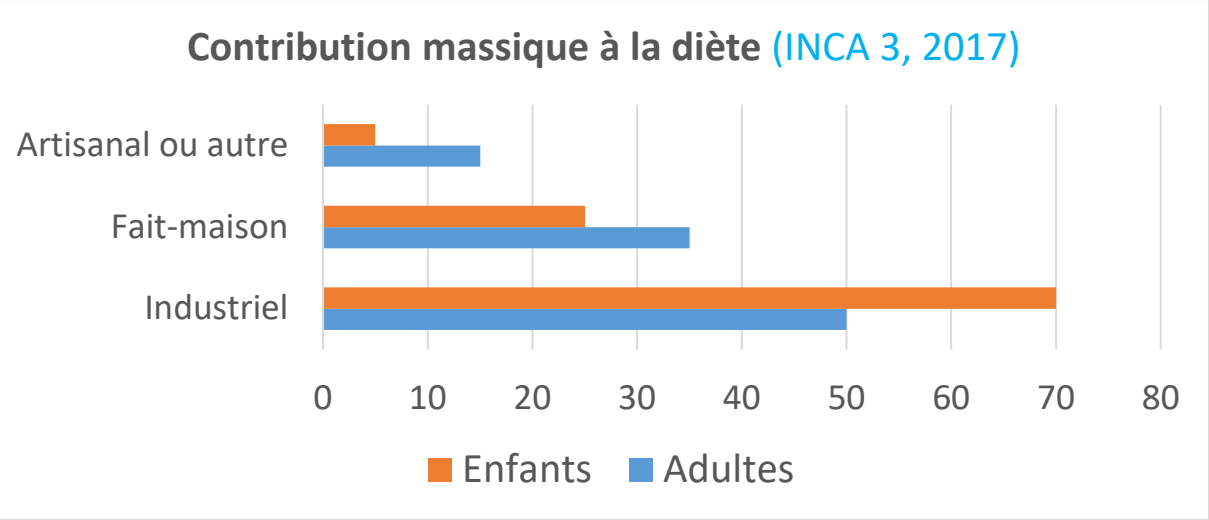


Figure 1.24 : Contribution massique à la diète des aliments en fonction de leur contexte de production pour les adultes et enfants en France (INCA3, Anses 2017)

1.3.2 Panorama des produits transformés à base de produits animaux vendus en grandes surfaces

Si les modes de production des produits animaux tendent majoritairement vers des modèles assez similaires, les produits transformés à base de produits animaux sont eux très divers. Cette grande diversité s'explique au-delà de la diversité des matières premières et des modes de production, par la diversité des transformations. Un exemple de cette diversité de l'offre

[38] Jauneau, P., Daudey, E., and Hoibian, S. (2016). BAROMÈTRE DE LA PERCEPTION DES RISQUES SANITAIRES 2015 LES RISQUES SANITAIRES PRÉOCCUPENT MOINS. CREDOC

[39] N Slimani, G Deharveng, DAT Southgate, C Biessy, V Chaje, MME van Bakel, MC Boutron-Ruault, A McTaggart, S Grioni, J Verkaik-Kloosterman, et al. (2009). Contribution of highly industrially processed foods to the nutrient intakes and patterns of middle-aged populations in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition study. European Journal of Clinical Nutrition *63*, 206–225.

[40] ANSES, 2017. "INCA 3 : Étude Individuelle Nationale Des Consommations Alimentaires 3." ANSES

alimentaire à base de produits animaux est présenté sur la figure 1.25, où le nombre de produits commercialisés (renseignés dans la base de données Oqali[41]) à base de bœuf, de porc, de poulet, d'œuf ou de lait est représenté.

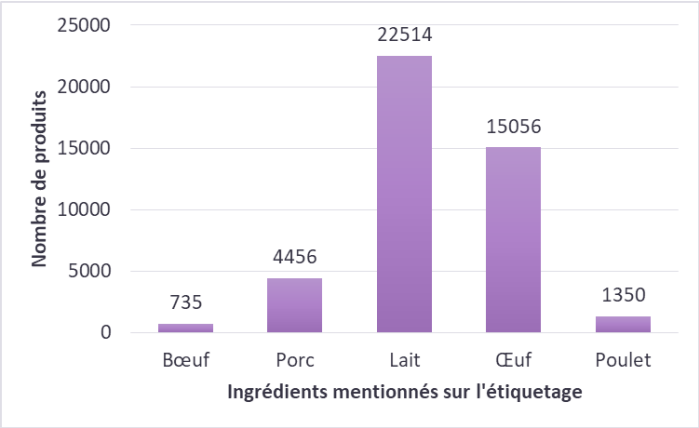


Figure 1.25 : Nombre de produits transformés vendus en grandes et moyennes surfaces contenant du bœuf, du porc, du lait, de l'œuf ou du poulet dans leur liste d'ingrédients (extraction de la base de données publiques Oqali –15-05-2018).

On peut noter ainsi un nombre de références élevées de produits transformés à base de produits animaux vendus en France (44 111 références – bases OQALI 15-05-2018). Les produits transformés à base de lait et d'œuf sont les plus nombreux, suivis par les produits à base de porc et enfin à base de poulet et de bœuf.

Au-delà de leur nombre, c'est leur diversité en termes de recettes et donc de procédés de transformation que l'on peut mettre en avant. A titre d'exemple leur teneur en protéines et leur densité calorique sont présentées sur la figure 3. Les produits contenant du lait et des œufs sont ceux offrant des densités caloriques les plus élevées mais des teneurs en protéines plus faibles. On y trouve par exemple des produits appartenant aux familles des « glaces et sorbets », aux « matières grasses tartinables » ou encore aux « sauces » ou « viennoiseries ». Les produits à base de porc présentent quant à eux les teneurs en protéines les plus élevées expliquées par les produits de la catégorie « charcuterie » en particulier.

Les propriétés nutritionnelles des aliments transformés peuvent être caractérisées par leur Nutri-Score (Julia et Hercberg, 2017)[42]. Le Nutri-Score, aussi appelé système 5 couleurs, est un système d'étiquetage nutritionnel basé sur un logo avec cinq valeurs allant de A à E et du vert au rouge, établi en fonction de la valeur nutritionnelle de l'aliment (A étant le meilleur score et E le plus mauvais). Ce système a été mis en place par le gouvernement français en 2016 dans le cadre de la loi de modernisation du système de santé.

[41] Oqali : Observatoire de l'Alimentation https://www.oqali.fr/

[42] Julia, C., and Hercberg, S. (2017). Public Health Panorama: volume 3, issue 4, December 2017. 3, 14.

Figure 1.26 : Caractéristiques (densité calorique et teneur en protéine) des produits transformés à base de produits animaux contenant du bœuf, du porc, du lait, de l'œuf ou du poulet dans leur liste d'ingrédients (extraction de la base de données publiques Oqali –15-05-2018).

L'Oqali suit l'engagement des industriels dans la démarche d'affichage du Nutri-Score sur l'emballage de leurs produits. Ainsi, la part des marques engagées dans cette démarche, représente environ 25 % des volumes de vente des aliments transformés (Oqali, 2019[43]).Sur les 25 % des références répertoriées par l'Oqali, 61 % présentent un Nutri-Score A, B ou C (figure 1.27) correspondant à des produits plutôt à privilégier.

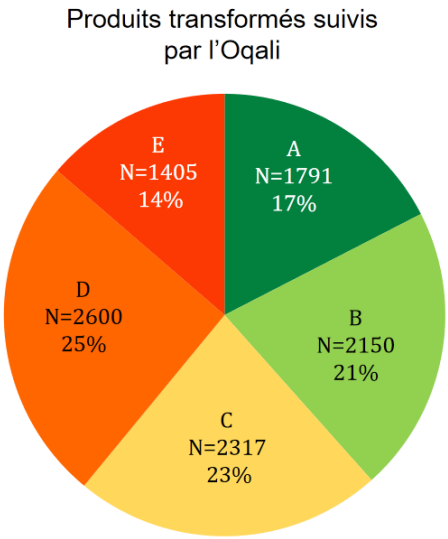


Figure 1.27 : Données Oqali sur le suivi de l'étiquetage du Nutri-Score / 10263 références de produits transformés suivis par l'Oqali / données recueillis au 26/08/2019, 93 formulaires reçus sur les 178 exploitants inscrits sur le site de Santé publique France.- https://www.oqali.fr/content/download/3625/34444/version/1/file/Oqali+2019_Déploiement+du+Nutri-Score_analyse+à+partir+des+données+transmises+à+l'Oqali.pdf

L'étude Oqali sur le suivi de l'affichage du Nutri-Score par les industriels montre également que plus de la moitié des produits transformés mentionnant le Nutri-Score sont des aliments à base de produits animaux (55 %). Toutefois ces données ne rendent compte que de la diversité des produits commercialisés par des industriels engagés dans la démarche d'affichage du Nutri-Score.
Afin d'avoir un aperçu plus large de la diversité des caractéristiques nutritionnelles des produits animaux, une extraction des données de la base Open Food Facts[44] a été réalisée pour les produits ayant le mot « PORC » ou « LAIT » dans le nom ou la catégorie du produit (figure 4).
Même si la base de données d'Open Food Facts n'est pas une base exhaustive de données (données obtenues à partir des photos d'étiquetage des consommateurs), elle permet d'illustrer la diversité et de comparer les produits. La figure 5 montre respectivement que 30 % et 43 % seulement des produits à base de « porc » et « lait » ont un Nutri-Score de A, B ou C. Pour les produits transformés à base de poisson cette proportion augmente jusqu'à 64 %.

L'étude CLV de novembre 2018 a regardé plus en détail les plats préparés à base de bœuf. Une grande variabilité des teneurs en bœuf a été observée, allant par exemple de 5 à 27 % pour les lasagnes (tableau 1.11). Cette étude a mis également en lumière que c'est au rayon des surgelés qu'on retrouve le pourcentage moyen de viande le plus élevé pour les hachis Parmentier : 22 % contre 16,6 % au rayon frais en moyenne. Le prix moyen des hachis vendus au rayon frais est pourtant près de deux fois supérieur à celui du rayon des surgelés.

[43] https://www.oqali.fr/content/download/3625/34444/version/1/file/Oqali+2019_Déploiement+du+NutriScore_analyse+à+partir+des+données+transmises+à+l'Oqali.pdf
[44] Open Food Facts – bases de données sur les produits alimentaires renseignées par des consommateurs sur la base du volontariat - https://fr.openfoodfacts.org/

Tableau 1.11 : Panorama de la teneur en viande retrouvée dans la plats préparés à base de bœuf (Enquête CLV , 11/20185)

Catégorie	Pourcentage moyen de viande	Teneur minimale	Teneur maximale
Lasagnes	13,2 %	5 %	26,6 %
Ravioli	11,1 %	4 %	37 %
Hachis Parmentier	19,7 %	12,4 %	32 %
Moussaka	16,4 %	13 %	21 %
Cannelloni	14 %	10 %	21 %
Autres pâtes à la viande	11 %	4,1 %	17 %

Une étude réalisée sur les pizzas vendues en grandes surfaces a mis également en évidence une grande différence entre les pizzas surgelées et les pizzas des rayons frais (données Oqali, n=380)[45]. Ces différences portaient à la fois sur le nombre d'additifs présents, sur la teneur en sel comme sur la part de produits animaux (exprimé en kcal). Les pizzas surgelées se distinguaient par des valeurs significativement plus faibles pour ces trois critères. Elles présentaient par ailleurs un meilleur NutriScore.

Ce panorama des aliments transformés à base de produits animaux montre une grande diversité qui se décline également au sein d'une même catégorie d'aliment. Afin de pouvoir les comparer d'un point de vue de leurs propriétés il est nécessaire de pouvoir les classer et pas uniquement sur la base de leur composition.

1.3.3. Les classifications des aliments

Il existe de nombreuses classifications des aliments qui ont des objectifs très différents. Ces classements peuvent par exemple aider à mettre en place des recommandations nutritionnelles ou des réglementations. Elles permettent de préciser le groupe d'aliments où les caractéristiques auxquels il est fait référence. Les produits animaux sont classés dans deux des 7 catégories principales permettant de décrire de façon simple les régimes alimentaires sur la base des apports en macro-nutriments. Ces 7 catégories sont :

- Les produits laitiers (lait, fromages, yaourts)
- Les viandes, les poissons et les œufs + légumineuses
- Les fruits et les légumes
- Les féculents, les pommes de terre, les céréales, les légumes secs…
- Les matières grasses (beurre, huiles, crème …)
- Les boissons non sucrées
- Les produits sucrés et gras (dont boissons sucrées et/ou alcoolisées)

[45] Maurice B.., Bidault H., Soler LG., Saint-Eve A., Souchon I., Insight into processed foods to investigate the links between a new processing score and nutritional characteristics: case of the French pizza market (soumis)

La classification FoodEx2

De façon plus précise, l'agence européenne de sécurité alimentaire (European Food Safety Authority (EFSA)), propose une classification en 216 groupes associés selon une classification hiérarchique à différents risques ou expositions (FoodEx2[46]). Cette classification permet de décrire jusqu'à 2673 aliments à partir du codage proposé dans cette classification. Le tableau 2 présente la structure hiérarchique de cette classification.

Tableau 1.12 : Structure hiérarchique de la classification FoodEx2

Type	*Code*	*Food Group*	*Flag*
This field may have the values: H (hierarchy group) C (core list group) E (extended list group) A colour code (with H= blu, C=red and E=green) is also used to enhance readability	It is the unique alphanumerical code representing each element in the system	English descriptor for the food group (term). In this field, groups are differently formatted and indented to visually represent the hierarchical relationship (parent-child), where child sub-groups are included in the parent group.	This field reports the attribute 'state of food' and may have the values: r (raw commodity) d (Simple derivatives of raw commodities, ingredients) s (simple composite) c (aggregated, complex composite) g (heterogeneous group)

Cette classification donne également des éléments sur la transformation des aliments (« state of food »). En effet chaque catégorie est annotée d'une lettre indiquant s'il s'agit d'un aliment brut (r), d'un aliment dérivé d'un produit brut (d), d'un aliment composite simple (s) ou d'un aliment composite complexe (c). Toutefois la qualification, d, s, ou c, n'est pas toujours très évidente d'un point de vue des procédés mis en œuvre. Des exemples sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 1.13 : Exemples de groupes d'aliment et de leur qualification concernant leur transformation (Flag = « state of food ») - aliment brut (r), aliment dérivé d'un produit brut (d), aliment composite simple (s) ou aliment composite complexe (c)

Type	*Code*	*Food Group*	*flag*
H	A03VC	**Dishes excluding pasta or rice dishes, sandwiches and pizza)**	c
Type	*Code*	*Food Group*	*flag*
H	A04NJ	**Dry and fermented sausages**	s
C	A024X	**Salami-type sausage**	d
E	A024Y	Italian-type salami	d
E	A024Z	Hungarian-type salami	d
E	A025A	German salami	d
C	A025B	**Pepperoni/paprika-type sausage**	s
E	A025C	Chorizo and similar	s
E	A025D	Linguica, sausage	d
E	A025E	Cabanos	d
E	A025F	Ripened kolbasz	d
C	A025H	**Matured charcuterie products for cooking**	d

[46] (2015). *The food classification and description system FoodEx 2* (revision 2). EFSA Supporting Publications *12*, 804E.

C	A03VV	**Meat based dishes**	c
E	A03VX	Goulash	c
E	A03VY	Meat stew	c
E	A03VZ	Meat in aspic	d
E	A03XA	Meat loaf	c
E	A03XB	*Pork meat loaf*	c
E	A03XC	*Beef loaf*	c
E	A03XD	*Meat loaf with cheese, vegetables or other*	c
E	A03XE	Moussaka	c
E	A03XF	Meat burger (no sandwich)	c
E	A03XG	Meat balls	c
E	A03XH	Meat terrine	c
Type	*Code*	*Food Group*	*flag*
H	A02KB	**Processed fish products**	s
C	A02KF	**Smoked salmon**	s
C	A02KG	**Smoked herring**	s
C	A02KH	**Other smoked fishes**	s
C	A02KC	**Fish fingers, breaded**	s
C	A02KD	**Fish balls**	s
C	A02KE	**Fish paste - surimi**	s
C	A02KK	**Canned fish in oil**	s
C	A02KL	**Canned fish in sauce**	s
C	A02KM	**Canned fish in brine**	s
C	A02KJ	**Canned smoked fishes**	s

Si ce système normalisé de classification des aliments permet de simplifier la comparaison de données issues de sources différentes et de réaliser des analyses plus détaillées, celui-ci ne peut être utilisé pour éclairer les choix des consommateurs.

L'information des consommateurs sur les caractéristiques des produits qu'ils achètent en grandes surfaces passe par leur étiquetage qui comprend les labels (label bio, label rouge, label équitable…), les informations rendues obligatoires par le règlement INCO (Règlement (UE) n°1169/2011 concernant l'information du consommateur sur les denrées alimentaires (Règlement « INCO) dont en particulier la table nutritionnelle. La littérature montre que pour avoir un impact, notamment sur les populations à plus haut risque nutritionnel, l'information doit être fournie sous forme de logos simples et synthétiques, tels que le Nutri-Score. Ce type de logo peut également agir comme levier d'incitation pour les industriels à améliorer la qualité de leurs produits. Le Nutri-Score peut donc être considéré comme un outil de classement des aliments selon leur qualité nutritionnelle.

Toutefois, classer les aliments sur la base de leur composition nutritionnelle semble en effet aujourd'hui insuffisant pour comprendre les liens entre alimentation et santé. Les études d'exposition basées sur la classification FoodEx2 intègre les niveaux de transformation des aliments (Scholz et al., 2018)[47]. En effet, si les produits transformés industriels sont très prisés des consommateurs, une partie de leur bénéfice santé est aujourd'hui largement remis en question. Ils offrent certes des

[47] Scholz, R., Herrmann, M., Kittelmann, A., Schledorn, M. von, Donkersgoed, G. van, Graven, C., Velde-Koerts, T. van der, Anagnostopoulos, C., Bempelou, E., and Michalski, B. (2018). Database of processing techniques and processing factors compatible with the EFSA food classification and description system FoodEx 2 Objective 1: Compendium of Representative Processing Techniques investigated in regulatory studies for pesticides. EFSA Supporting Publications 15, 1508E.

qualités sensorielles, des qualités sanitaires et des durées de conservation très appréciées et souvent un niveau de praticité recherché (van Boekel *et al.,* 2010[48]). Cependant ils sont également pointés du doigt pour être pour partie responsables de pathologies telles que le diabète de type 2, l'obésité, les maladies cardio-vasculaires, ou encore la dépression (Monteiro *et al.,* 2018 [49], Moodie *et al.,* 2013[50], Adjibade *et al.,* 2019[51]). Ainsi plusieurs classifications des aliments prenant en compte les niveaux de transformation ont été proposées.

Transformation ou ultra-transformation des produits animaux

Certaines nomenclatures telles que FoodEx2 (EFSA) utilisée pour évaluer les risques liés à l'alimentation ou encore la nomenclature utilisée dans l'annexe 2 du règlement européen 1933/2008 sur les additifs alimentaires, comportent des éléments intéressants pour qualifier le degré de transformation. D'autres nomenclatures, telle que la classification NOVA (ou le score SIGA qui en découle), caractérisent les aliments selon leur « degré de processing ». Ces dernières, très utiles en épidémiologie (car transposables au régime alimentaire), restent toutefois assez empiriques et agrègent des effets de composition, de transformation, voire des pratiques à domicile.

Afin de caractériser uniquement le degré de transformation (en s'affranchissant des effets composition), de récents travaux ont cherché à attribuer un indice de processing aux pizzas fraîches et surgelées présentes sur le marché français, à partir de leur diagramme des opérations unitaires. Contrairement à la perception d'une pizza « naturelle » qu'ont les consommateurs, les pizzas fraîches se sont révélées être plus « processées » que les pizzas surgelées. Le degré de processing varie également de manière significative entre les différentes familles de pizza (jambon-fromage, fromage, charcuterie, margarita…) et est fortement corrélé au Nutri-score mais faiblement à la catégorie NOVA.

Il serait intéressant de tester cette méthode sur d'autres types de produits pour s'assurer que ce degré de processing permet bien de discriminer les produits selon leur degré de transformation, y compris au sein d'une même catégorie, et de confirmer ou non la corrélation avec le Nutri-score.

L'Observatoire de la qualité des aliments en France (Oqali) montre que plus de la moitié des produits transformés mentionnant le Nutri-Score sont des aliments à base de produits animaux (55 %). Une étude exploratoire réalisée dans le cadre de l'expertise, à partir de l'extraction des données de la base *Open Food Facts*, apporte quelques indications sur le positionnement de ces aliments à par rapport aux classements Nutri-Score (Figure 1.28) et Nova (Figures 1.29 et 1.30). Cette extraction porte sur quelques 35 000 produits, dont environ 4 500 contiennent du porc, 6 800 du poulet, 2 500 du bœuf, 14 700 du lait, 4 200 des œufs et 8 000 du poisson (dont pêche). Ces chiffres donnent des ordres de grandeur de la diversité de l'offre des aliments commercialisés, à partir des différents produits bruts. Ces aliments sont très différents : par exemple, ceux à base de porc incluent le jambon cuit, les allumettes de lard allégées et fumées, et aussi le riz cantonais. Parmi les produits contenant du lait, on trouve tous les fromages et desserts lactés, et aussi les pains au lait. Aucun seuil minimal de teneur en produits animaux n'a été appliqué pour réaliser l'extraction des données. La Figure 4.1 montre que les produits se répartissent entre les 5 scores du Nutri-Score, quelle que soit leur teneur en protéines (on obtient le même résultat pour la densité calorique), illustrant la grande diversité des produits.

Reste qu'afficher un indicateur de transformation aux côtés d'autres logos tels que le Nutri-score, les labels préexistants (label bio, label rouge, label équitable…) et les autres informations rendues obligatoires par le règlement INCO, peut avoir pour effet d'ajouter de la « cacophonie » et compliquer plus encore le choix du consommateur. La question de la construction d'un indicateur global « composite », regroupant à la fois des critères de composition nutritionnelle et de niveau de transformation, est donc posée.

---

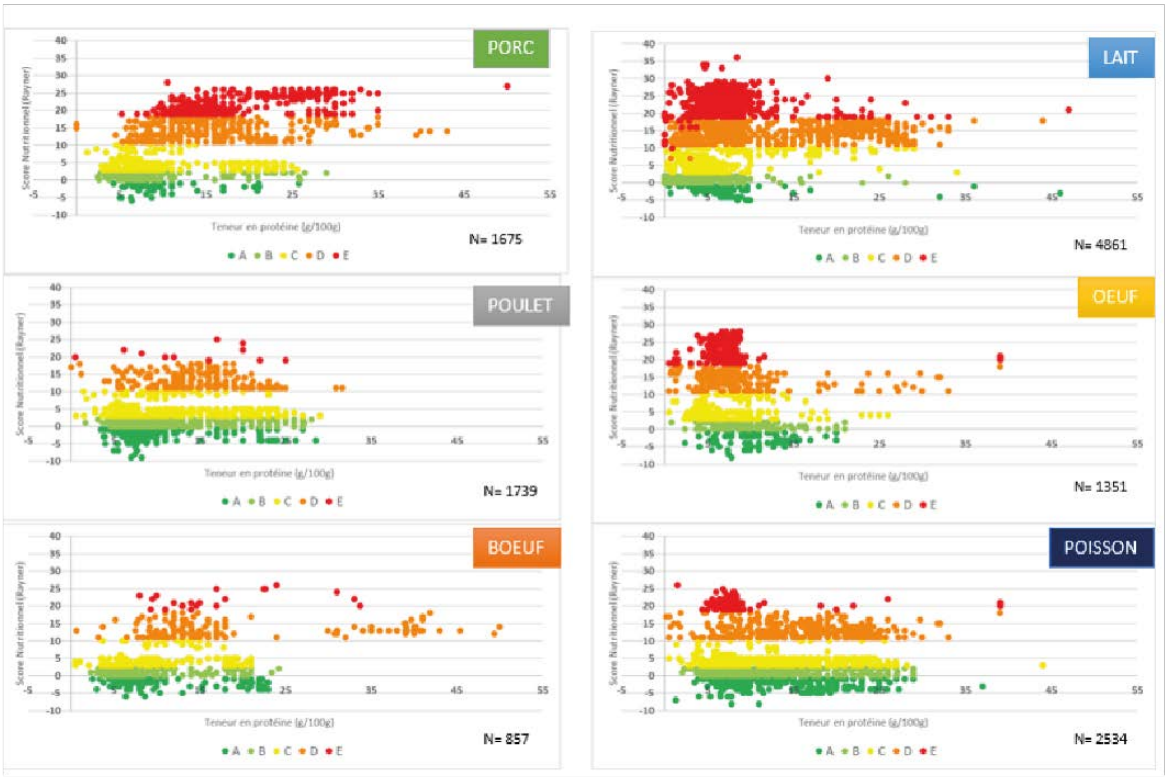
[48] van Boekel, M., Fogliano, V., Pellegrini, N., Stanton, C., Scholz, G., Lalljie, S., Somoza, V., Knorr, D., Jasti, P.R., and Eisenbrand, G. (2010). A review on the beneficial aspects of food processing. Mol. Nutr. Food Res. *54*, 1215–1247.

[49] Monteiro, C.A., Cannon, G., Moubarac, J.-C., Levy, R.B., Louzada, M.L.C., and Jaime, P.C. (2018). The UN Decade of Nutrition, the NOVA food classification and the trouble with ultra-processing. Public Health Nutrition *21*, 5–17.

[50] Moodie, R., Stuckler, D., Monteiro, C., Sheron, N., Neal, B., Thamarangsi, T., Lincoln, P., and Casswell, S. (2013). Profits and pandemics: prevention of harmful effects of tobacco, alcohol, and ultra-processed food and drink industries. The Lancet *381*, 670–679.

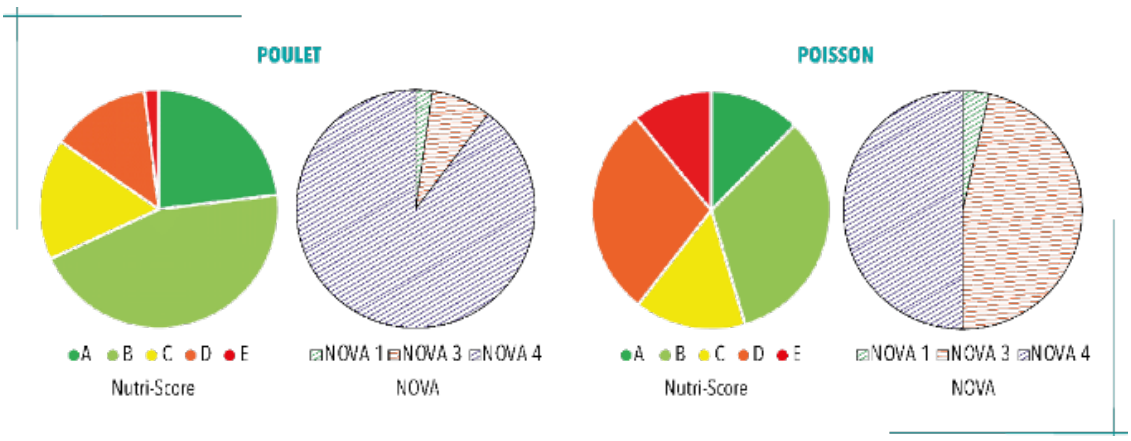
[51] Adjibade, M., Julia, C., Allès, B., Touvier, M., Lemogne, C., Srour, B., Hercberg, S., Galan, P., Assmann, K.E., and Kesse-Guyot, E. (2019). Prospective association between ultra-processed food consumption and incident depressive symptoms in the French NutriNet-Santé cohort. BMC Med 17, 78.

Figure 1-28 : Comparaison de la répartition des aliments industriels à base de produits animaux selon leur Nutri-Score et leur teneur en protéines. Données extraites de la base Open Food facts (mai 2020) – extraction des aliments dont le nom ou la catégorie contient les mots porc, poulet, bœuf, lait, œuf, poisson. Suppression des produits à information incomplète. L'axe des Y est une échelle continue qui va de -15 à +40 et correspond au score de Rayner à partir duquel est déterminé le Nutri-Score.



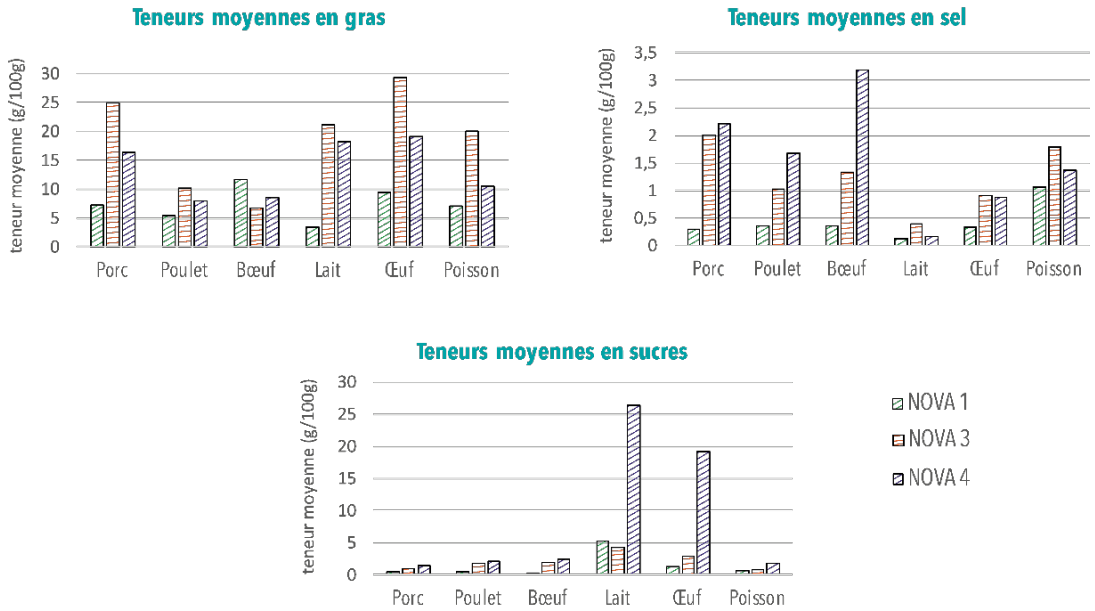
La Figure 1.29 montre que la majorité des aliments commercialisés emballés (ayant une étiquette) à base de poulet sont classés par le Nutri-Score en score A ou B, c'est-à-dire favorables à la santé. Pourtant une très grande majorité de ces mêmes aliments sont classés dans les produits ultra-transformés de la classe « Nova 4 », c'est-à-dire qu'il est recommandé d'en limiter la consommation. Cette contradiction qui s'explique par les critères différents privilégiés dans les deux classements, apporte de la confusion aux recommandations à adresser aux consommateurs. Les classements des produits alimentaires à base de poisson (y compris pêche) sont en revanche proches dans les deux cas : environ la moitié des produits appartiennent à des classes favorables à la santé et l'autre moitié, aux scores C, D et E ou Nova 4.

Figure 1-29 Comparaison de la répartition des produits à base de poulet et de poisson selon le Nutri-Score (A à E) et Nova (classes 1, 3 et 4). Données extraites de la base Open food facts (septembre 2019 pour Nova et mai 2020 pour Nutri-Score) – extraction des données contenant les mots « poulet » ou « poisson » dans le nom ou la catégorie du produit.



Enfin, il a paru intéressant d'analyser le positionnement des produits selon leur teneur en sel, gras et sucre, dont l'excès est défavorable à la santé (Figure 4.3). Les produits classés Nova 3 et Nova 4 à base de porc, lait, œuf ou poisson sont plus gras que les produits classés Nova 1. Cette différence n'est en revanche pas significative pour les produits à base de poulet ou de bœuf. Les teneurs moyennes en sel des produits à base de porc (charcuterie) et de bœuf classés Nova 3 et Nova 4 sont très élevées : jusqu'à un tiers des apports maximaux recommandés pour une portion de 100 g. Les teneurs élevées en sucre concernent surtout les aliments classés Nova 4 contenant du lait et des œufs (viennoiserie, desserts…). On observe aussi que, bien que faibles dans les produits à base de poulet, de porc, de bœuf ou de poisson, les teneurs en sucre sont également systématiquement plus élevées pour les produits de la classe Nova 4 : le sucre est alors utilisé comme exhausteur de goût.

Figure 1.30 Comparaison des teneurs moyennes en sel, gras et sucre des aliments industriels à base de produits animaux. Données extraites de la base Open food facts (septembre, 2019) – extraction des données contenant « porc », « poulet », « bœuf », « lait », « œuf », « poisson » dans le nom ou la catégorie du produit.



<u>Les produits alimentaires intermédiaires (PAI) pour des produits transformés aux propriétés maitrisées</u>

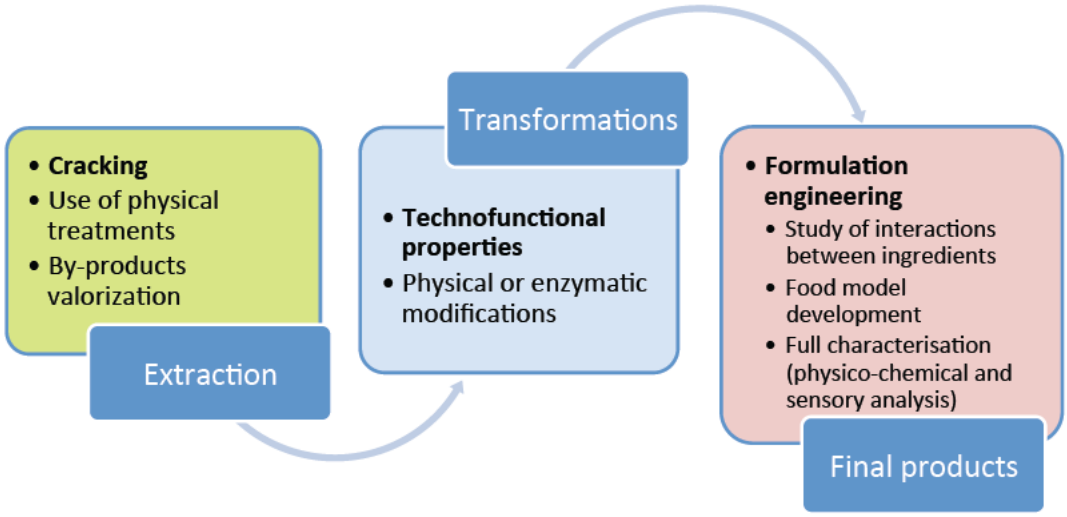
Les changements technologiques et structurels observés dans les industries alimentaires depuis une trentaine d'années sont le résultat d'un apprentissage technologique qui est localisé dans les entreprises. L'accumulation des savoirs scientifiques et technologiques est un processus de long terme: trois périodes sont distinguées dans l'évolution de ces industries depuis la fin du XIXème siècle. À partir des années 1970 la diversification des trajectoires technologiques et l'internationalisation vont accélérer la course aux innovations. Pour innover les entreprises s'appuient aussi dans des entreprises de la première transformation qui se sont spécialisées dans les nouveaux produits alimentaires intermédiaires (PAI). Ainsi, les mutations technologiques observées dans les industries agro-alimentaires ont été importantes malgré la faiblesse des dépenses qui y sont consacrées à la recherche formelle (Nicolas et Hy, 2000)[52]. Innovation via la technologie ou via l'assemblage. L'apparition de ces fabricants de PAI a eu des conséquences sur le changement technologique dans toutes les industries alimentaires. Elle a multiplié ses capacités d'innovation, à la fois en créant des PAI nouveaux et en facilitant le travail de recherche de leurs clients.

La fabrication des produits alimentaires met en jeu deux types d'industries : une industrie de première transformation qui permet d'extraire de la matière première agricole une multitude de produits alimentaires intermédiaires (PAI) à forte valeur ajoutée, et une industrie de seconde transformation qui élabore à partir de ces PAI les produits alimentaires que les

[52] François Nicolas and Michel Hy, "Apprentissage technologique et innovation en agro-alimentaire," *Économie rurale* 257, no. 1 (2000): 27–41, https://doi.org/10.3406/ecoru.2000.5179.

consommateurs attendent. Le fractionnement des constituants (lipides, protéines, glucides...) des différentes matières premières offre de nombreux avantages (Figure 1.31); il permet notamment d'offrir aux industries dites de seconde transformation (biscuiterie, salaisonnerie, confiserie, diététique...) une multitude de produits alimentaires intermédiaires (PAI) dont les propriétés fonctionnelles et (ou) nutritionnelles sont améliorées par rapport à celles des matières premières initiales (Broussole et Brulé, 1989)[53].

Figure 1.31 Le fractionnement des produits animaux : vers des ingrédients fonctionnels



Fractionner les matières premières pour standardiser les procédés

Les matières premières agricoles animales comme végétales sont variables. Au-delà des rendements, leurs compositions sont affectées par les territoires de production (sol, climat), la saison (en particulier pour les productions animales), les systèmes de cultures et les itinéraires techniques (dont l'alimentation pour les productions animales). Il y a de nombreuses références notamment sur le lait ou encore le blé qui illustrent cela (White et al. 2001 ; Radkowska et al., 2018, Li et al. 2008).

Dans un modèle de production et de consommation de masse, les acteurs industriels (et notamment les firmes internationales) visent une standardisation des aliments (Rastoin, 2008). Ainsi, pour s'affranchir des matières agricoles variables il est devenu plus facile dans les systèmes industriels de transformation, d'assembler des fractions de compositions contrôlées plutôt que d'adapter les procédés de transformation à la variabilité des matières premières agricoles (généralement possible aux petites échelles de transformation / échelles artisanales).

Le système alimentaire dominant des pays industrialisés a ainsi reposé sur une réduction de la gamme des matières premières agricoles produites et sur une spécialisation des opérateurs sur deux étapes successives : le fractionnement de cette matière première agricole puis une reformulation pour aboutir à une grande diversité d'aliments, produits finaux de qualité régulière et standardisée (Esnouf *et al.,* 2011)[54]. Pour assurer une qualité constante et maitrisée des produits finis, les IAA se sont tournées vers une logique d'assemblage reposant sur deux points : la mise en place d'une production de produits alimentaires intermédiaires (ingrédients additifs, et auxiliaires technologiques) dont le but est d'assurer une régularité des propriétés souhaitées malgré la variabilité de la matière première, la diversification de l'offre par la formulation et l'assemblage. On a donc vu s'opérer une dissociation du processus de transformation : d'une part le fractionnement qui

[53] C. Broussolle and G Brulé, "Les biotechnologies dans l'industrie agro-alimentaire : champ d'application et impact économique," *Économie rurale* 192, no. 1 (1989): 54–59, https://doi.org/10.3406/ecoru.1989.3993.

[54] Catherine Esnouf, Marie Russel, and Nicolas Bricas, "duALIne-Durabilité de L'alimentation Face À de Nouveaux Enjeux. Questions À La Recherche," in *Rapport Inra-Cirad (France)*, 2011.

vise à extraire des constituants offrant des fonctionnalités technologiques, et la formulation et l'assemblage qui visent à reconstituer un produits consommables (Soler *et al*., 2011) [55]
L'industrie du cracking des matières premières agricoles a ainsi pris de l'ampleur en proposant le fractionnement des matières premières de façon à séparer et/ou concentrer des fonctionnalités spécifiques. Le cracking a permis ainsi d'obtenir des ingrédients, présentant des avantages pour les industriels (maîtrise de la qualité des produits finis) et a permis d'apporter de la valeur ajoutée au secteur de l'industrie des « Produits Alimentaires Intermédiaires » (PAI).

Conclusion

Les conclusions de l'enquête parlementaire qui s'est déroulée au printemps 2018 sur les liens entre aliments industriels et santé, montrent clairement qu'il s'agit d'un sujet complexe, d'importance pour les consommateurs et les pouvoirs publics et qui soulève de nombreuses interrogations. Ces derniers attendent des réponses claires avec, par exemple, la mise en place de nouvelles réglementations et/ou recommandations nutritionnelles. Du côté de l'industrie alimentaire, secteur industriel clé Français, il est également essentiel d'apporter des connaissances qui permettront de mieux caractériser et différencier l'offre alimentaire en dissociant au moins partiellement les questions liées à la formulation de celles liées à la transformation. Reste qu'afficher un indicateur de transformation aux côtés d'autres logos tels que le Nutri-score, les labels préexistants (label bio, label rouge, label équitable…) et les autres informations rendues obligatoires par le règlement INCO, peut avoir pour effet d'ajouter de la « cacophonie » et compliquer plus encore le choix du consommateur. La question de la construction d'un indicateur global « composite », regroupant à la fois des critères de composition nutritionnelle et de niveau de transformation, est donc posée.

[55] Louis-Georges Soler, Vincent Requillard, and Gilles Trystram, "Organisation Industrielle et Durabilité (Chapitre 5)," in *DuALIne - Durabilité de L'alimentation Face À de Nouveaux Enjeux. Question À La Recherche*, vol. Chapitre 5, Rapport Inra-Cirad (Esnouf C., Russel M., Bricas N., 2011), 85–95.

Conclusion du chapitre 1

La qualité des produits animaux repose sur leurs propriétés sanitaires, organoleptiques, nutritionnelles, technologiques, commerciales, d'image et d'usage. Les caractéristiques biologiques des animaux (espèce, type génétique, sexe, âge des animaux…), les conditions d'élevage et d'alimentation des animaux gouvernent majoritairement la qualité de la matière première. Cette matière première subit presque systématiquement une transformation technologique avant sa consommation. La transformation peut résulter de l'application d'un seul procédé (comme la cuisson), ou résulter d'une série d'étape de transformations unitaire (p. ex. étape de salage suivie d'une étape de fumage et d'une étape de séchage pour certains produits de charcuterie). Il est a noté que dans les filières viande et poisson, l'abattage est considéré comme la première étape de transformation. Chaque étape du procédé de transformation entraine une modification des caractéristiques et des propriétés du produit. Cependant, privilégier certaines propriétés entraine souvent la dégradation d'autres critères de qualité. Par exemple une amélioration des propriétés technologiques s'accompagne souvent d'une dégradation des propriétés sensorielles. En Europe, les propriétés commerciales sont généralement basées sur la composition (lait), le calibre et le poids (poisson, œufs, viande), dans certains cas la couleur du produit est prise en compte (veau, ovins, œufs) et sur une évaluation du rendement au désossage pour les viandes. L'essentiel de la valeur commerciale est donc basé sur la productivité et le rendement en produit brut ou matière première, ce qui est souvent antagoniste avec les propriétés organoleptiques. Le consommateur ne maitrise généralement pas les premières étapes de la chaine alimentaire. Pour cette raison, des SIQO ont été développés pour garantir l'origine et certains critères de qualité au consommateur.

Les acteurs de la chaine agroalimentaire adaptent leurs choix en termes de production animale et de transformation de la matière première pour répondre aux demandes du marché. De nombreux compromis sont possibles.

Le chapitre 2 fait un état des lieux de la variabilité de la qualité associée aux modes de production et aux procédés de transformation.

Références bibliographiques des parties 1 et 2

Les références de la partie 3 sont en notes de bas de page.

Adams, D.C.; Salois, M.J., 2010. Local versus organic: A turn in consumer preferences and willingness-to-pay. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25 (4): 331-341. http://dx.doi.org/10.1017/s1742170510000219

AFNOR, 2005. Norme française ISO 21807 - Microbiologie des aliments - Détermination de l'activité de l'eau. Paris AFNOR.

AFNOR, 2009. Norme française EN ISO 5492 - Analyse sensorielle - Vocabulaire. Paris AFNOR.

AFNOR, 2010. Norme française NF V09-501 - Analyse sensorielle - Guide général pour l'évaluation sensorielle - Description, différenciation et mesure hédonique.

Ahmed, J.; Rahman, M.S., 2012. *Handbook of Food Process Design*. John Wiley & Sons, 1 600 p.

Aktas, N.; Kaya, M., 2001a. The influence of marinating with weak organic acids and salts on the intramuscular connective tissue and sensory properties of beef. *European Food Research and Technology*, 213 (2): 88-94. http://dx.doi.org/10.1007/s002170100329

Aktas, N.; Kaya, M., 2001b. Influence of weak organic acids and salts on the denaturation characteristics of intramuscular connective tissue. A differential scanning calorimetry study. *Meat Science*, 58 (4): 413-419. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00044-4

Al-Harbi, A.H.; Uddin, N., 2005. Bacterial diversity of tilapia (Oreochromis niloticus) cultured in brackish water in Saudi Arabia. *Aquaculture*, 250 (3-4): 566-572. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.01.026

Alami-Durante, H.; Rescan, P.Y., 2003. Typologie et ontogenèse des fibres musculaires chez les poissons. *Inra Productions Animales*, 16: 145-155.

Alcalde, M.J.; Suarez, M.D.; Rodero, E.; Alvarez, R.; Saez, M.I.; Martinez, T.F., 2017. Effects of farm management practices and transport duration on stress response and meat quality traits of suckling goat kids. *Animal*, 11 (9): 1626-1635. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731116002858

Alvarez, D.; Garrido, M.D.; Banon, S., 2009. Influence of Pre-Slaughter Process on Pork Quality: An Overview. *Food Reviews International*, 25 (3): 233-250. http://dx.doi.org/10.1080/87559120902956216

Amigo, J.M.; Martí, I.; Gowen, A., 2013. Hyperspectral imaging and chemometrics: a perfect combination for the analysis of food structure, composition and quality. In: Marini, F., ed. *Data handling in science and technology*. Amsterdam: Elsevier, 343-370.

Andueza, D.; Mourot, B.P.; Ait-Kaddour, A.; Prache, S.; Mourot, J., 2015. The use of non-invasive methods for the estimation of meat quality: Near infrared spectroscopy and fluorescence spectroscopy. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 197-207.

Anses, 2011a. *Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. Rapport d'expertise collective*. Paris: Anses, (Saisine n°2006-SA-0359), 323 p.

Anses, 2011b. *Etude de l'alimentation totale infantile (EAT 2). Tome 1. Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes. Avis de l'Anses - Rapport d'expertise*. Paris: Anses, 346 p.

Anses, 2016a. *Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles. Rapport d'expertise collective*. Paris: Anses, (Saisine « n°2012-SA-0103 – Révision des repères de consommations alimentaires»), 180 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf

Anses, 2016b. *Etude de l'alimentation totale infantile. Tome 1. Avis de l'Anses-Synthèse et conclusions*. Paris: Anses, Tome 1, 96 p.

Anses, 2016c. *Etude de l'alimentation totale infantile. Tome 2. Partie 1 Méthodoligies, limites et incertitudes*. Paris: Anses, 162 p.

Anses, 2016d. *Etude de l'alimentation totale infantile. Tome 2. Partie 2 Composés inorganiques*. Paris: Anses, 298 p.

Anses, 2016e. *Etude de l'alimentation totale infantile. Tome 2. Partie 3 Composés organiques*. Paris: Anses, 178 p.

Anses, 2016f. *Etude de l'alimentation totale infantile. Tome 2. Partie 4 Résultats relatifs aux résidus de pesticides*. Paris: Anses, 378 p.

Anses, 2017a. *Avis de l'Anses relatif à "l'analyse de la pertinence en matière de nutrition de système d'information nutritionnelle destinés au consommateur"*. Paris: Anses (Saisine n°2016-SA-0017), 44 p.

Anses, 2017b. *Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3). Rapport d'expertise*. Paris: Anses, (Saisine n° 2014-SA-0234), 535 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

Anthoni, U.; Borresen, T.; Christophersen, C.; Gram, L.; Nielsen, P.H., 1990. Is trimethylamine oxide a reliable indicator for the marine origin of fish. *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular Biology*, 97 (3): 569-571. http://dx.doi.org/10.1016/0305-0491(90)90161-l

Aragon-Alegro, L.; Leani de Oliveira Souza, K.; Sobrinho, P.; Landgraf, M.; Destro, M.T., 2005. Influence of washing in the microbial quality of pasteurized egg. *Food Science and Technology*, 25 (3): 618-622. http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612005000300036

Arranz, J.M.; Le Henaff, M.; Papillon, S.; Richard, A.; Ellies-Oury, M.P., 2016. Effet de l'âge à l'abattage sur les caractéristiques des carcasses et des viandes des agneaux de lait. *Viandes & Produits carnés*, 32: 3-7.

Arvanitoyannis, I.S.; Kotsanopoulos, K.V., 2012. Smoking of Fish and Seafood: History, Methods and Effects on Physical, Nutritional and Microbiological Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 5 (3): 831-853. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-011-0690-8

Askarian, F.; Zhou, Z.G.; Olsen, R.E.; Sperstad, S.; Ringo, E., 2012. Culturable autochthonous gut bacteria in Atlantic salmon (Salmo salar L.) fed diets with or without chitin. Characterization by 16S rRNA gene sequencing, ability to produce enzymes and in vitro growth inhibition of four fish pathogens. *Aquaculture*, 326: 1-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.10.016

Astruc, T., 2014a. Connective Tissue: Structure, Function, and Influence on Meat Quality. In: Devine, C.; Dikeman, M., eds. *Encyclopedia of Meat Sciences 2e, Vol. 1*. Oxford: Elsevier, 321-328. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-384731-7.00186-0

Astruc, T., 2014b. Muscle Fiber Types and Meat Quality. In: Devine, C.; Dikeman, M., eds. *Encyclopedia of Meat Sciences 2e, Vol. 2*. Oxford: Elsevier, 442-448. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-384731-7.00185-9

Astruc, T.; Marinova, P.; Labas, R.; Gatellier, P.; Sante-Lhoutellier, V., 2007. Detection and localization of oxidized proteins in muscle cells by fluorescence microscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (23): 9554-9558. http://dx.doi.org/10.1021/jf0717586

Astruc, T.; Peyrin, F.; Venien, A.; Labas, R.; Abrantes, M.; Dumas, P.; Jamme, F., 2012. In situ thermal denaturation of myofibre sub-type proteins studied by immunohistofluorescence and synchrotron radiation FT-IR microspectroscopy. *Food Chemistry*, 134 (2): 1044-1051. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.012

Astruc, T.; Portanguen, S.; Oillic, S.; Kondjoyan, A., 2010. Effet des traitements technologiques sur les qualités des viandes. In: Bauchart, D.; Picard, B., eds. *Muscle et viande de ruminant*. Editions Quae, 209-219.

Astruc, T.; Venien, A., 2017. Muscle fibre types and beef quality. In: Dikeman, M.E., ed. *Ensuring safety and quality in the production of beef. Volume 2*. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Limited (Burleigh Dodds Series in Agricultural Science: no. 12), Chapter 3, 59-82. http://dx.doi.org/10.19103/as.2016.0009.03

Babusiaux, C.; Guillou, M., 2014. *La politique de sécurité sanitaire des aliments*. Paris: Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 87 p. https://www.ladocumentationfrancaise.fr/docfra/rapport_telechargement/var/storage/rapports-publics/144000748.pdf

Bailey, A.J.; Light, N.D., 1989. *Connective Tissue in Meat and Meat Products*. Elsevier applied science, 355 p.

Balcazar, J.L.; de Blas, I.; Ruiz-Zarzuela, I.; Vendrell, D.; Girones, O.; Muzquiz, J.L., 2007. Enhancement of the immune response and protection induced by probiotic lactic acid bacteria against furunculosis in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Fems Immunology and Medical Microbiology*, 51 (1): 185-193. http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-695X.2007.00294.x

Batz, M.B.; Doyle, M.P.; Morris, J.G.; Painter, J.; Singh, R.; Tauxe, R.V.; Taylor, M.R.; Wong, D.M.A.L., 2005. Attributing illness to food. *Emerging Infectious Diseases*, 11 (7): 993-999. http://dx.doi.org/10.3201/eid1107.040634

Bauchart, D.; Gandemer, G., 2010. Qualité nutritionnelle des viandes et abats de bovin. In: Bauchart, D.; Picard, B., eds. *Muscle et viande de ruminant*. Editions Quae, 115-130.

Bauchart, D.; Thomas, A., 2010. Facteurs d'élevage et valeur santé des acides gras des viandes. In: Bauchart, D.; Picard, B., eds. *Muscle et viande de ruminant*. Editions Quae, 131-142.

Bayssat, Y., 2018. Déclassée par l'AOP salers, la productrice du Cantal Charlotte Salat crée sa propre marque. *La Montagne*: 15 juin 2018.

Beauclercq, S.; Nadal-Desbarats, L.; Hennequet-Antier, C.; Collin, A.; Tesseraud, S.; Bourin, M.; Le Bihan-Duval, E.; Berri, C., 2016. Serum and Muscle Metabolomics for the Prediction of Ultimate pH, a Key Factor for Chicken-Meat Quality. *Journal of Proteome Research*, 15 (4): 1168-1178. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jproteome.5601050

Bendall, J.R., 1973. Post mortem changes in muscle. In: Bourne, G.H., ed. *Structure and Function of Muscle*. New York: Academic Press, 243-309.

Berardinelli, A.; Donati, V.; Giunchi, A.; Guarnieri, A.; Ragni, L., 2003. Effects of Transport Vibrations on Quality Indices of Shell Eggs. *Biosystems Engineering*, 86 (4): 495-502. http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.017

Berg, C.; Raj, M., 2015. A Review of Different Stunning Methods for Poultry-Animal Welfare Aspects (Stunning Methods for Poultry). *Animals (Basel)*, 5 (4): 1207-19. http://dx.doi.org/10.3390/ani5040407

Bergquist, D.H., 1995. Egg dehydration. In: Stadelman, W.J.; O.J., C., eds. *Egg science and technology*. 4th ed. New York (USA): The Haworth Press Inc., 335-376.

Berhe, D.T.; Engelsen, S.B.; Hviid, M.S.; Lametsch, R., 2014. Raman spectroscopic study of effect of the cooking temperature and time on meat proteins. *Food Research International*, 66: 123-131. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.09.010

Berri, C.; Duclos, M.J., 2003. Typologie et ontogenèse des fibres musculaires chez les oiseaux. *Inra Productions Animales*, 16 (2): 137-143.

Berri, C.; Picard, B.; Lebret, B.; Andueza, D.; Lefevre, F.; Le Bihan-Duval, E.; Beauclercq, S.; Chartrin, P.; Vautier, A.; Legrand, I.; Hocquette, J.F., 2019. Predicting the Quality of Meat: Myth or Reality? *Foods*, 8 (10). http://dx.doi.org/10.3390/foods8100436

Berri, C.; Picard, B.; Lebret, B.; Andueza, D.; Vautier, A.; Chartrin, P.; Beauclercq, S.; Lefevre, F.; Legrand, I.; Hocquette, J.F., 2016. Etat des lieux des avancées récentes réalisées dans le domaine de la prédiction des qualités des viandes ; réflexion sur les perspectives d'application. *Viandes & Produits carnés*, 32: 1-14.

Bertram, H.C.; Holdsworth, S.J.; Whittaker, A.K.; Andersen, H.J., 2005. Salt diffusion and distribution in meat studied by Na-23 nuclear magnetic resonance imaging and relaxometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (20): 7814-7818. http://dx.doi.org/10.1021/jf051017+

Bertrand, D.; Dufour, E., 2006. *La Spectroscopie Infrarouge et ses Applications Analytiques*. Paris (FRA): Editions Tec Doc, Lavoisier Lavoisier, 660 p. https://www.lavoisier.fr/livre/agro-alimentaire/la-spectroscopie-infrarouge-et-ses-applications-analytiques-2-ed/bertrand/descriptif-9782743008093

Biesalski, H.K.; Nohr, D., 2009. The nutritional quality of meat. In: Kerry, J.P.; Ledward, D.A., eds. *Improving the Sensory and Nutritional Quality of Fresh Meat*. Cambridge, England: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition, 166), 161-177.

Bocker, U.; Kohler, A.; Aursand, I.G.; Ofstad, R., 2008. Effects of brine salting with regard to raw material variation of Atlantic salmon (Salmo salar) muscle investigated by Fourier transform infrared microspectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (13): 5129-5137. http://dx.doi.org/10.1021/jf703678z

Bocker, U.; Ofstad, R.; Bertram, H.C.; Egelandsdal, B.; Kohler, A., 2006. Salt-induced changes in pork myofibrillar tissue investigated by FT-IR microspectroscopy and light microscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (18): 6733-6740. http://dx.doi.org/10.1021/jf060178q

Bonnet, M.; Tournayre, J.; Cassar-Malek, I., 2016. Integrated data mining of transcriptomic and proteomic datasets to predict the secretome of adipose tissue and muscle in ruminants. *Molecular Biosystems*, 12 (9): 2722-2734. http://dx.doi.org/10.1039/c6mb00224b

Bosse, R.; Muller, A.; Gibis, M.; Weiss, A.; Schmidt, H.; Weiss, J., 2018. Recent advances in cured raw ham manufacture. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58 (4): 610-630. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2016.1208634

Bremner, H.A., 1985. A convenient, easy to use system for estimating the quality of chilled seafoods. In: Scott, D.; Summers, G., eds. *Fish Processing Bulletin, 7 (Proceeding of the fish processing conference, Nelson, New Zealand, 23-25 April 1985)*. 59-70.

Burr, G.; Gatlin, D.; Ricke, S., 2005. Microbial ecology of the gastrointestinal tract of fish and the potential application of prebiotics and probiotics in finfish aquaculture. *Journal of the World Aquaculture Society*, 36 (4): 425-436. http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-7345.2005.tb00390.x

Cahill, M.M., 1990. Bacterial-Flora of fishes - A review. *Microbial Ecology*, 19 (1): 21-41. http://dx.doi.org/10.1007/bf02015051

Casabianca, F., 2018. Les viandes bovines sous signe de qualité et d'origine. In: Ellies-Oury, M.P.; Hocquette, J.F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation* Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Sciences et techniques agroalimentaires), Chapitre 9, 143-163.

Cavin, C.; Cottenet, G.; Cooper, K.M.; Zbinden, P., 2018. Meat Vulnerabilities to Economic Food Adulteration Require New Analytical Solutions. *Chimia*, 72 (10): 697-703. http://dx.doi.org/10.2533/chimia.2018.697

Cayot, P.; Lorient, D., 1998. *Structures et technofonctions des protéines du lait*. Paris: Tec & Doc Lavoisier, 384 p.

Chang, H.J.; Wang, Q.; Zhou, G.H.; Xu, X.L.; Li, C.B., 2010. Influence of weak organic acids and sodium chloride marination on characteristics of connective tissue collagen and textural properties of beef semitendinosus muscle. *Journal of Texture Studies*, 41 (3): 279-301. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4603.2010.00226.x

Chen, R.; Gao, X.B.; Mei, M.Z.; Duan, Y.Y.; Liu, Z.L.; Weng, W.C.; Yang, J., 2019. A novel multiplex xMAP assay for generic detection of avian, fish, and ruminant DNA in feed and feedstuffs. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103 (11): 4575-4584. http://dx.doi.org/10.1007/s00253-019-09833-9

Chulayo, A.Y.; Bradley, G.; Muchenje, V., 2016. Effects of transport distance, lairage time and stunning efficiency on cortisol, glucose, HSPA1A and how they relate with meat quality in cattle. *Meat Science*, 117: 89-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.001

Chulayo, A.Y.; Muchenje, V., 2013. The Effects of Pre-slaughter Stress and Season on the Activity of Plasma Creatine Kinase and Mutton Quality from Different Sheep Breeds Slaughtered at a Smallholder Abattoir. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 26 (12): 1762-1772. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.2013.13141

Clerjon, S.; Peyrin, F.; Lepetit, J., 2011. Frontal UV-visible fluorescence polarization measurement for bovine meat ageing assessment. *Meat Science*, 88 (1): 28-35. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.027

CNIEL, 2017. *Question Sur Produits laitiers et technologie laitière*. Paris: CNIEL, hors série n° 9.

CNIEL, 2019. *L'économie laitière en chiffres : édition 2019*. Paris: CNIEL, 194 p. https://presse.filiere-laitiere.fr/assets/economie-laitiere-en-chiffres-edition-2019-11a6-ef05e.html?dl=1

Cohen, H.W.; Hailpern, S.M.; Fang, J.; Alderman, M.H., 2006. Sodium intake and mortality in the NHANES II follow-up study. *American Journal of Medicine*, 119 (3). http://dx.doi.org/10.1016/j.amjmed.2005.10.042

Commission européenne, 1993. Directive 93/119/CE du Conseil, du 22 décembre 1993, sur la protection des animaux au moment de leur abattage ou de leur mise à mort. *JOUE L 340, 31.12.1993, p. 21–34*.

Commission européenne, 1996. Règlement (CE) nº 2406/96 du Conseil du 26 novembre 1996 fixant des normes communes de commercialisation pour certains produits de la pêche. *JOUE L 334, 23.12.1996, p. 1–15*.

Commission européenne, 2002. Règlement (CE) n°178/2002 du Parlement européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires. *JOUE L 031 du 01.02.2002, p. 1-24*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex %3A32002R0178

Commission européenne, 2003a. Règlement (CE) nº 1830/2003 du Parlement européen et du Conseil du 22 septembre 2003 concernant la traçabilité et l'étiquetage des organismes génétiquement modifiés et la traçabilité des produits destinés à l'alimentation humaine ou animale produits à partir d'organismes génétiquement modifiés, et modifiant la directive 2001/18/CE. *JOUE L 268, 18.10.2003, p. 24–28*.

Commission européenne, 2003b. Règlement (UE) n°1379/2013 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2013 portant organisation commune des marchés dans le secteur des produits de la pêche et de l'aquaculture, modifiant les règlements (CE) n ° 1184/2006 et (CE) n ° 1224/2009 du Conseil et abrogeant le règlement (CE) n ° 104/2000 du Conseil. *JOUE L 354, 28.12.2013, p. 1–21*.

Commission européenne, 2004a. Règlement (CE) n°853/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale. *JOUE L 139 du 30/04/2004, p.55 -205*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004R0853

Commission européenne, 2004b. Règlement (CE) n°882/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 relatif aux contrôles officiels effectués pour s'assurer de la conformité avec la législation sur les aliments pour animaux et les denrées alimentaires et avec les dispositions relatives à la santé animale et au bien-être des animaux. *JOUE L 165 du 30.04.2004 p. 1-141*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32004R0882&qid=1469526783359

Commission européenne, 2005. Règlement (CE) n°2073/2005 de la Commission du 15 novembre 2005 concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE n° L*

338 du 22/12/2005 p. 0001-0026. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32005R2073&qid=1469526990047

Commission européenne, 2006. Règlement (CE) n°1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires. *JOUE L 364 du 20.06.2012, p. 5-24*.

Commission européenne, 2007a. Décision 2007/510/CE de la Commission du 17 juillet 2007 modifiant la décision 2006/784/CE relative à l'autorisation d'une méthode de classement de carcasses de porcs en France. *JOUE L 187 du 19.7.2007, p. 47*.

Commission européenne, 2007b. Règlement (CE) n°834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n°2092/91. *JOUE L 189 du 20.07.2007, p. 1–23*.

Commission européenne, 2008a. Décision 2008/293/CE: de la Commission du 4 avril 2008 modifiant la décision 2006/784/CE relative à l'autorisation d'une méthode de classement des carcasses de porcs en France [notifiée sous le numéro C(2008) 1235]. *JOUE L 98, 10.4.2008, p. 16–18* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX %3A32008D0293

Commission européenne, 2008b. Décision 2008/677/CE de la Commission du 28 juillet 2008 modifiant la décision 2006/784/CE relative à l'autorisation d'une méthode de classement des carcasses de porcs en France [notifiée sous le numéro C(2008) 3803]. *JOUE L 221 du 19.08.2008, p. 30–31*

Commission européenne, 2008c. Règlement (CE) n°889/2008 de la Commission du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n°834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles. *JOUE L 250 du 18.9.2008, p. 1–84*.

Commission européenne, 2008d. Règlement (CE) n°1249/2008 de la Commission du 10 décembre 2008 portant modalités d'application des grilles communautaires de classement des carcasses de bovins, de porcins et d'ovins et de la communication des prix y afférents. *JOUE L 337/3 du 16.12.2008*.

Commission européenne, 2013. Décision d'exécution 2013/282/UE de la Commission du 11 juin 2013 modifiant la décision 2006/784/CE en ce qui concerne la formule d'une méthode de classement des carcasses de porc autorisée en France [notifiée sous le numéro C(2013) 3437]. *JOUE L 161 du 13.06.2013, p. 10-11*.

Commission européenne, 2017. Règlement délégué (UE) 2017/1182 de la Commission du 20 avril 2017 complétant le règlement (UE) n° 1308/2013 du Parlement européen et du Conseil, en ce qui concerne les grilles utilisées dans l'Union pour le classement des carcasses de bovins, de porcs et d'ovins, ainsi que la communication des prix de marché pour certaines catégories de carcasses et d'animaux vivants. *JOUE L 171 du 04.07.2017, p. 74–99*.

Commission européenne, 2018a. Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) no 834/2007 du Conseil. *JOUE L 150 du 14.6.2018, p. 1–92*.

Commission européenne, 2018b. Règlement d'exécution (UE) 2018/1584 de la Commission du 22 octobre 2018 modifiant le règlement (CE) n° 889/2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.). *JOUE L 264 du 23.10.2018, p. 1–12*.

Commission européenne DG de la santé et sécurité alimentaire, 2019. *Audits et analyses dans les domaines de la santé et de l'alimentation - Programme 2019*. Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne, 56 p. http://dx.doi.org/10.2875/449526

Concollato, A.; Zotte, A.D.; Vargas, S.C.; Cullere, M.; Secci, G.; Parisi, G., 2019. Effects of three different stunning/slaughtering methods on physical, chemical, and sensory changes in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (2): 613-619. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.9222

Conde, F.J.; Afonso, A.M.; Gonzalez, V.; Ayala, J.H., 2006. Optimization of an analytical methodology for the determination of alkyl- and methoxy-phenolic compounds by HS-SPME in biomass smoke. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 385 (7): 1162-1171. http://dx.doi.org/10.1007/s00216-006-0337-1

Conseil national de l'alimentation, 2008. *Avis sur la mise en œuvre de la réforme des signes d'identification de la qualité et de l'origine des produits agricoles et agroalimentaires*. Paris: CNA, Avis n°61, 46 p.

Conway, E.J.; Byrne, A., 1933. An absorption apparatus for the micro-determination of certain volatile substances: The micro-determination of ammonia. *The Biochemical journal*, 27 (2): 419-429. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16745115

https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1252897/

Cour des comptes, 2014. *Rapport public annuel 2014, Tome I. La sécurité sanitaire de l'alimentation : l'insuffisance des contrôles du ministère de l'agriculture*. Paris: La Documentation française, p. 65-89. (1 397 p.).

Cour des comptes, 2019. *Rapport public annuel 2019, Tome 2. Le contrôle de la sécurité sanitaire de l'alimentation : des progrès à consolider*. Paris: La Documentation Française, 513-1 120.

Couvreur, S.; Hurtaud, C., 2007. Globule milk fat: Secretion, composition, function and variation factors. *Inra Productions Animales*, 20: 365-382.

Culioli, J.; Berri, C.; Mourot, J., 2003. Muscle foods: consumption, composition and quality. *Sciences Des Aliments*, 23 (1): 13-34. http://dx.doi.org/10.3166/sda.23.13-34

Dalgaard, P.; Gram, L.; Huss, H.H., 1993. Spoilage and shelf-life of cod fillets packed in vacuum or modified atmospheres. *International Journal of Food Microbiology*, 19 (4): 283-294. http://dx.doi.org/10.1016/0168-1605(93)90020-h

Dalgaard, P.; Madsen, H.L.; Samieian, N.; Emborg, J., 2006. Biogenic amine formation and microbial spoilage in chilled garfish (Belone belone belone) - effect of modified atmosphere packaging and previous frozen storage. *Journal of Applied Microbiology*, 101 (1): 80-95. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.2006.02905.x

Dalgaard, P.; Mejlholm, O.; Huss, H.H., 1996. Conductance method for quantitative determination of Photobacterium phosphoreum in fish products. *Journal of Applied Bacteriology*, 81 (1): 57-64. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.1996.tb03282.x

Damez, J.L.; Clerjon, S., 2013. Quantifying and predicting meat and meat products quality attributes using electromagnetic waves: An overview. *Meat Science*, 95 (4): 879-896. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.037

Darmon, N.; Maillot, M.; Braesco, V.; Tafournel, E., 2015. *L'Algorithme du Système d'Etiquetage Nutritionnel Simplifié (SENS). Développement, description et validation* Rapport du Groupe de Travail "Algorithme du SENS", p. 78. https://docplayer.fr/56349453-L-algorithme-du-systeme-d-etiquetage-nutritionnel-simplifie-sens.html

Daskalova, A.; Pavlov, A.; Kyuchukova, R.; Daskalov, H., 2016. Humane Slaughter of Carp - A Comparison between Three Stunning Procedures. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 16 (4): 753-758. http://dx.doi.org/10.4194/1303-2712-v16_4_01

Daumas, G., 2008. Actualisation de l'équation CGM pour le classement des porcs en France. *Journées de la recherche porcine en France*, 89-90.

Delmas, G.; Jourdan da Silva, N.; Pihier, N.; Weill, F.X.; Vaillant, V.; de Valk, H., 2010. Les toxi-infections alimentaires collectives en France entre 2006 et 2008. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 31-32: 344-348. https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/186074/2317846

Denev, S.; Staykov, J.; Moutafchieva, R.; Beev, G., 2009. Microbial ecology of the gastrointestinal tract of fish and the potential application of probiotics and prebiotics in finfish aquaculture. *International Aquatic Research*, 1: 1-29.

Deniz, E.; Altuntas, E.G.; Ayhan, B.; Igci, N.; Demiralp, D.O.; Candogan, K., 2018. Differentiation of beef mixtures adulterated with chicken or turkey meat using FTIR spectroscopy. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42 (10): 12. http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.13767

Dentoni, D.; Menozzi, D.; Capelli, M.G., 2012. Group heterogeneity and cooperation on the geographical indication regulation: The case of the "Prosciutto di Parma" Consortium. *Food Policy*, 37 (3): 207-216. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.02.003

Desmond, E., 2006. Reducing salt: A challenge for the meat industry. *Meat Science*, 74 (1): 188-196. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.014

Devaraju, A.N.; Setty, T.M.R., 1985. *Comparative study of fish bacteria from tropical and cold/temperate marine waters* Spoilage of tropical fish and product development. Rome, Italy: FAO Fisheries Report, 97-107.

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Nabinger, C.; Prache, S., 2014. Influence of fresh alfalfa supplementation on fat skatole and indole concentration and chop odour and flavour in lambs grazing a cocksfoot pasture. *Meat Science*, 98 (4): 607-614. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.008

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Prache, S., 2019. How does barley supplementation in lambs grazing alfalfa affect meat sensory quality and authentication? *Animal*, 13 (2): 427-434. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118001477

DGCCRF, 2019. *Agriculture biologique*. Paris: Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes, 4 p.

Dikeman, M.E., 2017. Beef carcass grading and classification. In: Dikeman, M.E., ed. *Ensuring safety and quality in the production of beef Volume 2*. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Limited, chapter 10, 18 p. http://dx.doi.org/10.19103/AS.2016.0009.10

Donald, B.; Gibson, D.M., 1992. Preliminary observations on the flora of fresh vacuum packed salmon steaks. In: Huss, H.H.; Jakobsen, M.; Liston, J., eds. *Quality Assurance in the fish Industry*. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science & Technology (Developments in Food science, 30), 107-124.

Dubois, P.; de Panafieu, J.B., 2002. *Le frise-livre des vaches*. Gulf Stream, 68 p.

Dufour, E.; Frencia, J.P., 2001. Les spectres de fluorescence frontale. Une empreinte digitale de la viande. *Viandes & Produits carnés*, 22 (1): 9-14.

Dufour, E.; Frencia, J.P.; Kane, E., 2003. Development of a rapid method based on front-face fluorescence spectroscopy for the monitoring of fish freshness. *Food Research International*, 36 (5): 415-423. http://dx.doi.org/10.1016/s0963-9969(02)00174-6

Egelandsdal, B.; Wold, J.P.; Sponnich, A.; Neegard, S.; Hildrum, K.I., 2002. On attempts to measure the tenderness of Longissimus Dorsi muscles using fluorescence emission spectra. *Meat Science*, 60 (2): 187-202. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00121-8

ElMasry, G.; Wold, J.P., 2008. High-speed assessment of fat and water content distribution in fish fillets using online imaging spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (17): 7672-7677. http://dx.doi.org/10.1021/jf801074s

Emborg, J.; Laursen, B.G.; Dalgaard, P., 2005. Significant histamine formation in tuna (Thunnus albacares) at 2 degrees C - effect of vacuum- and modified atmosphere-packaging on psychrotolerant bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 101 (3): 263-279. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.12.001

Evenepoel, P.; Geypens, B.; Luypaerts, A.; Hiele, M.; Ghoos, Y.; Rutgeerts, P., 1998. Digestibility of cooked and raw egg protein in humans as assessed by stable isotope techniques. *Journal of Nutrition*, 128 (10): 1716-1722. http://dx.doi.org/10.1093/jn/128.10.1716

Evrat-Georgel, C., 2008. *Bibliographie critique des méthodes instrumentales et mesure de la tendreté de la viande bovine*. Paris: Institut de l'Elevage (Collection "Résultats"), Département technique d'Elevage et Santé, Service Qualité des Viandes: Paris, 154 p. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/d7a5e9b2-0ef3-49d4-a86c-448dbbebd10a

Faucitano, L., 2018. Preslaughter handling practices and their effects on animal welfare and pork quality. *Journal of Animal Science*, 96 (2): 728-738. http://dx.doi.org/10.1093/jas/skx064

Fauconneau, B., 2004. Diversification, domestication and management of quality in aquaculture. *Inra Productions Animales*, 17 (3): 227-236.

Ferguson, D.M.; Warner, R.D., 2010. Pre-slaughter stress in ruminants and its relationship to meat quality. *Journal of Dairy Science*, 93: 811-811.

Ferlay, A.; Bernard, L.; Meynadier, A.; Malpuech-Brugere, C., 2017. Production of trans and conjugated fatty acids in dairy ruminants and their putative effects on human health: A review. *Biochimie*, 141: 107-120. http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2017.08.006

Font-i-Furnols, M.; Candek-Potokar, M.; Maltin, C.; Prevolnik Povše, M., 2015a. *A handbook of reference methods for meat quality assessment*. Brussels, Belgium European Cooperation in Science and Technology (COST), 104 p.

Font-i-Furnols, M.; Fulladosa, E.; Prevolnik Povse, M.; Candek-Potokar, M., 2015b. Future trends in non-invasive technologies suitable for quality determinations. In: Font-i-Furnols, M.; Čandek-Potokar, M.; Maltin, C.; Prevolnik Povše, M., eds. *A handbook of reference methods for meat quality assessment. Farm Animal IMaging COST Action FA1102*. 90-103.

FranceAgriMer, 2016. *PCM (Pesée, Classement, Marquage) : guide technique et réglementaire, édition oct 2016. Gros bovins, veaux, ovins, porcs*. Paris: FranceAgriMer (Les Guides), 242 p.

FranceAgriMer, 2018a. *Les marchés des produits laitiers, carnés et avicoles. Bilan 2017, perspectives 2018*. Paris: FranceAgriMer, 144 p. https://www.franceagrimer.fr/content/download/55817/document/BIL-VIA-LAI-Bilan2017-Perspectives2018.pdf

Frencia, J.P.; Thomas, E.; Dufour, E., 2003. Measure of meat tenderness using front-face fluorescence spectroscopy. *Sciences Des Aliments*, 23 (1): 142-145. http://dx.doi.org/10.3166/sda.23.142-145

Gagaoua, M.; Bonnet, M.; De Koning, L.; Picard, B., 2018. Reverse Phase Protein array for the quantification and validation of protein biomarkers of beef qualities: The case of meat color from Charolais breed. *Meat Science*, 145: 308-319. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.039

Gautron, J.; Guyot, N.; Brionne, A.; Réhault-Godbert, S., 2019. Bioactive egg minor proteins. In: Wu, J., ed. *Eggs as Functional Foods and Nutraceuticals for Human Health*. London, UK: Royal Society of Chemistry, 133-150.

Geay , Y.; Bauchart, D.; Hocquette, J.F.; Culioli, J., 2002. Valeur diététique et qualités sensorielles des viandes de ruminants. Incidence de l'alimentation des anima. *Inra Productions Animales*, 15: 37-52.

Gennari, M.; Tomaselli, S.; Cotrona, V., 1999. The microflora of fresh and spoiled sardines (Sardina pilchardus) caught in Adriatic (Mediterranean) Sea and stored in ice. *Food Microbiology*, 16 (1): 15-28. http://dx.doi.org/10.1006/fmic.1998.0210

Gicquel, M.; Philippe, M.; Guillon-Kroon, C.; Raoult, M., 2016. Lectures d'actualité - Définition, évaluation et déterminisme de la tendreté de la viande bovine. *Viandes & Produits carnés*, 32 (3-1): 1-7.

https://viandesetproduitscarnes.fr/phocadownload/vpc_vol_32/3231_raoult_definition_evaluation_determinisme_tendrete_viande_bovine.pdf

Gram, L.; Dalgaard, P., 2002. Fish spoilage bacteria - problems and solutions. *Current Opinion in Biotechnology*, 13 (3): 262-266. http://dx.doi.org/10.1016/s0958-1669(02)00309-9

Gram, L.; Huss, H.H., 1996. Microbiological spoilage of fish and fish products. *International Journal of Food Microbiology*, 33 (1): 121-137. http://dx.doi.org/10.1016/0168-1605(96)01134-8

Gram, L.; Wedell-Neergaard, C.; Huss, H.H., 1990. The bacteriology of fresh and spoiling Lake Victorian Nile perch (Lates niloticus). *International Journal of Food Microbiology*, 10 (3): 303-316. http://dx.doi.org/10.1016/0168-1605(90)90077-I

Grappin, R.; Lefier, D.; Mazerolles, G., 2006. Analyse du lait et des produits laitiers. In: Bertrand, D.; Dufour, E., eds. *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques*. Paris: Editions Tec Doc, Lavoisier, 497-540.

Greaser, M.L., 1986. Conversion of muscle to meat. In: Bechtel, P., ed. *Muscle as Food*. New York: Academic Press. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-084190-5.50007-2

Grimont, F.; Grimont, P.A.D., 1992. The Genus Serratia. In: Balows, A.; Trüper, H.G.; Dworkin, M.; Harder, W.; Schleifer, K.H., eds. *The Prokaryotes*. Springer-Verlag, 2823-2848.

Groupe d'étude des marchés de restauration collective et de nutrition (GEMRCN), 2015. *Spécification technique applicable aux viandes hachées et préparations à base de viandes hachées d'animaux de boucherie* Paris: Direction des Affaires Juridiques, 21 p.

Gudjonsdottir, M.; Traore, A.; Jonsson, A.; Karlsdottir, M.G.; Arason, S., 2015. The effects of pre-salting methods on salt and water distribution of heavily salted cod, as analyzed by H-1 and Na-23 MRI, Na-23 NMR, low-field NMR and physicochemical analysis. *Food Chemistry*, 188: 664-672. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.060

Guyot, N.; Rehault-Godbert, S.; Slugocki, C.; Harichaux, G.; Labas, V.; Helloin, E.; Nys, Y., 2016. Characterization of egg white antibacterial properties during the first half of incubation: A comparative study between embryonated and unfertilized eggs. *Poultry Science*, 95 (12): 2956-2970. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew271

Hamm, R., 1986. Functional properties of the myofibrillar system and their measurements. In: Bechtel, P.J., ed. *Muscle as food*. Academic Press (Food science and technology : a series of monographs), 135-199. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-084190-5.50009-6

Hanninen, M.L.; Oivanen, P.; HirvelaKoski, V., 1997. Aeromonas species in fish, fish-eggs, shrimp and freshwater. *International Journal of Food Microbiology*, 34 (1): 17-26. http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1605(96)01163-4

Hawley, K.L.; Roberto, C.A.; Bragg, M.A.; Liu, P.J.; Schwartz, M.B.; Brownell, K.D., 2013. The science on front-of-package food labels. *Public Health Nutrition*, 16 (3): 430-439. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980012000754

Herrmann, S.S.; Duedahl-Olesen, L.; Granby, K., 2015. Occurrence of volatile and non-volatile N-nitrosamines in processed meat products and the role of heat treatment. *Food Control*, 48: 163-169. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.05.030

Hobbs, G., 1983. Microbial spoilage of fish. *Food Microbiol Advances and Prospects,The society for applied bacteriology symposium, series 11*. London: Academic Press Ed, 217-229.

Hocquette, J.F.; Gondret, F.; Baeza, E.; Medale, F.; Jurie, C.; Pethick, D.W., 2010. Intramuscular fat content in meat-producing animals: development, genetic and nutritional control, and identification of putative markers. *Animal*, 4 (2): 303-319. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109991091

Howgate, P.; Johnston, A.; Whittle, K.J., 1992. *Multilingual guide to EC freshness grades for fishery products. Aberdeen: Torry Research Station, Food Safety Directorate, Ministry of Agriculture*. Aberdeen (United Kingdom) Ministry of Agriculture, Fisheries and Food Fisheries and Food, 32p. http://www.fao.org/3/x5995e/x5995e00.htm

Huber, I.; Spanggaard, B.; Appel, K.F.; Rossen, L.; Nielsen, T.; Gram, L., 2004. Phylogenetic analysis and in situ identification of the intestinal microbial community of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss, Walbaum). *Journal of Applied Microbiology*, 96 (1): 117-132. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02109.x

Hurtaud, C.; Buchin, S.; Martin, B.; Verdier-Metz, I.; Peyraud, J.L.; Noel, Y., 2001. Milk quality and consequences on quality of dairy products : several some measuring techniques of measure in dairy cows trials. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants* Paris. INRA, 35-42.

Huss, H.H., 1995. *Quality and quality changes in fresh fish*: FAO Rome.

Huss, H.H., 1999. *La qualité et son évolution dans le poisson frais.* Rome: FAO (Documents techniques sur les pêches).

Hutin, C.; Besson-Moreau, G., 2018. *Rapport fait au nom de la commission d'enquête chargée de tirer les enseignements de l'affaire Lactalis et d'étudier à cet effet les dysfonctionnements des systèmes de contrôle et d'information, de la production à la distribution, et l'effectivité des décisions publiques - Tome I : travaux de la commission d'enquête*. Paris: Assemblée Nationale (Coll. Documents d'information de l'Assemblée nationale), 237 p.

Idele; Confédération nationale de l'Elevage, 2019. *Bovins 2019 : Productions lait et viande*. Paris: Idele, Les chiffres clés du GEB, 12 p. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/5b3c010e-1d9a-4c07-886f-24a5b8480acc

INAO, 2014. *Contenu type du dossier d'évaluation et de suivi de la qualité supérieure d'un produit Label rouge*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 16 p.

INAO, 2016. *Produire sous SIQO : droits et obligations*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 26 p.

INAO, 2017. *Guide du demandeur pour la reconnaissance en qualité d'organisme de défense et de gestion*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 21 p.

INAO, 2019a. *AOC fromagères : Plan de contrôle et d'inspection type*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 18 p.

INAO, 2019b. *AOP et IGP : Quelles ressources et quels coûts pour les Organismes de Défense et de Gestion (ODG) de produits agroalimentaires ?* . Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 2 p.

INAO, 2019c. *Dispositions de contrôle communes à l'ensemble des SIQO hors AB*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 74 p.

INAO, 2019d. *L'INAO au service de l'Agriculture Biologique*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 4p.

INAO, 2019e. *Modalités d'entrée en application des dispositions de contrôle communes aux SIQO*. Montreuil: Institut national de l'origine et de la qualité, 2 p.

Interbev Occitanie, 2007 *Les catégories et le classement des bovins à l'abattoir*. Toulouse: Interbev occitanie (Le point sur …), 3 p.

Jagerstad, M.; Olsson, K.; Grivas, S.; Negishi, C.; Wakabayashi, K.; Tsuda, M.; Sato, S.; Sugimura, T., 1984. Formation of 2-amino-3,8-dimethylimidazo 4,5-f quinoxaline in a model system by heating creatinine, glycine and glucose. *Mutation Research*, 126 (3): 239-244. http://dx.doi.org/10.1016/0027-5107(84)90002-2

James, S.J.; James, B., 2002. *Meat Refrigeration*. Boca Raton: CRC Press (*Woodhead Publishing Series in Food Science and Technology*), 360 p.

Jónsdóttir, S.; Larsen, E.; Martinsdóttir, E.; Brattâr, R.; Gudjónsson, A., 1991. *Kvalitetsnormer pdfisk'* A report and manual (sensory evaluation of fish) to the Nordic Industry Foundation.

Jorgensen, L.V.; Dalgaard, P.; Huss, H.H., 2000a. Multiple compound quality index for cold-smoked salmon (Salmo salar) developed by multivariate regression of biogenic amines and pH. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48 (6): 2448-2453. http://dx.doi.org/10.1021/jf9909407

Jorgensen, L.V.; Huss, H.H.; Dalgaard, P., 2000b. The effect of biogenic amine production by single bacterial cultures and metabiosis on cold-smoked salmon. *Journal of Applied Microbiology*, 89 (6): 920-934. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.01196.x

Joseph, J.L.; Marmier, D., 2018. Les signes officiels de qualité et d'origine des produits alimentaires. Paris Conseil économique et social. 90 p. http://www.lecese.fr/travaux-publies/les-signes-officiels-de-qualite-et-dorigine-des-produits-alimentaires-siqo

Juneja, L.R., 1997. Egg yolk lipids. In: Juneja, L.R.; Yamamoto, T.; Hatta, H.; Kim, M., eds. *Hen Eggs: Their Basic and Applied Science*. New York, : CRC Press, 73–98.

Kamenik, J.; Paral, V.; Pyszko, M.; Voslarova, E., 2019. Cattle stunning with a penetrative captive bolt device: A review. *Animal Science Journal*, 90 (3): 307-316. http://dx.doi.org/10.1111/asj.13168

Karoui, R.; De Ketelaere, B.; Kemps, B.; Bamelis, F.; Mertens, K.; De Baerdemaeker, J., 2009. Eggs and Egg Products. In: Sun, D.-W., ed. *Infrared Spectroscopy for Food Quality Analysis and Control*. San Diego: Academic Press Chapter 15, 399-414. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374136-3.00015-8

Karoui, R.; Thomas, E.; Dufour, E., 2006. Utilisation of a rapid technique based on front-face fluorescence spectroscopy for differentiating between fresh and frozen-thawed fish fillets. *Food Research International*, 39 (3): 349-355. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2005.08.007

Karppanen, H.; Mervaala, E., 2006. Sodium intake and hypertension. *Progress in cardiovascular diseases*, 49 (2): 59-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.pcad.2006.07.001

Ke, S.M.; Huang, Y.; Decker, E.A.; Hultin, H.O., 2009. Impact of citric acid on the tenderness, microstructure and oxidative stability of beef muscle. *Meat Science*, 82 (1): 113-118. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.12.010

Kim, S.H.; Price, R.J.; Morrissey, M.T.; Field, K.G.; Wei, C.I.; An, H., 2002. Histamine production by Morganella morganii in mackerel, albacore, mahi-mahi, and salmon at various storage temperatures. *Journal of Food Science*, 67 (4): 1522-1528. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10316.x

Kim, S.H.; Wei, C.I.; Clemens, R.A.; An, H., 2005. Histamine accumulation in seafoods and its control; Review. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 13 (4): 81-100. http://dx.doi.org/10.1300/J030v13n04_07

Knize, M.G.; Dolbeare, F.A.; Carroll, K.L.; Moore, D.H.; Felton, J.S., 1994. Effect of cooking time and temperature on the heterocyclic amine content of fried beef patties. *Food and Chemical Toxicology*, 32 (7): 595-603. http://dx.doi.org/10.1016/0278-6915(94)90002-7

Koutsoumanis, K.; Nychas, G.J.E., 1999. Chemical and sensory changes associated with microbial flora of Mediterranean boque (Boops boops) stored aerobically at 0, 3, 7, and 10 degrees C. *Applied and Environmental Microbiology*, 65 (2): 698-706.

Kritchevsky, D., 2000. Dietary fat and disease; what do we know and where do we stand. In: Sim, J.S.; Nakai, S.; Guenter, W., eds. *Egg Nutrition and Biotechnology*. New York, USA: CAB Int. Publishing, 3-13.

Kucha, C.T.; Liu, L.; Ngadi, M.O., 2018. Non-Destructive Spectroscopic Techniques and Multivariate Analysis for Assessment of Fat Quality in Pork and Pork Products: A Review. *Sensors*, 18 (2): 23. http://dx.doi.org/10.3390/s18020377

Kulmyrzaev, A.A.; Dufour, E., 2002. Determination of lactulose and furosine in milk using front-face fluorescence spectroscopy. *Lait*, 82 (6): 725-735. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2002045

Kulmyrzaev, A.A.; Karoui, R.; De Baerdemaeker, J.; Dufour, E., 2007. Infrared and fluorescence spectroscopic techniques for the determination of nutritional constituents in foods. *International Journal of Food Properties*, 10 (2): 299-320. http://dx.doi.org/10.1080/10942910601045305

Kumar, P.; Chatli, M.K.; Verma, A.K.; Mehta, N.; Malav, O.P.; Kumar, D.; Sharma, N., 2017. Quality, functionality, and shelf life of fermented meat and meat products: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57 (13): 2844-2856. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2015.1074533

Lawrie, R.A., 1994. *Lawrie's meat science. 6th ed*. Cambrige: Woodhead Publishing, 107–213.

Le Bihan-Duval, E.; Nadaf, J.; Berri, C.; Duclos, M.; Pitel, F. 2010. Marqueurs génétiques pour la coloration de la viande. Brevet.

Le Blanc, P.J., 1987. *Approaches to the study of nucleotide catabolism for fish freshness evaluation*. Technical University of Nova Scotia,, Halifax.

Lebecque, A.; Laguet, A.; Chanonat, M.; Lardon, S.; Dufour, E., 2003. Joint analysis of sensory and instrumental data applied to the investigation of the texture of Charolais meat. *Sciences Des Aliments*, 23 (1): 172-175. http://dx.doi.org/10.3166/sda.23.172-176

Leblanc, R.J.; Gill, T.A., 1984. Ammonia as an objective quality index in squid. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal-Journal De L Institut Canadien De Science Et Technologie Alimentaires*, 17 (4): 195-201. http://dx.doi.org/10.1016/s0315-5463(84)72557-0

Lebret, B.; Lefaucheur, L.; Mourot, J., 1999. Pig meat quality. Influence of rearing factors on skeletal muscle traits. *Inra Productions Animales*, 12 (1): 11-28.

Lebret, B.; Picard, B., 2015. The main components of carcasses and meat quality in various animal species. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 93-98.

Ledesma, E.; Rendueles, M.; Diaz, M., 2016. Contamination of meat products during smoking by polycyclic aromatic hydrocarbons: Processes and prevention. *Food Control*, 60: 64-87. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.07.016

Lefaucheur, L., 2010. A second look into fibre typing - Relation to meat quality. *Meat Science*, 84 (2): 257-270. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.004

Lemeilleur, S.; Allaire, G., 2018. Système participatif de garantie dans les labels du mouvement de l'agriculture biologique. Une réappropriation des communs intellectuels. *Économie rurale*, (3): 7-27.

Leroi, F.; Joffraud, J.J.; Chevalier, F.; Cardinal, M., 2001. Research of quality indices for cold-smoked salmon using a stepwise multiple regression of microbiological counts and physico-chemical parameters. *Journal of Applied Microbiology*, 90 (4): 578-587. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2672.2001.01283.x

Leygonie, C.; Britz, T.J.; Hoffman, L.C., 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, 91 (2): 93-98. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013

Li, X.N.; Guan, Y.F., 2019. Specific Identification of the Adulterated Components in Beef or Mutton Meats Using Multiplex PCR. *Journal of Aoac International*, 102 (4): 1181-1185. http://dx.doi.org/10.5740/jaoacint.18-0338

Liston, J., 1992. Bacterial spoilage of seafood. In: Huss, H.H.; Jakobsen, M.; Liston, J., eds. *Quality Assurance in the Fish Industry*. Amsterdam: Elsevier Science Publ B V (Developments in Food Science, 30), 93-105.

Listrat, A.; Lebret, B.; Louveau, I.; Astruc, T.; Bonnet, M.; Lefaucheur, L.; Bugeon, J., 2015. How muscle structure and composition determine meat quality. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 125-136.

Listrat, A.; Picard, B.; Gruffat, D.; P., E.-O.M., 2018. La biologie musculaire et ses conséquences sur la qualité de la viande bovine. In: Ellies-Oury, M.-P.; Hocquette, J.F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation*. Paris: Lavoisier, 63-81.

Liu, L.; Ngadi, M.O.; Prasher, S.O.; Gariepy, C., 2010. Categorization of pork quality using Gabor filter-based hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Engineering*, 99 (3): 284-293. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.001

Lortal, S.; Boudier, J.F., 2011. La valorisation de la matière première lait, évolution passée et perspectives. *Innovations Agronomiques (13)*: 1-12. https://www6.inra.fr/ciag/content/download/3665/35711/file/Vol13-1-Lortal.pdf

Losada-Espinosa, N.; Villarroel, M.; Maria, G.A.; Miranda-de la Lama, G.C., 2018. Pre-slaughter cattle welfare indicators for use in commercial abattoirs with voluntary monitoring systems: A systematic review. *Meat Science*, 138: 34-48. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.12.004

Lund, B.L.W.; Meinert, L.; Borggard, C. 2018. Simultaneous detection of off-note or boar taint related compounds in animal tissue. Brevet n°Brevet US 2018/0045701 A1. https://patents.google.com/patent/US20180045701A1/en?q=indole&q=skatole&q=androstenone&before=publication:20181231&after=publication

Lyhs, U.; Korkeala, H.; Vandamme, P.; Bjorkroth, J., 2001. Lactobacillus alimentarius: a specific spoilage organism in marinated herring. *International Journal of Food Microbiology*, 64 (3): 355-360. http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1605(00)00486-4

Malle, P.; Poumeyrol, M., 1989. A new chemical criterion for the quality-control of fish - trimethylamine total volatile basic nitrogen (percent). *Journal of Food Protection*, 52 (6): 419-423. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-52.6.419

Malle, P.; Valle, M.; Bouquelet, S., 1996. Assay of biogenic amines involved in fish decomposition. *Journal of Aoac International*, 79 (1): 43-49.

Mares-Perlman, J.A.; Millen, A.E.; Ficek, T.L.; Hankinson, S.E., 2002. The body of evidence to support a protective role for lutein and zeaxanthin in delaying chronic disease. Overview. *Journal of Nutrition*, 132 (3): 518S-524S. http://dx.doi.org/10.1093/jn/132.3.518S

May, C.; IFOAM, 2008. *Petit guide des SPG - Ou comment développer et faire fonctionner les Systèmes participatifs de garantie*: International Federation of Organic Agriculture Movements, 4 p.

Medale, F., 2004. Caractéristiques nutritionnelles des poissons et facteurs de variations. *Viandes & Produits carnés*, JSMTV, Rennes, (Hors-série): 87-93.

Meneton, P.; Jeunemaitre, X.; De Wardener, H.E.; Macgregor, G.A., 2005. Links between dietary salt intake, renal salt handling, blood pressure, and cardiovascular diseases. *Physiological Reviews*, 85 (2): 679-715. http://dx.doi.org/10.1152/physrev.00056.2003

Mietz, J.L.; Karmas, E., 1977. Chemical quality index of canned tuna as determined by high-pressure liquid-chromatography. *Journal of Food Science*, 42 (1): 155-158. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb01240.x

Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt; Direction générale de l'alimentation, 2017. *Plan national de contrôles officiels pluriannuel (PNCOPA) 2016-2020* Paris: Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Direction générale de l'alimentation, 46 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a. Cahier des charges du label rouge n°LA 08/04 "Viande et abats frais de gros bovins de race Salers". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-16.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017b. *Rapport annuel 2017 du Plan national de contrôles officiels pluriannuel (PNCOPA) 2016-2020 : Contrôles de la chaîne alimentaire en France*. Paris: Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 51 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017c. *Sécurité sanitaire : le plan national de contrôles officiels pluriannuel 2016-2020 (PNCOPA). Contrôle de la chaîne alimentaire en France*. Paris: Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 51 p.

Minvielle, B.; Houix, Y.; Lebret, B.; Boulard, J.; Clochefert, N., 2005. Viandes déstructurées. Plusieurs facteurs de risque sont mis en évidence. *Viandes & Produits carnés*, 24 (2): 63-68. https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/vpc2005n2minvielle.pdf

Monin, G., 1988. Evolution post mortem du tissu musculaire et consequences sur les qualites de la viande de porc. *20. Journees de la Recherche Porcine en France*. Paris. IFIP - Institut du Porc, 201-214.

Motoyama, M.; Sasaki, K.; Watanabe, A., 2016. Wagyu and the factors contributing to its beef quality: A Japanese industry overview. *Meat Science*, 120: 10-18. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.026

Mudarris, M.; Austin, B., 1988. Quantitative and qualitative studies of the bacterial microflora of turbot, scophthalmus-maximus l, gills. *Journal of Fish Biology*, 32 (2): 223-229. http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.1988.tb05355.x

Mundler, P.; Bellon, S., 2011. Les Systèmes participatifs de garantie: une alternative à la certification par organismes tiers? *Pour*, (5): 57-65.

Nau, F.; Guerin-Dubiard, C.; Baron, F.; Thapon, J.L., 2010a. *Science et technologie de l'œuf et des ovoproduits. Volume 2 - De l'oeuf aux ovoproduits*. Paris (FR): Tec & Doc Lavoisier, 566 p.

Nau, F.; Nys, Y.; Yamakawa, Y.; Rehault-Godbert, S., 2010b. Nutritional value of the hen egg for humans. *Inra Productions Animales*, 23 (2): 225-235.

Nawrocka, A.; Lamorska, J., 2013. Determination of food quality by using spectroscopic methods. In: Grundas, S.; Stępniewski, A., eds. *Advances in agrophysical research*. IntechOpen. http://dx.doi.org/10.5772/52722

Njisane, Y.Z.; Muchenje, V., 2017. Farm to abattoir conditions, animal factors and their subsequent effects on cattle behavioural responses and beef quality - A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30 (6): 755-764. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.16.0037

Nyhammar, T.; Grivas, S.; Olsson, K.; Jagerstad, M., 1986. Formation of 4,8-dimeiqx from the model system fructose, alanine and creatinine - comparison with the isomeric 5,8-dimeiqx. *Mutation Research*, 174 (1): 5-9. http://dx.doi.org/10.1016/0165-7992(86)90069-2

Obuz, E.; Dikeman, M.E.; Loughin, T.M., 2003. Effects of cooking method, reheating, holding time, and holding temperature on beef longissimus lumborum and biceps femoris tenderness. *Meat Science*, 65 (2): 841-851. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00289-9

Offer, G.; Knight, P., 1988. The structural basis of water holding in meat. Part 2: drip losses. In: Ralston, L., ed. *Developments in Meat Science*. London: Elsevier Science Publishers, 173-243.

Oliveira, L.S.; Franca, A.S., 2011. Applications of Near Infrafred Spectroscopy (NIRS) in food quality evaluation. In: Medina, D.A.; Laine, A.M., eds. *Food Quality: Control, Analysis and Consumer Concerns*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 131-179.

Oliveira, S.E.O.; Dalla Costa, F.A.; Gibson, T.J.; Costa, O.A.D.; Coldebella, A.; Gregory, N.G., 2018. Evaluation of brain damage resulting from penetrating and non-penetrating stunning in Nelore Cattle using pneumatically powered captive bolt guns. *Meat Science*, 145: 347-351. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.016

Ouali, A., 1991. Conséquences des traitements technologiques sur la qualité de la viande. *Inra Productions Animales*, 4 (3): 195-208.

Pais, P.; Salmon, C.P.; Knize, M.G.; Felton, J.S., 1999. Formation of mutagenic/carcinogenic heterocyclic amines in dry-heated model systems, meats, and meat drippings. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47 (3): 1098-1108. http://dx.doi.org/10.1021/jf980644e

Palka, K.; Daun, H., 1999. Changes in texture, cooking losses, and myofibrillar structure of bovine M-semitendinosus during heating. *Meat Science*, 51 (3): 237-243. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00119-3

Pannier, L.; Gardner, G.E.; O'Reilly, R.A.; Pethick, D.W., 2018. Factors affecting lamb eating quality and the potential for their integration into an MSA sheepmeat grading model. *Meat Science*, 144: 43-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.035

Parois, S.; Bonneau, M.; Chevillon, P.; Larzul, C.; Quiniou, N.; Robic, A.; Prunier, A., 2018. Boar taint in the meat of entire male pigs: the problems and the potential solutions. *Inra Productions Animales*, 31 (1): 23-35.

Parthasarathy, D.K.; Bryan, N.S., 2012. Sodium nitrite: The "cure" for nitric oxide insufficiency. *Meat Science*, 92 (3): 274-279. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.03.001

Pearce, K.L.; Rosenvold, K.; Andersen, H.J.; Hopkins, D.L., 2011. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes - A review. *Meat Science*, 89 (2): 111-124. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.007

Pearson, A.M.; Chen, C.H.; Gray, J.I.; Aust, S.D., 1992. Mechanism(s) involved in meat mutagen formation and inhibition. *Free Radical Biology and Medicine*, 13 (2): 161-167. http://dx.doi.org/10.1016/0891-5849(92)90078-u

Peleteiro, B.; Lopes, C.; Figueiredo, C.; Lunet, N., 2011. Salt intake and gastric cancer risk according to Helicobacter pylori infection, smoking, tumour site and histological type. *British Journal of Cancer*, 104 (1): 198-207. http://dx.doi.org/10.1038/sj.bjc.6605993

Perez-Santaescolastica, C.; Fraeye, I.; Barba, F.J.; Gomez, B.; Tomasevic, I.; Romero, A.; Moreno, A.; Toldra, F.; Lorenzo, J.M., 2019. Application of non-invasive technologies in dry-cured ham: An overview. *Trends in Food Science & Technology*, 86: 360-374. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.011

Petracci, M.; Baeza, E., 2011. Harmonization of methodologies for the assessment of poultry meat quality features. *Worlds Poultry Science Journal*, 67 (1): 137-151. http://dx.doi.org/10.1017/s0043933911000122

Picard, B.; Lebret, B.; Cassar-Malek, I.; Liaubet, L.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Hocquette, J.F.; Renand, G., 2015. Recent advances in omic technologies for meat quality management. *Meat Science*, 109: 18-26. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.003

Pietrzak, D.; Fonberg-Broczek, M.; Mucka, A.; Windyga, B., 2007. Effects of high pressure treatment on the quality of cooked pork ham prepared with different levels of curing ingredients. *High Pressure Research*, 27 (1): 27-31. http://dx.doi.org/10.1080/08957950601091087

Pires, S.M.; Evers, E.G.; van Pelt, W.; Ayers, T.; Scallan, E.; Angulo, F.J.; Havelaar, A.; Hald, T., 2009. Attributing the Human Disease Burden of Foodborne Infections to Specific Sources. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6 (4): 417-424. http://dx.doi.org/10.1089/fpd.2008.0208

Prevolnik, M.; Candek-Potokar, M.; Skorjanc, D., 2004. Ability of NIR spectroscopy to predict meat chemical composition and quality - a review. *Czech Journal of Animal Science*, 49 (11): 500-510. http://dx.doi.org/10.17221/4337-cjas

Prieto, N.; Roehe, R.; Lavin, P.; Batten, G.; Andres, S., 2009. Application of near infrared reflectance spectroscopy to predict meat and meat products quality: A review. *Meat Science*, 83 (2): 175-186. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.04.016

Pu, H.B.; Lin, L.; Sun, D.W., 2019. Principles of Hyperspectral Microscope Imaging Techniques and Their Applications in Food Quality and Safety Detection: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18 (4): 853-866. http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12432

Purslow, P.P., 1985. The physical basis of meat texture - observations on the fracture-behavior of cooked bovine m-semitendinosus. *Meat Science*, 12 (1): 39-60. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(85)90024-5

Qiao, J.; Wang, N.; Ngadi, M.O.; Gunenc, A.; Monroy, M.; Gariepy, C.; Prasher, S.O., 2007. Prediction of drip-loss, pH, and color for pork using a hyperspectral imaging technique. *Meat Science*, 76 (1): 1-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.06.031

Rehault-Godbert, S., 2017. *L'œuf de poule: un produit de qualité au cœur de notre alimentation. Cours*. Tours, FRA: Université François Rabelais.

Rémond, D.; Peyron, M.A.; Savary-Auzeloux, I., 2010. Viande et nutrition protéique. In: Dominique, B.; Brigitte, P., eds. *Muscle et viande de ruminant*. Paris: Editions Quae, 255-266.

République Française, 1964. Décret n°64-334 du 16 avril 1964 relatif à la protection de certains animaux domestiques et aux conditions d'abattage. *JORF du 18 avril 1964 page 3485*.

République Française, 1987. Règlement CEE n°1898/87du conseil du 2 juillet 1987, concernant la protection de la dénomination du lait et des produits laitiers lors de leur commercialisation.

République Française, 1994. Décret n°94-808 du 12 septembre 1994 portant application du code de la consommation et relatif à la présentation, à la pesée, à la classification et au marquage des carcasses des espèces bovine, ovine et porcine. *JORF n°216 du 17 septembre 1994, p. 13323*

République Française, 1997. Arrêté du 12 décembre 1997 relatif aux procédés d'immobilisation, d'étourdissement et de mise à mort des animaux et aux conditions de protection animale dans les abattoirs. *JORF n°296 du 21 décembre 1997 page 18574*.

République Française, 2002. Décret n° 2012-1250 du 9 novembre 2012 relatif aux modalités de paiement du lait de vache, de brebis et de chèvre en fonction de sa composition et de sa qualité. *JORF n°0263 du 11 novembre 2012, p. 17880*

République Française, 2010a. Arrêté du 1er septembre 2010 pris pour l'application de l'article 3 du décret n° 86-616 du 12 mars 1986 instituant une aide aux quotidiens nationaux d'information politique et générale à faibles ressources publicitaires. *JORF n°0220 du 22 septembre 2010, p. 17255*

République Française, 2010b. Arrêté du 20 décembre 2010 relatif au classement, au marquage et à l'étiquetage des carcasses de veaux et à l'étiquetage des carcasses de bovins de plus de huit mois. *JORF n°0010 du 13 janvier 2011, p. 713*.

République Française, 2017. Arrêté du 9 décembre 2017 portant suspension de l'exportation et de la mise sur le marché de certains produits d'alimentation infantile fabriqués par la société Celia-laiterie de Craon. *JORF n°0289 du 12 décembre 2017, texte n° 17*

Reynel, S., 2018. Cantal: la filière Salers lui a retiré l'AOP et pourtant. *Le Parisien*, 12 mai 2018.

Ringo, E.; Birkbeck, T.H., 1999. Intestinal microflora of fish larvae and fry. *Aquaculture Research*, 30 (2): 73-93. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00302.x

Ringø, E.; Gatesoupe, F.J., 1998. Lactic acid bacteria in fish: a review. *Aquaculture*, 160 (3): 177-203. http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(97)00299-8

Ringø, E.; Olsen, R.E.; Øverli, Ø.; Løvik, F., 1997. Effect of hierarchy formation on aerobic microbiota associated with epithelial mucosa of subordinate and dominant individuals of Arctic charr, Salvelinus alpinus (L.). . *Aquaculture Research*, 28: 901-904.

Ringø, E.; Strøm, E.; Tabachek, J.A., 1995. Intestinal microflora of salmonids: a review. *Aquaculture Research*, 26 (10): 773-789. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.1995.tb00870.x

Rivera, L.; Curto, M.J.C.; Pais, P.; Galceran, M.T.; Puignou, L., 1996. Solid-phase extraction for the selective isolation of polycyclic aromatic hydrocarbons, azaarenes and heterocyclic aromatic amines in charcoal-grilled meat. *Journal of Chromatography A*, 731 (1-2): 85-94. http://dx.doi.org/10.1016/0021-9673(95)01224-9

Rock, E., 2002. Les apports en micronutriments par la viande. *Viandes & Produits carnés*, JSMTV, Clermont-Ferrand (Hors-série): 43-48.

Ruusunen, M.; Puolanne, E., 2005. Reducing sodium intake from meat products. *Meat Science*, 70 (3): 531-541. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.07.016

Sahar, A.; Boubellouta, T.; Lepetit, J.; Dufour, E., 2009. Front-face fluorescence spectroscopy as a tool to classify seven bovine muscles according to their chemical and rheological characteristics. *Meat Science*, 83 (4): 672-677. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.002

Sakzaki, R.; Tamura, K., 1992. The Genus Hafnia. In: Balows, A.; Trüper, H.G.; Dworkin, M.; Harder, W.; Schleifer, K.H., eds. *The Prokaryotes*. Springer-Verlag, 2816-2821.

Sanudo, C.; Alfonso, M.; San Julian, R.; Thorkelsson, G.; Valdimarsdottir, T.; Zygoyiannis, D.; Stamataris, C.; Piasentier, E.; Mills, C.; Berge, P.; Dransfield, E.; Nute, G.R.; Enser, A.; Fisher, A.V., 2007. Regional variation in the hedonic evaluation of lamb meat from diverse production systems by consumers in six European countries. *Meat Science*, 75 (4): 610-621. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.09.009

Sato, K.; Ohashi, C.; Ohtsuki, K.; Kawabata, M., 1991. Type V collagen in trout (Salmo gairdneri) muscle and its solubility change during chilled storage of muscle. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39 (7): 1222-1225. http://dx.doi.org/10.1021/jf00007a005

Savoia, S.; Albera, A.; Brugiapaglia, A.; Di Stasio, L.; Ferragina, A.; Cecchinato, A.; Bittante, G., 2019. Prediction of meat quality traits in the abattoir using portable and hand-held near-infrared spectrometers. *Meat Science*: 108017. http://dx.doi.org//10.1016/j.meatsci.2019.108017

Scheier, R.; Scheeder, M.; Schmidt, H., 2015. Prediction of pork quality at the slaughter line using a portable Raman device. *Meat Science*, 103: 96-103. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.01.009

Scheier, R.; Schmidt, H., 2013. Measurement of the pH value in pork meat early postmortem by Raman spectroscopy. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 111 (2): 289-297. http://dx.doi.org/10.1007/s00340-012-5332-y

Scher, J., 2014. Rhéologie, texture et texturation des produits alimentaires. *Techniques de l'Ingénieur-F3300V2*: 22 p. https://www.petit-fichier.fr/2016/11/18/joel-scher/joel-scher.pdf

Schiaffino, S.; Reggiani, C., 2011. Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles. *Physiological Reviews*, 91 (4): 1447-1531. http://dx.doi.org/10.1152/physrev.00031.2010

Schmidt, H.; Scheier, R.; Hopkins, D.L., 2013. Preliminary investigation on the relationship of Raman spectra of sheep meat with shear force and cooking loss. *Meat Science*, 93 (1): 138-143. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.08.019

Schwob, S.; Lebret, B.; Louveau, I., 2019. Adiposité et amélioration génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits. *51. Journées de la Recherche Porcine*. Paris. IFIP - Institut du Porc, 327-338.

Schwob, S.; Vautier, A.; Lebret, B.; Blanchet, B.; Mercat, M.J.; Faure, J.; Castellano, R.; Quellec, S.; Challois, S.; Davenel, A., 2018. Développement de nouveaux outils haut débit pour l'évaluation précoce de la qualité de la viande de porc (QualiPorc). *Innovations Agronomiques*, 63: 407-419.

Segtnan, V.H.; Hoy, M.; Lundby, F.; Narurn, B.; Wold, J.P., 2009a. Fat distribution analysis in salmon fillets using non-contact near infrared interactance imaging: a sampling and calibration strategy. *Journal of near Infrared Spectroscopy*, 17 (5): 247-253. http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.851

Segtnan, V.H.; Hoy, M.; Sorheim, O.; Kohler, A.; Lundby, F.; Wold, J.P.; Ofstad, R., 2009b. Noncontact Salt and Fat Distributional Analysis in Salted and Smoked Salmon Fillets Using X-ray Computed Tomography and NIR Interactance Imaging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57 (5): 1705-1710. http://dx.doi.org/10.1021/jf802080s

Seibel, B.A.; Walsh, P.J., 2002. Trimethylamine oxide accumulation in marine animals: relationship to acylglycerol storage. *Journal of Experimental Biology*, 205 (3): 297-306. https://jeb.biologists.org/content/jexbio/205/3/297.full.pdf

Seppola, M.; Olsen, R.E.; Sandaker, E.; Kanapathippillai, P.; Holzapfel, W.; Ringo, E., 2006. Random amplification of polymorphic DNA (RAPD) typing of carnobacteria isolated from hindgut chamber and large intestine of Atlantic cod (Gadus morhua L.). *Systematic and Applied Microbiology*, 29 (2): 131-137. http://dx.doi.org/10.1016/j.syapm.2005.07.006

Shabbir, M.A.; Raza, A.; Anjum, F.M.; Khan, M.R.; Suleria, H.A.R., 2015. Effect of Thermal Treatment on Meat Proteins with Special Reference to Heterocyclic Aromatic Amines (HAAs). *Critical reviews in food science and nutrition*, 55 (1): 82-93. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2011.647122

Shewan, J.M., 1971. The Microbiology of Fish and Fishery Products–a Progress Report. *Journal of Applied Bacteriology*, 34 (2): 299-315. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2672.1971.tb02291.x

Shewan, J.M., 1977. The bacteriology of fresh fish and spoiling fish and the biochemical changes induced by bacterial action. *Proceedings of the Conference on "Handling, Processing and Marketing of Tropical Fish*, 51-66.

Silversides, F.G.; Scott, T.A., 2001. Effect of storage and layer age on quality of eggs from two lines of hens. *Poultry Science*, 80 (8): 1240-1245. http://dx.doi.org/10.1093/ps/80.8.1240

Simko, P., 2002. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked meat products and smoke flavouring food additives. *Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*, 770 (1-2): 3-18. http://dx.doi.org/10.1016/s0378-4347(01)00438-8

Sindelar, J.J.; Milkowski, A.L., 2012. Human safety controversies surrounding nitrate and nitrite in the diet. *Nitric Oxide-Biology and Chemistry*, 26 (4): 259-266. http://dx.doi.org/10.1016/j.niox.2012.03.011

Singh, H., 2004. Heat stability of milk. *International Journal of Dairy Technology*, 57 (2-3): 111-119. http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2004.00143.x

Sisak, C.; Csanadi, Z.; Ronay, E.; Szajani, B., 2006. Elimination of glucose in egg white using immobilized glucose oxidase. *Enzyme and Microbial Technology*, 39 (5): 1002-1007. http://dx.doi.org/10.1016/j.enzmictec.2006.02.010

Sivertsvik, M.; Rosnes, J.T.; Kleiberg, G.H., 2003. Effect of modified atmosphere packaging and superchilled storage on the microbial and sensory quality of Atlantic salmon (Salmo salar) fillets. *Journal of Food Science*, 68 (4): 1467-1472. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb09668.x

Skjervold, P.O.; Taylor, R.G.; Wold, J.P.; Berge, P.; Abouelkaram, S.; Culioli, J.; Dufour, E., 2003. Development of intrinsic fluorescent multispectral imagery specific for fat, connective tissue, and myofibers in meat. *Journal of Food Science*, 68 (4): 1161-1168. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb09618.x

Skog, K.; Jagerstad, M., 1991. Effects of glucose on the formation of phip in a model system. *Carcinogenesis*, 12 (12): 2297-2300. http://dx.doi.org/10.1093/carcin/12.12.2297

Spanggaard, B.; Huber, I.; Nielsen, J.; Nielsen, T.; Appel, K.F.; Gram, L., 2000. The microflora of rainbow trout intestine: a comparison of traditional and molecular identification. *Aquaculture*, 182 (1-2): 1-15. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(99)00250-1

Stajkovic, S.; Teodorovic, V.; Baltic, M.; Karabasil, N.; Iop, 2017. Pre-slaughter stress and pork quality. *59. International Meat Industry Conference Meatcon2017*. Bristol: Iop Publishing Ltd (IOP Conference Series-Earth and Environmental Science). http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012034

Suman, S.P.; Joseph, P., 2013. Myoglobin chemistry and meat color. In: Doyle, M.P.; Klaenhammer, T.R., eds. *Annual review of food science and technology, vol.4*. 79-99. http://dx.doi.org/10.1146/annurev-food-030212-182623

Sun, D.-W., 2009. *Infrared spectroscopy for food quality analysis and control*. Academic Press, 448 p. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-374136-3.X0001-6

Swatland, H.J., 2000. Connective and adipose tissue detection by simultaneous fluorescence and reflectance measurements with an on-line meat probe. *Food Research International*, 33 (9): 749-757. http://dx.doi.org/10.1016/s0963-9969(00)00065-x

Swatland, H.J.; Brooks, J.C.; Miller, M.F., 1998. Possibilities for predicting taste and tenderness of broiled beef steaks using an optical-electromechanical probe. *Meat Science*, 50 (1): 1-12. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00007-2

Swatland, H.J.; Findlay, C.J., 1997. On-line probe prediction of beef toughness, correlating sensory evaluation with fluorescence detection of connective tissue and dynamic analysis of overall toughness. *Food Quality and Preference*, 8 (3): 233-239. http://dx.doi.org/10.1016/s0950-3293(96)00053-5

Szczesniak, A.S., 1998. Sensory texture profiling - Historical and scientific perspectives. *Food Technology*, 52 (8): 54-57.

Te Pas, M.; Hoekman, A.; Smits, M., 2011. Biomarkers as management tools for industries in the pork production chain. *Journal on Chain and Network Science*, 11 (2): 155-166. http://dx.doi.org/10.3920/JCNS2011.Qpork6

Terlouw, E.M.C., 2018. Période de pré-abattage et d'abattage : procédures, stress, bien-être animal et qualités des viandes. In: Ellies-Oury, M.-P.; Hocquette, J.-F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation*. Paris: Lavoisier, 35-50.

Terlouw, E.M.C.; Arnould, C.; Auperin, B.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Lefevre, F.; Lensink, J.; Mounier, L., 2007. Impact des conditions de pré-abattage sur le stress et le bien-être des animaux d'élevage. *Inra Productions Animales*, 20 (1): 93-100.

Terlouw, E.M.C.; Cassar-Malek, I.; Picard, B.; Bourguet, C.; Deiss, V.; Arnould, C.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Lefevre, F.; Lebret, B., 2015. Stress during rearing and at slaughter: influence on meat quality. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 169-182.

Theron, L.; Astruc, T.; Bouillier-Oudot, M.; Molette, C.; Venien, A.; Peyrin, F.; Vitezica, Z.G.; Fernandez, X., 2011. The fusion of lipid droplets is involved in fat loss during cooking of duck "foie gras". *Meat Science*, 89 (4): 377-383. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.018

Theron, L.; Sayd, T.; Chambon, C.; Vautier, A.; Ferreira, C.; Aubry, L.; Ferraro, V.; Sante-Lhoutellier, V., 2020. Toward the prediction of PSE-like muscle defect in hams: Using chemometrics for the spectral fingerprinting of plasma. *Food Control*, 109: 8. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106929

Thiebaud, H.P.; Knize, M.G.; Kuzmicky, P.A.; Hsieh, D.P.; Felton, J.S., 1995. Airborne mutagens produced by frying beef, pork and a soy-based food. *Food and Chemical Toxicology*, 33 (10): 821-828. http://dx.doi.org/10.1016/0278-6915(95)00057-9

Tome, D., 2008. Qualité nutritionnelle des protéines de la viande. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 43 (hors série 1): 1S40-1S45.

Tressou, J.; Ben Abdallah, N.; Planche, C.; Dervilly-Pinel, G.; Sans, P.; Engel, E.; Albert, I., 2017. Exposure assessment for dioxin-like PCBs intake from organic and conventional meat integrating cooking and digestion effects. *Food and Chemical Toxicology*, 110: 251-261. http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2017.10.032

Tsugane, S., 2005. Salt, salted food intake, and risk of gastric cancer: Epidemiologic evidence. *Cancer Science*, 96 (1): 1-6. http://dx.doi.org/10.1111/j.1349-7006.2005.00006.x

Union Européenne, 1970. Règlement (CEE) n° 2455/70 du Conseil, du 30 novembre 1970, portant fixation des normes communes de commercialisation pour certains poissons frais ou réfrigérés *JOCE n°L264 du 05.12.1970, 1-6*.

Union Européenne, 2008. Règlement (CE) n°543/2008 de la Commission du 16 juin 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n° 1234/2007 du Conseil en ce qui concerne les normes de commercialisation pour la viande de volaille. *JOUE L 157 du 17.6.2008, p. 46–87*.

Union Européenne, 2011. Règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, modifiant les règlements (CE) n°1924/2006 et (CE) n°1925/2006 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 87/250/CEE de la Commission, la directive 90/496/CEE du Conseil, la directive 1999/10/CE de la Commission, la directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/67/CE et 2008/5/CE de la Commission et le règlement (CE) n°608/2004 de la Commission Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *JOUE L 304 du 22/11/2011 p. 0018–0063*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32011R1169&qid=1469527903985

Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX %3A32012R1151

Union Européenne, 2013. Règlement (UE) n°1308/2013 du Parlement européen et du Conseil du 17 décembre 2013 portant organisation commune des marchés des produits agricoles et abrogeant les règlements (CEE) n ° 922/72, (CEE) n ° 234/79, (CE) n ° 1037/2001 et (CE) n ° 1234/2007 du Conseil. *JOUE L 347 du 20/12/2013 p. 671–854*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32013R1308&qid=1469534024402

Union Européenne, 2017. Règlement (UE) 2017/625 du Parlement européen et du Conseil du 15 mars 2017 concernant les contrôles officiels et les autres activités officielles servant à assurer le respect de la législation alimentaire et de la législation relative aux aliments pour animaux ainsi que des règles relatives à la santé et au bien-être des animaux, à la santé des végétaux et aux produits phytopharmaceutiques. *JOUE L 95 du 07.04.2017*.

Vainiotalo, S.; Matveinen, K., 1993. Cooking fumes as a hygienic problem in the food and catering industries. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 54 (7): 376-382. http://dx.doi.org/10.1202/0002-8894(1993)054<0376:Cfaahp>2.0.Co;2

Van Cauteren, D., 2016. *Estimation de la morbidité des infections d'origine alimentaire en France* Thèse de doctorat en Santé publique - épidémiologie. Université Paris Saclay, 151 p.

Van Cauteren, D.; De Valk, H.; Sommen, C.; King, L.A.; Silva, N.J.D.; Weill, F.X.; Le Hello, S.; Megraud, F.; Vaillant, V.; Desenclos, J.C., 2015. Community Incidence of Campylobacteriosis and Nontyphoidal Salmonellosis, France, 2008-2013. *Foodborne Pathogens and Disease*, 12 (8): 664-669. http://dx.doi.org/10.1089/fpd.2015.1964

van de Vis, H.; Kestin, S.; Robb, D.; Oehlenschlager, J.; Lambooij, B.; Munkner, W.; Kuhlmann, H.; Kloosterboer, K.; Tejada, M.; Huidobro, A.; Ottera, H.; Roth, B.; Sorensen, N.K.; Akse, L.; Byrne, H.; Nesvadba, P., 2003. Is humane slaughter of fish possible for industry? *Aquaculture Research*, 34 (3): 211-220. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00804.x

Van Den Akker, J., 2009. Convergence entre les systèmes participatifs de garantie et les systèmes de contrôle interne dans un projet pilote européen d'IFOAM. *Innovations Agronomiques*, 4: 441-446.

Van Spreekens, K.J.A., 1974. The suitability of a modification of Long and Hammer's medium for the enumeration of more fastidious bacteria from fresh fisheries products. *Archiv fuer Lebensmittlehygiene*, 25: 213-219.

Vautier, A.; Lhommeau, T.; Daumas, G., 2013. A feasibility study for the prediction of the technological quality of ham with NIR spectroscopy. *64. annual meeting of the European federation of animal science* 26-30 August 2013, Nantes, France, p 108.

Veciana-Nogues, M.T.; MarineFont, A.; VidalCarou, M.C., 1997. Biogenic amines as hygienic quality indicators of tuna. Relationships with microbial counts, ATP-related compounds, volatile amines, and organoleptic changes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45 (6): 2036-2041. http://dx.doi.org/10.1021/jf960911l

Veissier, I.; Blokhuis, H.J.; Geers, R.; Jones, B.; Miele, M., 2005. Le projet Welfare Quality: de l'attente des consommateurs à la mise en place de certifications bien-être en élevage. *Bulletin de l'Académie vétérinaire de France*, 158 (3): 262-267.

Verhoeven, M.; Gerritzen, M.; Velarde, A.; Hellebrekers, L.; Kemp, B., 2016. Time to Loss of Consciousness and Its Relation to Behavior in Slaughter Pigs during Stunning with 80 or 95 % Carbon Dioxide. *Frontiers in Veterinary Science*, 3: 38. http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2016.00038

Verhoeven, M.T.; Gerritzen, M.A.; Hellebrekers, L.J.; Kemp, B., 2015. Indicators used in livestock to assess unconsciousness after stunning: a review. *Animal*, 9 (2): 320-30. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731114002596

Viste-Martin, C.; Schmidely, P., 2018. Encadrement réglementaire de la sécurité sanitaire des aliments pour animaux producteurs de denrées alimentaires. In: Berthelot, V.d., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Lavoisier Tec & Doc (Coll. Agriculture d'aujourd'hui).

Vogel, B.F.; Venkateswaran, K.; Satomi, M.; Gram, L., 2005. Identification of Shewanella baltica as the most important H2S-producing species during iced storage of Danish marine fish. *Applied and Environmental Microbiology*, 71 (11): 6689-6697. http://dx.doi.org/10.1128/aem.71.11.6689-6697.2005

Wang, G.; Wang, T., 2009. Effects of Yolk Contamination, Shearing, and Heating on Foaming Properties of Fresh Egg White. *Journal of Food Science*, 74 (2): C147-C156. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01054.x

Westerblad, H.; Bruton, J.D.; Katz, A., 2010. Skeletal muscle: Energy metabolism, fiber types, fatigue and adaptability. *Experimental Cell Research*, 316 (18): 3093-3099. http://dx.doi.org/10.1016/j.yexcr.2010.05.019

Wigham, E.E.; Butterworth, A.; Wotton, S., 2018. Assessing cattle welfare at slaughter - Why is it important and what challenges are faced? *Meat Science*, 145: 171-177. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.010

Wilson, B.; Danilowicz, B.S.; Meijer, W.G., 2008. The diversity of bacterial communities associated with Atlantic Cod Gadus morhua. *Microbial Ecology*, 55 (3): 425-434. http://dx.doi.org/10.1007/s00248-007-9288-0

Wold, J.P.; Johansen, I.R.; Haugholt, K.H.; Tschudi, J.; Thielemann, J.; Segtnan, V.H.; Narum, B.; Wold, E., 2006. Non-contact transflectance near infrared imaging for representative on-line sampling of dried salted coalfish (bacalao). *Journal of near Infrared Spectroscopy*, 14 (1): 59-66. http://dx.doi.org/10.1255/jnirs.587

Wold, J.P.; Lundby, F.; Egelandsdal, B., 1999. Quantification of connective tissue (hydroxyproline) in ground beef by autofluorescence spectroscopy. *Journal of Food Science*, 64 (3): 377-383. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15045.x

World Health Organization, 2009. *Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food*. Geneva: WHO (Environmental Health Criteria 240), 752 p. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44065/WHO_EHC_240_eng.pdf

Xiong, Y.L.L., 2005. Role of myofibrillar proteins in water-binding in brine-enhanced meats. *Food Research International*, 38 (3): 281-287. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2004.03.013

Xiong, Y.L.L.; Lou, X.Q.; Harmon, R.J.; Wang, C.Z.; Moody, W.G., 2000. Salt- and pyrophosphate-induced structural changes in myofibrils from chicken red and white muscles. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80 (8): 1176-1182. http://dx.doi.org/10.1002/1097-0010(200006)80:8<1176::Aid-jsfa615>3.3.Co;2-d

Yang, D.T.; Ying, Y.B., 2011. Applications of Raman Spectroscopy in Agricultural Products and Food Analysis: A Review. *Applied Spectroscopy Reviews*, 46 (7): 539-560. http://dx.doi.org/10.1080/05704928.2011.593216

Zeisel, S.H., 1992. Choline - An important nutrient in brain-development, liver-function and carcinogenesis. *Journal of the American College of Nutrition*, 11 (5): 473-481.

Zheng, J.K.; He, L.L., 2014. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy for the Chemical Analysis of Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13 (3): 317-328. http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12062

Annexe 1 : Un modèle de prédiction de la qualité sensorielle de la viande bovine développé en Australie et en cours d'adaptation à l'international

Auteur : Jean-François Hocquette

En Australie, comme dans tous les pays développés, les mêmes constats (chute régulière de la consommation de viande bovine et qualité de la viande très hétérogène) ont été faits dans les années 80. Afin de tenter d'y remédier, le pays a décidé de mettre en place un travail de longue haleine pour construire un modèle de prédiction de la qualité de la viande bovine. L'approche australienne vise à limiter les déceptions potentielles des consommateurs face à la grande hétérogénéité de la qualité des viandes bovines qui leur sont proposées. Ce modèle s'appelle le système MSA (pour « Meat Standards Australia »). Développé avec la participation de chercheurs et professionnels de la filière à partir de 1996, il fait l'objet d'une exploitation commerciale depuis l'an 2000. Il est la propriété du MLA (« Meat and Livestock Australia »), un organisme mixte entre les pouvoirs publics et professionnels, chargé du développement et de la promotion des filières de ruminants en Australie.

1. Le principe du système MSA

Les principes fondateurs de l'approche MSA sont les suivants :

- le consommateur non entraîné, dit 'naïf' (et non pas le consommateur expert) doit être la cible, car c'est lui qui choisit le produit final et paie pour ce produit en fonction de la qualité perçue,
- le rapport qualité/prix doit être garanti, les consommateurs demandant une viande de qualité prévisible au juste prix.

D'après les travaux MSA réalisés de par le monde, les consommateurs se disent effectivement prêts à payer plus pour des viandes de qualité : généralement environ 2 fois plus pour une viande de qualité correcte (classée 3* dans le système MSA) comparativement à une viande de qualité non satisfaisante, avec une valorisation encore supérieure pour les viandes classées 4* et 5* (Lyford et al., 2010 ; Thompson et al., 2010 ; Bonny et al., 2016a et 2017). Le système distingue donc 4 niveaux de satisfaction en bouche, depuis les viandes de qualité insuffisante pour être certifiées dans le système MSA jusqu'aux viandes de qualité supérieure ou 5 étoiles (5*), en passant par une qualité correcte pour une consommation quotidienne (3*) et un peu meilleure (4*). Cette classe est prédite à partir de certaines caractéristiques des animaux, de leur carcasse et de leurs viandes.

2. La construction du système

Le système MSA est un modèle mathématique construit à partir d'une importante base de données alimentée par des tests consommateurs depuis les années 1990, en suivant un protocole standard (Watson et al., 2008a, 2008b) incluant différents modes de cuisson et des données permettant de caractériser les viandes dégustées et les animaux et carcasses dont elles proviennent. La base de données continue de s'enrichir d'année en année approchant les 100 000 consommateurs et 700 000 échantillons de viande dégustés : il s'agit du plus grand programme d'évaluation de la qualité sensorielle de la viande bovine au monde.

La dégustation des viandes est effectuée par des consommateurs non entraînés, dits naïfs. Ils évaluent pour chaque morceau, sa tendreté, sa jutosité, l'appréciation de sa flaveur et l'appréciation globale sur des échelles de 0 à 100. En parallèle, ils affectent au morceau l'une des 4 classes de qualité proposées, partant du non satisfaisant (classe 2*) jusqu'à la qualité supérieure (classe 5*) en passant par une qualité correcte (classe 3*) et un peu meilleure (classe 4*).

Il s'agit d'une approche « de la fourchette à la fourche », pour garantir la satisfaction en bouche, par la maîtrise des points critiques. Toutes les caractéristiques des viandes susceptibles d'avoir un effet sur la qualité en bouche, depuis la conception de l'animal (âge physiologique, vitesse de croissance, etc), l'abattage (pH,), les critères de carcasse (poids, engraissement,

etc) jusqu'à la maturation et la cuisson ont donc initialement été prises en compte et enregistrées dans la base de données, sans a priori.

L'une des grandes forces du système réside dans le fait que ce sont les traitements statistiques qui ont permis d'identifier et de hiérarchiser les critères expliquant le mieux la classe de qualité attribuée par les consommateurs, parmi l'ensemble des informations renseignées sur les viandes, carcasses et animaux concernés. Ces résultats ont permis de construire un modèle de la classe de qualité (donc de la satisfaction des consommateurs) à partir d'une douzaine de paramètres de l'amont à l'aval ayant un effet statistiquement significatif sur la qualité sensorielle de la viande. Ces paramètres concernent les caractéristiques des animaux (maturité physiologique mesurée par le degré d'ossification, poids, type génétique, sexe, hauteur de la bosse de la carcasse au niveau de la nuque), les conditions de pré-abattage et d'abattage (méthode de suspension des carcasses), la viande (pH, couleur, persillé) et les évènements *post-mortem* (durée de maturation, méthode de cuisson, etc.), en prenant en compte les interactions entre ces paramètres (revue de Polkinghorne et Thompson, 2010). En Australie, le modèle prend aussi en compte le croisement avec le zébu. Le modèle présente l'originalité de prédire non pas la qualité de la carcasse dans son ensemble, mais la qualité sensorielle de la viande pour chaque « combinaison muscle x mode de cuisson », c'est-à-dire de chaque muscle pour une cuisson donnée (Figure 1).

Figure 1 : Prédiction de la qualité en bouche de la viande bovine pour chaque combinaison muscle × méthode de cuisson à partir d'une douzaine de paramètres selon la méthodologie MSA

Modèle de prédiction australien MSA

Niveau de qualité MSA (3, 4 ou 5 étoiles)

MSA2000model®

Critères expliquant la qualité

Suspension des carcasses	AT
Sexe	m
	0
	0
Poids de carcasse	200
Ossification	100
	N
Persillé	130
Durée de maturation	5
Epaisseur de gras	5
pH	5.40
Couleur	2
	n
Vitesse de croissance	1.32

Nom du morceau	Référence du muscle	Jours de maturation	Steak grillé	Bœuf rôti	Sauté	Tranches fines	En cocotte	Corned-beef
Filet	TDR062		5	4	5			
Entrecôtes	CUB045		3	3	3	4		
Faux-Filet	STR045		3	3	3	3		
Paleron	OYS036		4	3	4	4		
Boule de macreuse	BLD096		3	3	3	3	3	
Filet mignon	CTR085			3	3	3	3	
Rumsteck	RMP131		3	3	3	3		
Partie du rumsteck	RMP231		3	3	3	4		
Tranche	KNU099		x	3	3	3	3	
Gîte noix	OUT005			x	x	3	3	3
Rond de gîte	EYE075		x	3	3	3	3	x
Tende de tranche	TOP073		x	3	x	3	3	
Collier	CHK078			3	3	3	3	
Bavette de flanchet	TFL051				3		3	
Pièce parée	RIB041				3			
Poitrine	BRI056				x	3	3	x
Jarret	FQshin						3	

Le modèle de prédiction permet de classer les échantillons de viande en fonction de différentes classes de qualité : non satisfaisante (×), bon pour une consommation quotidienne (3*), meilleur que le quotidien (4*), qualité supérieure (5*) (adapté de Legrand et al., 2013). Des valeurs sont données en exemple pour les critères de prédiction (par exemple jours de maturation ou 5 mm d'épaisseur de gras).

Pour chaque morceau de viande associé à un mode de cuisson, le modèle MSA prédit un score de qualité globale appelé MQ4 (pour « Meat Quality 4 ») sur une échelle de 0 à 100 pour une durée de maturation donnée. Ce score est la combinaison linéaire des notes des consommateurs qui permet de faire le meilleur lien avec le classement de qualité de la viande également renseigné par les consommateurs ; les coefficients de pondération respectifs sont de 0,3 pour la tendreté,

l'appréciation de la flaveur et l'appréciation globale et de 0,1 pour la jutosité. La note MQ4 de 0 à 100 résulte donc d'un calcul scientifique suite à des expérimentations ou à une prédiction. La notion de classe est une version simplifiée de la notion de qualité pour être accessible aux professionnels et aux consommateurs. Les valeurs de la note globale MQ4 définissant les limites entre chaque classe de qualité sont calculées précisément pour chaque jeu de données de consommateurs et sont régulièrement affinées : elles sont de l'ordre de 40 (entre non satisfaisant et 3*), 60 (entre 3* et 4*) et 80 (entre 4* et 5*) sur une échelle de 0 à 100 (Watson et al., 2008a, 2008b). La classe de qualité de la viande est prédite à partir de la prédiction du score MQ4 à l'aide de ces valeurs.

3. Le fonctionnement du système en Australie

En pratique, l'abattoir constitue le pivot du système, en centralisant les informations concernant les critères prédicteurs de la qualité. Les carcasses sont évaluées par un classificateur agréé par le MLA et périodiquement remis à niveau. Mais c'est le distributeur qui attribue le niveau qualitatif, car lui seul a accès à l'ensemble des informations, notamment la durée de maturation.

Le système MSA est basé sur le volontariat des opérateurs et n'implique l'achat d'aucune licence. Tout opérateur impliqué s'engage à suivre les directives et protocoles du MSA. Des audits sont réalisés par le MLA et des actions correctives sont requises en cas de dysfonctionnement ou de non respects des engagements.

Au 30 juin 2017, 48 005 élevages australiens étaient enregistrés comme utilisant le système MSA, 42 entreprises de viande bovine étaient agréées MSA et 3 668 distributeurs (supermarchés, bouchers, épiciers) commercialisaient des produits MSA. Enfin, 156 labels ou marques commerciales de viande bovine se sont appuyées sur le système MSA au 30 juin 2017 (MLA, 2017). Durant l'année fiscale australienne 2017-2018, 16 nouvelles marques se sont ajoutées, ce qui porte leur nombre total à 172 (MLA, 2018). Ces marques ou labels s'appuient sur la méthodologie MSA pour garantir la qualité des produits qu'ils proposent. Depuis sa mise en œuvre commerciale en 1999, le programme MSA a connu une forte croissance, avec 5,9 millions de bovins présentés à la classification MSA en 2015-2017. Cela correspond à 38 % à 40 % de tous les bovins adultes abattus en Australie en 2015/2016 (MLA, 2016) et 2016/2017 (MLA, 2017) respectivement et 43 % durant la dernière année fiscale (MLA, 2018).

MonMSA (« MyMSA » en anglais) est le système pivot pour le retour d'information du classement MSA vers les acteurs de la filière, notamment les éleveurs. Il a été déployé au milieu de l'année 2014 et depuis, plus de 6 200 producteurs l'ont utilisé. Cela représente un total de presque 30000 connexions pour obtenir le retour d'information à propos des carcasses classées.

MonMSA offre aux producteurs la possibilité de :

- Avoir accès à un ensemble complet d'information concernant les carcasses
- Observer dans le temps les tendances de conformité MSA ou de non-conformité des carcasses
- - Utiliser le calculateur de l'index MSA pour déterminer le changement potentiel de la qualité sensorielle de la viande produite en fonction de changements de pratiques des élevages
- Évaluer la performance de chaque troupeau par comparaison à la moyenne de la région, de l'état ou du pays et en sélectionnant par exemple le type de ration donnée aux animaux

L'outil d'analyse comparative MonMSA est disponible en ligne (sur www.mymsa.com.au). Il offre donc aux producteurs la possibilité d'évaluer les performances de leurs bovins par rapport aux autres producteurs à différents niveaux (région, état, pays).

4. Quels avantages pour la filière bovine australienne ?

L'Australie semble avoir bénéficié de la mise en œuvre du système MSA. Tout d'abord, il y a eu un net ralentissement du déclin de la consommation de viande bovine dans le pays, suggérant un rapport de cause à effet entre le développement de ce modèle et le dynamisme du marché. La communication du MSA vers les consommateurs n'est pas obligatoire et très variable selon les distributeurs, mais la connaissance du logo MSA par les consommateurs est stable depuis 2012 (entre 40

et 50 % des consommateurs le connaissent) (Anonyme, 2016b). Qu'il soit visible ou non, le modèle bénéficie au consommateur à qui il garantit un niveau de qualité.

Dans de nombreux cas, il existe en Australie une plus-value économique lorsque les carcasses sont labellisées MSA par rapport aux carcasses non MSA (en d'autres termes, la viande MSA est vendue souvent plus cher). Ceci est une incitation à ce que les transformateurs individuels et les détenteurs de marque respectent les spécifications MSA relatives à la qualité sensorielle de la viande (Griffith et Thompson, 2012 ; MLA, 2016).

En 2015-2017, les animaux (généralement engraissés à l'herbe) dont les carcasses ont été classées MSA et les spécifications de l'entreprise ont fait l'objet de 0,24 $ par kg de plus-value à l'abattoir comparativement à leurs homologues non-MSA. Avec un poids moyen de carcasse de 281 kg, cela peut représenter 67,44 $ de plus par tête (revue de Bonny et al., 2018). La plus-value a été de 0,21 $ par kg en 2017-2018 (MLA, 2018).

Les carcasses provenant d'animaux engraissés avec des concentrés et répondant aux spécifications et aux exigences du MSA ont reçu en moyenne 0,13 $ de plus par kg à l'abattoir par rapport à leurs homologues non-MSA. Avec une carcasse d'un poids moyen de 306 kg, cela peut représenter, avec un rendement moyen, environ 40 $ par tête de plus-value.

Globalement, la mise en place du système MSA a permis de générer une plus-value économique pour l'ensemble des opérateurs. Il a été calculé plus globalement que 12,50 $ de revenus supplémentaires ont été générés pour chaque dollar investi pendant les 5 ans couvrant la période de 2010/11 à 2014/15 (Anonyme, 2016c). Ce retour sur investissement motive les opérateurs, ce qui est important, car il ne faut pas oublier que la démarche est volontaire.

En outre, un tout nouvel outil particulièrement intéressant vient d'être mis en place : l'index MSA. C'est un score unique calculé pour rendre compte du niveau global de qualité en bouche de la carcasse. Il s'agit en fait de la moyenne des scores de qualité en bouche des principaux morceaux de la carcasse, pondérée par leurs poids relatifs dans la carcasse. L'index tient compte de la qualité de 39 muscles ; il est calculé en fixant les proportions de ces muscles dans la carcasse, et pour le mode de suspension de la carcasse lors du ressuage le plus courant, le pH ultime moyen, une durée de maturation et une méthode de cuisson parmi les plus courantes.

Cet index MSA a de nombreuses finalités. Il peut servir à la filière pour suivre les changements qualitatifs de l'ensemble des carcasses au cours du temps ou dans les différents états du pays : Pour l'année 2015/16, il est en moyenne de 57,52 et a tendance à augmenter au fil des ans (Anonyme, 2016b).

Cet index MSA permet également un retour d'information simple et synthétique aux différents maillons de la filière, constituant un élément de motivation supplémentaire. Des outils en ligne (tels que le MyMSA décrit plus haut) ont été développés à cette fin, particulièrement auprès des éleveurs.

L'index MSA est, par ailleurs, intéressant pour améliorer la sélection génétique, car il est considéré comme le potentiel génétique de chaque animal à produire une viande de qualité sensorielle donnée toutes choses égales par ailleurs (c'est-à-dire à même durée de maturation, à cuisson similaire…). Or, la génétique a un impact permanent et cumulatif sur la qualité.

Enfin, l'index MSA pourrait être employé, selon les collègues australiens, en combinaison avec des notions de rendement, pour des systèmes de paiement plus objectifs basés sur la valeur réelle de la carcasse en termes de qualité sensorielle.

5. Les perspectives d'avenir concernant le système MSA

Le système MSA a été testé avec succès dans différents pays (revue de Hocquette et al., 2014 ; Allen, 2015 ; Guzek et al., 2015) tels que la Corée du Sud, les Etats-Unis, le Japon, l'Afrique du Sud, la Nouvelle-Zélande, l'Irlande du Nord, la Pologne et la République irlandaise. Les résultats des tests français ont également donné des résultats satisfaisants avec des viandes françaises et des consommateurs français (Legrand et al., 2011, 2013 et 2017).

La conclusion générale de ces travaux est que la méthodologie du système MSA est pertinente dans tous ces pays, même si les poids relatifs des tendreté, jutosité, appréciation de la flaveur et appréciation globale dans la définition optimum du score MQ4 varient un peu entre pays, et si les limites optimales entre classes de qualité sont à recalculer pour chaque pays ou pour chaque groupe de consommateurs caractéristique d'une région de certaines habitudes de consommation.

Les partenaires européens ayant testé le système se sont organisés en créant la fondation internationale Meat 3G (https://imr3gfoundation.org/) dirigée par le président de la « Beef Polish Association » (Pethick et al., 2015), car ils considèrent qu'un outil de prédiction de la qualité en bouche rendrait les filières bovines européennes plus compétitives demain, face à l'ouverture progressive des frontières à la concurrence. Or, si le système MSA n'est pas disponible à la vente, la méthodologie australienne a été publiée (Watson et al., 2008a, 2008b) ; elle est donc libre d'accès et potentiellement transposable à d'autres pays moyennant certains ajustements pour les types d'animaux qu'on ne trouve pas en Australie. L'idée a donc émergé de développer un modèle de prédiction européen de la qualité de la viande bovine en bouche qui s'appellerait 3G, et qui s'inspirerait du système MSA dans sa méthodologie. Pour ce faire, il convient de disposer d'une base de données obtenues avec des protocoles standards, respectant cette méthodologie, et reposant sur au moins 20000 consommateurs et des viandes aussi diverses que possible. Une base de données a donc été mise en place afin de regrouper les informations déjà recueillies auprès de 19500 consommateurs européens (de France, Irlande du Nord, Pologne et République irlandaise) ayant dégusté des viandes issues de plus de 770 bovins européens. Ceci a permis de travailler sur les liens entre les caractéristiques des animaux, de leurs carcasses et de leurs viandes et les résultats de satisfaction en bouche recueillis auprès des consommateurs. Ces travaux donnent une idée des ajustements souhaitables pour une adaptation du système MSA aux contextes de production, transformation et consommation européens, notamment pour les jeunes bovins et les races laitières pour lesquels un effet significatif (bien que faible) a été observé (Bonny et al., 2016a). L'absence de pertinence du classement EUROP pour l'appréciation des qualités en bouche a été confirmée (Bonny et al., 2016d). De même, les caractéristiques démographiques des consommateurs ont peu d'impact sur l'évaluation de la qualité en bouche et le consentement à payer pour différents niveaux de qualité de viande (Bonny et al., 2016b et 2017).

Cette base de données est suffisante pour développer un prototype de modèle européen de prédiction. Pour ce faire, la fondation Meat 3G a obtenu le soutien de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (UNECE, https://www.unece.org/info/ece-homepage.html).

Dans le cas d'une utilisation binaire du système 3G ou MSA (qualité non satisfaisante vs qualité acceptable 3*, 4* ou 5*) en Europe, la probabilité de vraiment décevoir le consommateur, c'est-à-dire de classer par erreur 3* ou plus un échantillon de mauvaise qualité, est de 7 %. Considérant qu'environ un quart des échantillons de viande est jugée en moyenne de qualité non satisfaisante, l'utilisation binaire du système constituerait déjà un progrès important permettant de réduire théoriquement de 25 à 7 % les déceptions à la consommation, toujours préjudiciables pour un produit déjà peu compétitif par son prix. La régularité de la qualité de la viande proposée aux consommateurs en serait significativement accrue (Berri et al., 2016).

Conclusion

En Australie, le système MSA est considéré comme une méthode objective pour prédire la qualité sensorielle de la viande bovine du marché de masse, c'est-à-dire des types de viande majoritairement consommés. De plus, elle a permis de générer une plus-value économique pour les différents acteurs de la filière. Ceux-ci ont donc une réelle incitation financière à produire une viande de bonne qualité sensorielle satisfaisant les consommateurs. Ce n'est pas le cas dans bon nombre de pays qui continuent à rémunérer les opérateurs de la filière selon les caractéristiques des carcasses, au moins pour le marché de masse. En France, comme dans d'autres pays, certaines approches permettent certes aux éleveurs d'améliorer leur revenu et aux opérateurs d'aval d'améliorer leurs marges sur le marché haut de gamme, donc avec de petits volumes, comme la mise en place de démarches qualité avec respect d'un cahier des charges parfois complexe, ou encore le développement des caves de maturation/« mûrissement », par exemple. Mais ces démarches mettent généralement en œuvre de façon concomitante un à plusieurs facteurs de variation connus de la qualité en bouche, alors que le système MSA travaille sur la base d'une synthèse, ce qui lui permet de considérer la meilleure combinaison entre l'animal, la carcasse, le muscle et la maturation. Toutefois, les deux approches sont complémentaires car le système MSA est en mesure de vérifier que la construction de la qualité par les labels est bonne.

Le modèle de prédiction MSA ouvre aussi de nouvelles perspectives dans le domaine de la génétique. L'index MSA récemment développé peut être considéré comme le potentiel génétique de chaque animal à produire une viande de qualité sensorielle donnée toutes choses égales par ailleurs. Cet index pourrait être introduit dans les schémas de sélection

génétique à l'avenir afin de prendre en compte le potentiel de qualité sensorielle des animaux, ce qui n'a jamais été réalisé jusqu'à présent.

Enfin, il n'est pas impossible que la méthodologie MSA puisse intégrer progressivement d'autres aspects importants de la satisfaction des consommateurs, comme par exemple la qualité nutritionnelle des viandes ou encore le respect de l'environnement. En effet, la méthodologie d'agrégation de critères peut être étendue non seulement aux critères de qualité sensorielle mais à tout type de critères.

La méthodologie MSA ne fait pour l'instant pas l'unanimité en Europe malgré un soutien inconditionnel de certains professionnels (notamment en Pologne) qui ont créé la fondation européenne Meat 3G https://imr3gfoundation.org/. A la demande de cette fondation, la Commission Économique pour l'Europe des Nations Unies recommande l'utilisation de la méthodologie MSA pour le commerce international. D'autres entreprises de viande notamment en France ont développé leur stratégie avec succès en s'appuyant sur certains principes du MSA : une nouvelle marque premium de viande bovine appelée OR ROUGE a ainsi été créé. Au niveau de l'interprofession française, des voix craignent que le système MSA conduise à dévaloriser le troupeau allaitant au profit du troupeau laitier. D'autres voient le MSA comme un concurrent du Label Rouge, alors qu'au contraire, le MSA est présenté comme une méthodologie pouvant aider les signes officiels de qualité ou les marques. Il est également objecté qu'il s'agit uniquement d'une opération « marketing » du *Meat Livestock Australia*, l'interpofession bovine australienne, qui souhaite étendre ses activités d'exportation de viande bovine. C'est la raison pour laquelle, on parle aujourd'hui de la méthode 3G, qui a fait l'objet de décennies de recherche par des organismes de recherche publique dans plusieurs pays, et non plus de la méthode MSA afin de ne pas entretenir la confusion. Cette méthodologie est de nature à soutenir les labels et les marques. En particulier, la méthode 3G pourrait aider à renforcer le Label Rouge en France qui devrait représenter dans quelques années 40 % des produits de viande selon le plan filière.

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants

Fichier 1 : Aliments d'origine animale, leurs caractéristiques et leurs facteurs déterminants

Auteurs : Elisabeth Baeza-Campone et Sophie Prache (coordination), Antoine Clinquart, Cyril Feidt, Joël Gautron, Laurent Guiller, Bénédicte Lebret, Florence Lefèvre, Bruno Martin.
Experts ponctuels : Jérôme Bugeon (poissons), Mireille Cardinal (poissons), Mauro Coppa (fromages Grana Padano et Parmeggiono Reggiano), Geneviève Corraze (poissons), Marie-Pierre Ellies (viande bovine hachée), Benoit Graulet (produits laitiers), Catherine Hurtaud (fromage Camembert), Françoise Médale (poissons), Françoise Nau (ovoproduits), Cécile Sibra (produits laitiers).

Sommaire

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants 183

Introduction 184

2.1. Viande et produits de volailles 185

2.1.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 185

2.1.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 189

2.1.3. Produits transformés 207

2.1.4. Impact des pratiques du consommateur 211

2.1.5. Conclusion 211

2.2. Œufs et ovoproduits 216

2.2.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 216

2.2.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 222

2.2.3. Produits transformés 235

2.2.4. Conclusions 241

2.3. Viande ovine 245

2.3.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 245

2.3.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 246

2.3.3. Produits transformés 264

2.3.4. Impact des pratiques des consommateurs 265

2.3.5. Exemples de tensions entre différentes dimensions de la qualité et acteurs de la chaîne d'élaboration du produit 266

2.3.6. Conclusions 268

2.4. Viande et produits transformés de porc 273

2.4.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 273

2.4.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des carcasses et viandes fraîches depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 282
2.4.3. Produits transformés 304
2.4.4. Conclusions 324
2.5. Viande bovine 336
2.5.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 336
2.5.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 336
2.5.3. Produits transformés : le steak haché 349
2.5.4. Conclusions 354
2.6. Chair de poisson 360
2.6.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation 360
2.6.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets 361
2.6.3. Conclusions 385
2.7. Le lait et les produits laitiers 389
2.7.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation par filière dans l'Union Européenne 389
2.7.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits, depuis l'élevage jusqu'à la consommation, et leurs effets 393
2.7.3. Produits transformés 414
2.7.4. Exemples de tensions/antagonismes/synergies entre différentes dimensions de la qualité et acteurs de la chaîne alimentaire 434
2.7.5. Conclusion 437
Références bibliographiques 440

Introduction

Le chapitre 2 a pour premier objectif de resituer les différents modes de production et de transformation par filière en France et en Europe. La rédaction s'appuie sur la littérature scientifique européenne, mais également mondiale. Cette présentation concerne sept filières majeures : viande et produits de volailles et de porc, viandes bovine et ovine, chair et produits de poissons, œufs et ovoproduits, lait et produits laitiers. Le deuxième objectif vise à décrire et à hiérarchiser pour chaque filière les différents facteurs qui déterminent la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets. Sept propriétés définies dans le chapitre précédent sont ainsi passées en revue : commerciales, sanitaires, organoleptiques, nutritionnelles, technologiques, d'usage et d'image. Les aspects concernant la santé des consommateurs sont traités de façon globale dans le chapitre 3. Pour les produits transformés, des exemples ont été choisis (par ex. jambon cuit et jambon sec pour le porc), car il n'était pas possible de passer en revue l'ensemble des produits commercialisés dans les différentes filières. Afin de rendre la lecture de ce chapitre plus aisée, nous avons choisi de présenter cette première partie par filière (paragraphes 2.1 à 2.7). Le paragraphe suivant (2.8.) est focalisé sur les produits sous signe de qualité avec l'objectif de répondre à la question 'En quoi les cahiers des charges des produits sous signe de qualité contribuent-ils à la construction de la qualité des produits ?' Ici aussi, nous avons choisi certains exemples. Enfin, le dernier paragraphe (2.9.) fait le point sur les outils d'authentification analytique de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits animaux ; il est transversal aux différentes filières, car les méthodologies sont communes.

2.1. Viande et produits de volailles

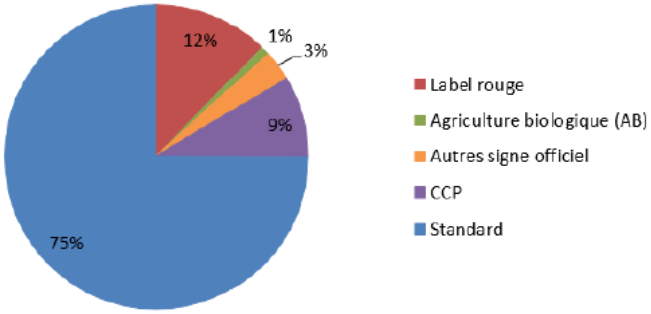
Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Viande de volailles
La bibliographie scientifique concernant la viande de volailles est **dense** car elle recoupe plusieurs espèces même si le poulet est le plus étudié suivi de la dinde puis du canard (surtout depuis ces 20 dernières années et par les équipes de recherche asiatiques). Les thématiques abordées par cette littérature ont évolué en fonction de l'évolution des modes de production, commercialisation et consommation de la viande de volailles. A partir des années 60, les volailles sont commercialisées sous forme de carcasses entières (plutôt des volailles vivantes au préalable). Les efforts de recherche se sont focalisés sur l'amélioration des performances de croissance et de rendement carcasse (qualité commerciale) en utilisant essentiellement les leviers « génétique » et « nutrition ». A partir des années 80, une partie des carcasses est découpée. La notion de rendement en découpe et en particulier de rendement en filet se développe et ce critère est pris en compte dans les programmes de sélection. A partir des années 90, les produits transformés de volailles prennent leur essor. Le rendement technologique devient une problématique importante. Depuis une dizaine d'années, des défauts majeurs de qualité sont apparus sur les filets des poulets standards et les équipes de recherche ont largement publié sur la description de ces défauts, leur occurrence et leur déterminisme. En parallèle de ces évolutions, la demande sociétale, en particulier dans les pays occidentaux a largement évolué contribuant à la création des SIQO. Le 1er SIQO est le Label Rouge (LR) obtenu en 1965 par le poulet des Landes. Très rapidement, des travaux ont comparé la qualité des carcasses et de la viande des poulets LR avec celle des poulets standards. Le LR étant strictement français, la littérature scientifique était publiée surtout par des équipes de recherche françaises. Puis, les autres SIQO ainsi que le poulet plein-air ou « free range » se sont développés en France et en Europe. Les publications ont alors concerné la qualité, des carcasses et de la viande, issues de ces différents SIQO ou systèmes d'élevage avec celle du poulet standard. Il existe dans les autres régions du monde de nombreuses souches de poulet locales élevées de façon extensive qui sont aussi régulièrement comparées au poulet standard de référence. La littérature scientifique sur les produits transformés à base de viande de volailles provient peu des pays occidentaux, suggérant que pour ces pays la recherche et le développement est surtout le fait des entreprises de l'industrie agro-alimentaire qui publient peu afin de préserver leur secret de fabrication et leur avance technologique sur les entreprises concurrentes. La qualité des produits transformés dépend surtout des procédés technologiques et des modes de conservation et de cuisson. Le lien avec les facteurs de variation qui agissent en amont sur la qualité du produit brut est peu étudié. Les informations contextuelles et techniques sur la filière volaille ont été recherchées auprès de l'Institut Technique de l'Aviculture et de FranceAgriMer qui sont missionnés par le Ministère de l'Agriculture pour actualiser, publier et diffuser ces données qui sont tout à fait fiables. Les angles couverts (wos categories) dans l'ESCO recoupent ceux de la littérature citée pour cette filière. Si la littérature scientifique nord-américaine et européenne était largement majoritaire dans les années 50-80, depuis les années 90, nous observons une montée en puissance des travaux publiés par des équipes de recherche asiatiques (Chine, Corée).
Les travaux INRAE et français sont majoritaires dans le corpus, et le taux d'autocitation est de 10%. Néanmoins, la littérature citée offre une **bonne couverture des pays européens**. Les **revues les plus citées sont spécialisées sur l'espèce** (élevage et animal) plutôt que ses produits et existent depuis plusieurs dizaine d'années telles que Poultry Science, British Poultry Science, Journal of Applied Poultry Research, World Poultry Science Journal.

2.1.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation

Pour la viande de volailles, il existe plusieurs modes de production en France et en Europe qui sont explicités dans les tableaux 1 et 2. Il faut noter que pour la production bio, la France se distingue des autres pays européens avec un âge d'abattage plus tardif (81 j vs. 70 j) et donc des souches à croissance plus lente et des coûts de production plus élevés pour éviter une concurrence avec la production Label Rouge. Au sein de la production standard, il est possible de distinguer le poulet export et le poulet lourd dont les poids vifs moyens à l'abattage sont respectivement de 1,4 et 2,5 kg.

La **France** domine le marché européen de la volaille de chair élevée sur parcours (Julien et Le Douarin, 2015). C'est le précurseur de la volaille alternative, lancée à la fin des années cinquante en réaction au développement de poulets à croissance rapide considérés alors de moindre qualité gustative. Les poulets alternatifs, élevés exclusivement sur parcours, représentent 16% des volumes totaux avec 120 millions de têtes qui alimentent le quart de la consommation des ménages français. Le goût (âge d'abattage) et l'environnement de l'animal (parcours, petite structure extensive) ont été privilégiés au type d'alimentation. Le modèle dominant reste le Label rouge, un concept resté franco-français ; loin devant le bio qui ne concerne que quelques millions de têtes auxquels s'ajoute le certifié de 56 jours en claustration, intermédiaire entre standard et label et qui a du mal à trouver des débouchés.

Le poulet Label Rouge représente environ les 2/3 des poulets vendus en carcasses PAC (Prêt à cuire) et le poulet standard représente presque les 2/3 des poulets vendus en découpes (Initiative Bio Bretagne, 2018).



Répartition des abattages contrôlés de volailles en 2016 en France

(source : ITAVI d'après enquête qualité SSP, douanes)

SEGMENTATION DES ACHATS DE POULETS EN 2017

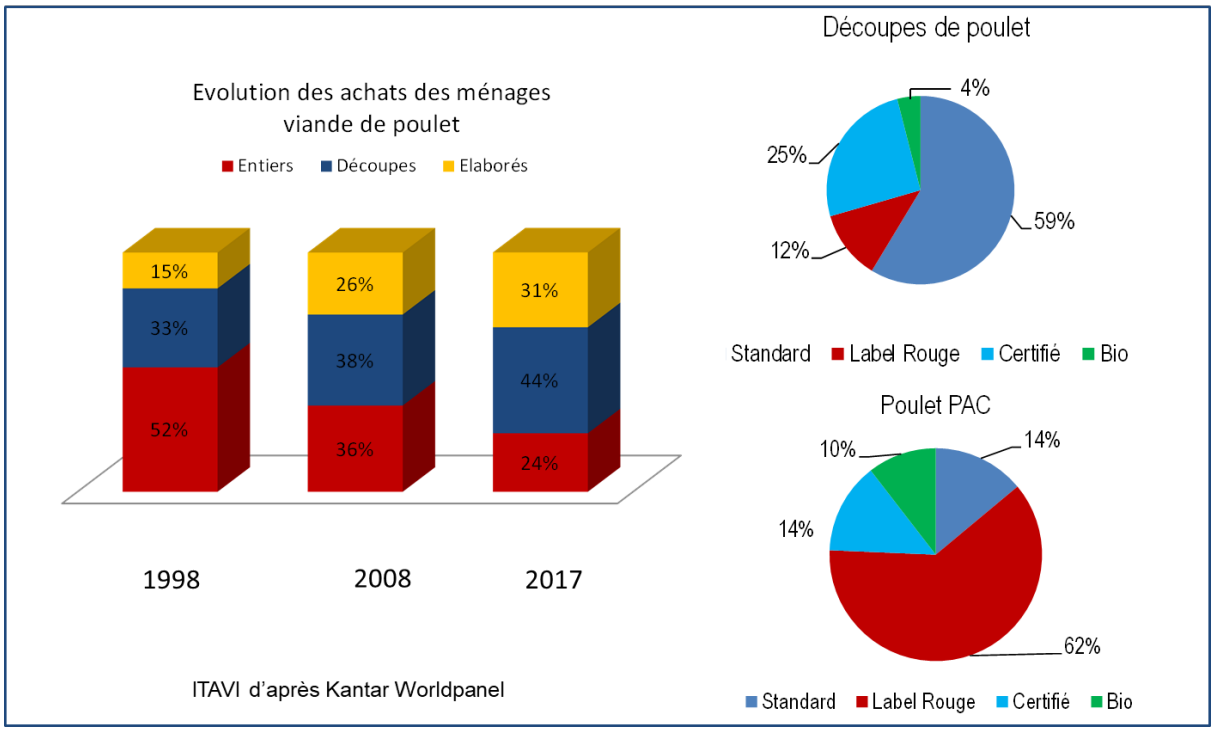


Tableau 2.1.1. Principales caractéristiques des différents modes de production de la viande de poulet en France (Chenut *et al.*, 2013)

	Conventionnel	Label Rouge	Bio	Certifié	IGP	AOC (Bresse uniquement)
Revendication		Qualité sensorielle démarquée du poulet standard	Parcours qualifiés Bio, 1 traitement antibiotique maximum/an	Cahier des charges du groupement	Aire géographique délimitée	Aire géographique délimitée
Type génétique	Souche à croissance rapide	Souche à croissance lente	Souche à croissance lente	Souche à croissance intermédiaire	Souche à croissance lente	Souche à croissance lente, race Gauloise
Identification des individus	non	oui	oui	non	oui	oui
Alimentation	Pas de spécification	75% céréales	95% matières premières bio Pas d'AA de synthèse Pas de traitement coccidiose	Spécifications indiquée dans le cahier des charges	75% céréales	J0-J35 : 50% céréales J36-abattage : 40% maïs, 500 g produits laitiers, 500 g gluten de blé ou maïs Finition de 10 jours en épinette
Accès à un parcours	non	oui à partir de J28-J42 selon la saison, 2 m^2/sujet	oui, 4 m^2/sujet	non	oui à partir de J28-J42 selon la saison, 2 m^2/sujet	oui à partir de J36, ≥ 10 m^2/sujet
Age d'abattage, jours	35-42	86 (81 min.)	87 (81 min.)	56	86 (81 min.)	140-147 (102 min.)
Densité, nombre de poulets/m^2	21-23	11	10	18	11	12
Production max., kg/m^2		25	25		25	24
Surface d'élevage max., m^2		1 600	1 600		1 600	
Surface de parc max., m^2		400	480		400	
Taille du lot max.		1 100 sujets	4 800 sujets		1 100 sujets	4 200 sujets
Nombre de bandes/an	6,4	3,3	3,3	4,6	3,3	2,9
Poids vif à l'abattage, kg	1,8	2,2	2,2	2,0	2,2	2,0
GMQ, g	50	26	26	36	26	16
IC	1,7	3,0	3,1	2,1	3,0	5,1-5,2

GMQ = gain moyen quotidien ; IC = indice de consommation

Tableau 2.1.2. Principales caractéristiques des différents modes de production de la viande de poulet dans l'UE hors France (Chenut *et al.*, 2013) ; Hubbard, 2018[1])

[1] Hubbard, 2018. https://www.hubbardbreeders.com/fr/premium/marches-labels-specifiques

	Conventionnel	Organic	Free Range	Traditional Free Range	Freedom Food	Better Leven, 1 or 2 stars	Chicken of tomorrow
Revendication		Parcours qualifiés Bio, 1 traitement antibiotique maximum/an	Elevage plein-air	Elevage fermier en plein-air	Respect des normes de BEA établies par la RSPCA en 1996 (RU)	Respect des normes de BEA (Pays-Bas) Environnement enrichi (perchoirs, ballots de paille …)	Prise en compte du BEA et de l'environnement
Type génétique	Souche à croissance rapide	Souche à croissance intermédiaire	Pas de spécification	Souche à croissance lente	Souche à croissance intermédiaire	Souche à croissance lente	Souche à croissance intermédiaire
Alimentation	Pas de spécification	95% matières premières bio Pas d'AA de synthèse Pas de traitement coccidiose	70% céréales	70% céréales	Pas de spécification	Pas de spécification	Utilisation de soja issu de production durable et préférence pour une source de protéines locale
Accès à un parcours	non	oui, 4 m^2/sujet	oui, 1 m^2/sujet	oui, 2 m^2/sujet	non	Jardin d'hiver ou plein air	non
Age d'abattage, jours	35-42	70 min.	56 min.	81 min.	Pas de spécification	56 min.	Pas de spécification
Densité, nombre de poulets/m^2	21-23	10	13	12	15	12-13	19
Production max., kg/m^2		25	27,5	25	30	25	38
Surface d'élevage max., m^2		1 600					
Surface de parc max., m^2		480					
Taille du lot max.		4 800 sujets			30 000 sujets		
Poids vif à l'abattage, kg	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2

BEA = Bien-être animal ; RSPCA = Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals

Au **Royaume-Uni**, 20% de la production est alternative (Julien et Le Douarin, 2015). C'est le second pays à s'être intéressé à la production différenciée. *Les attentes des consommateurs sont plus orientées sur le bien-être des animaux que sur l'environnement, le « free range » plutôt que le « bio»*. Pour des raisons économiques, le poulet « *free range »* (5% des volumes produits) est abattu à 56 jours et le bio (1% des volumes produits) à 70 jours, avec des souches à plus forte croissance qu'en France. Parmi les productions alternatives, la production de poulets « *indoor » (11% des volumes produits),* sans parcours, domine. C'est une production qui se rapproche du certifié français avec des spécificités, comme l'enrichissement du milieu d'élevage (bottes de paille, ballons…). Chaque chaîne de magasins impose son propre cahier des charges qui peut aussi être agrémenté du label bien-être animal « *freedom food »* délivré par l'organisation RSPCA (Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals). Ce poulet différencié convient au consommateur britannique attentif au prix. Toutefois, le « freedom food » représente moins de 3% des volumes produits (Chenut *et al.*, 2013).

Aux **Pays-Bas**, le concept alternatif « Beter Leven », avec une à trois étoiles mis en place depuis 2005 par le ministère de l'Agriculture, ne dépasse pas les 2-3% de parts du marché intérieur (Julien et Le Douarin, 2015). Le « Beter Leven » 3 étoiles correspond à la production bio. Les poulets sont abattus au minimum à 56 jours, avec accès à un parcours couvert (jardin d'hiver) ou plein air. En 2012, la campagne du « poulet qui explose » (« Plofkip ») menée contre le poulet standard par l'ONG protectionniste Wakker Dier a changé la donne. En 2013, professionnels et associations ont passé un accord privé pour délivrer au consommateur néerlandais le poulet « kip van morgen » (poulet de demain), avec une croissance limitée à 50 grammes par jour et une densité plus faible (38 kg/m^2), dans un environnement enrichi et avec des critères de durabilité (soja, environnement, antibiotiques…). L'objectif est que cette filière approvisionne 100% du marché domestique frais en 2020 soit environ 1/3 de la production nationale (Chenut *et al.*, 2013).

En **Belgique**, outre le poulet biologique, il existe un poulet dit « de qualité différenciée », qui correspondrait au poulet Label Rouge, et un poulet dit « de qualité intermédiaire », en perte de vitesse. Ces modes de production alternatifs ne concernent que 5 à 10% de la production totale (Chenut *et al.*, 2013).

Quant à l'**Allemagne**, elle se rapproche des Pays-Bas en termes d'attentes du consommateur (d'abord le prix) et de marché, dominé à 95% par le standard. L'alternatif avec parcours y est peu développé, comme aux Pays-Bas. Depuis 2011, il existe le concept bien-être « *Tierschutzlabel »* à deux niveaux, proches du « *Beter leven »* néerlandais à 2 et 3 étoiles. Wiesenhof (une compagnie comparable au groupe français LDC) a lancé son « *Privathof Geflügel »*, un poulet certifié avec jardin d'hiver, à faible densité et milieu enrichi.

2.1.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets

2.1.2.1. Propriété commerciale

Pour les volailles, la qualité commerciale dépend du poids vif à l'abattage (élimination des animaux cachectiques), **du rendement carcasse PAC** (Prêt à Cuire) qui correspond au rapport entre le poids de la carcasse saignée, plumée et éviscérée et le poids vif **et de l'aspect de la carcasse** (absence de défauts visuels tels que les griffures, les lésions cutanées, les ampoules au bréchet, les hématomes, les fractures, les pododermatites, les cellulitis …). L'arrêté du 28 juillet 2016 du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (2016) précise la conduite à tenir face aux anomalies pouvant être rencontrées lors du contrôle post-mortem des carcasses de volailles et de lagomorphes. Le poids vif à l'abattage et le rendement carcasse PAC vont dépendre de la souche, du sexe, des conditions d'élevage et de l'âge à l'abattage. **L'aspect de la carcasse va dépendre des conditions d'élevage, de ramassage, de transport et d'abattage** (Lupo *et al.*, 2010). Lors d'une étude réalisée en 2012-2013 auprès de 5 abattoirs répartis sur tout le territoire français, les taux de saisie pour les poulets « plein-air » et standard étaient respectivement de 0,49% et 1,36% (Baeza *et al.*, 2015a). Dans l'enquête avicole réalisée sur les résultats technico-économiques obtenus en 2017 dans le grand ouest, les taux de saisies étaient supérieurs pour les poulets export (2,21%), standard (0,96%) et lourd (0,88%) comparés aux poulets certifié (0,40%), Label Rouge (0,36%) et bio (0,42%).

Le rendement en filets des volailles est également un critère important pris en compte par les sélectionneurs et les transformateurs du fait de sa valorisation économique. Actuellement, le rendement en filets des poulets à croissance lente est de l'ordre de 16% et celui des souches à croissance rapide de 22%. L'augmentation de ce rendement a surtout été obtenue par sélection (Petracci *et al.*, 2017).

Tableau 2.1.3. Composition corporelle à l'abattage de poulets issus de productions alternatives

	Certifié	Label Rouge	Label Rouge	Label Rouge	Bio
Auteurs	Lessire *et al.* (2015)	Méda *et al.* (2015)	Baéza *et al.* (2010)	Chabault *et al.* (2012)	Germain *et al.* (2015)
Age d'abattage, jours	56	84	84	84	89
Poids vif à l'abattage, g	2806	2638	2233	2678	2459
Rendement filets, % PV	18,45	16,09	15,60	16,50	12,75
Rendement cuisses-pilons, % PV	23,81	23,48	24,70	25,70	25,16
Gras abdominal, % PV	3,52	3,20	2,35	4,00	2,46

Tableau 2.1.4. Effet de l'âge d'abattage sur la composition corporelle de poulets standards (Baeza *et al.*, 2012)

Age d'abattage, jours	35	42	49	56	63
Poids vif à l'abattage, g	1877	2625	3387	4224	4858
Rendement filets, % PV	18,7	19,7	21,2	22,2	22,3
Rendement cuisses-pilons, % PV	22,5	22,9	23,4	23,9	24,2
Gras abdominal, % PV	2,2	2,5	2,4	2,6	2,6

2.1.2.2. Propriété sanitaire

Les aspects sanitaires des produits animaux font l'objet de plusieurs paragraphes dans les chapitres 1 et 3. Les problèmes sanitaires associés aux volailles de chair sont principalement liés à la transmission alimentaire de dangers microbiologiques (notamment *Salmonella* et *Campylobacter*). Le contact avec les volailles peut également être à l'origine de problèmes sanitaires.

La transmission par voie alimentaire des dangers biologiques

Dangers microbiologiques d'importance pour la filière

De très nombreux dangers microbiologiques sont pris en compte par les opérateurs dans la filière des volailles de chairs (Afssa, 2007) et sont potentiellement à l'origine de maladies d'origine alimentaire. Parmi tous les dangers, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter* et *Salmonella* font l'objet d'une intention toute particulière en relation avec le fardeau sanitaire associé à ces dangers (*Cf.* Chapitre 3). Les produits alimentaires issus des volailles sont une des principales sources des cas de campylobacterioses et salmonelloses (Anses, 2017c) et font l'objet de plan de lutte ou de réglementation au niveau de la filière volaille.

Le nombre de cas campylobactérioses en France est estimé à 392 000 cas par an en France (Van Cauteren *et al.*, 2018). Le nombre de cas est relativement stable au niveau européen au cours des cinq dernières années (Efsa et Efsa Ctr Dis Prevention Control, 2018). Jusqu'en 2001, dans l'Union Européenne, le nombre de foyers où *Salmonella* a été isolée était en diminution. Cette amélioration a été attribuée à l'efficacité de la politique de l'Europe en matière de sécurité sanitaire des élevages et des abattoirs (abattage systématique des élevages de poules pondeuses et de reproducteurs contaminés, mesures d'hygiène tout au long de la chaîne de production ; Antunes *et al.* (2016)). Cependant une augmentation du nombre de cas confirmés de salmonellose humaine est observée dans l'UE depuis 2014 (Efsa et Efsa Ctr Dis Prevention Control, 2018 ; Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019).

Facteurs de risque aux niveaux des élevages

De façon générale les mesures de biosécurité sont essentielles pour la maîtrise des dangers microbiologiques (Salvat *et al.*, 2017) quelle que soit la taille de l'élevage (Dallin et Perkins, 2017 ; Meunier *et al.*, 2016).

En Europe, la prévalence de *Campylobacter* dans les élevages et la viande de volailles est saisonnière avec une proportion plus élevée en été et en automne (Osimani *et al.*, 2017). Cet effet de la saison est moins marqué dans les pays à climat tropical (Skarp *et al.*, 2016). Une étude récente menée en France a évalué la concentration moyenne de *Campylobacter* sur les carcasses (après refroidissement). Le niveau moyen de contamination des échantillons de peau du cou a été évalué à 2,6[2,4 ; 2,8] log10 UFC/g pendant la période de juin à décembre, alors que ce niveau était considérablement plus faible pendant la période de janvier à mai (1,0[0,6 ; 1,3] log10 UFC/g) (Duque *et al.*, 2018).

Comme évoqué ci-dessus, la prévalence de *Campylobacter* dans les élevages et la viande est fortement reliée à un non-respect ou une mise en œuvre inadaptée des pratiques d'hygiène, de prévention, de nettoyage et de désinfection des bâtiments d'élevage (Anses, 2018b). L'âge des animaux, la taille des élevages et les opérations de détassage en cours d'élevage sont également des facteurs de risque non négligeables (Anses, 2018b).

Heuer *et al*. (2001) ont étudié la prévalence de *Campylobacter* spp. dans des lots de poulets issus d'élevages bio, standard ou extensif mais en claustration au Danemark sur la période 1998-2000. Ils ont observé une prévalence respectivement de 100, 36,7 et 49,2%. En Suède, Engvall (2002) a trouvé 100% des lots de poulets bio contaminés par *Campylobacter* et 10% des lots de poulets standards. En Belgique, Van Overbeke *et al*. (2006) ont confirmé que les élevages de poulets bio étaient plus contaminés par *Campylobacter* que les élevages de poulets standards. Dans l'étude de Bokkers et De Boer (2009), la viande des poulets bios présentait plus de contamination par *Campylobacter* que celle issue de poulets standards. Pour Voidarou *et al*. (2011), les poulets bio présenteraient une contamination microbienne supérieure à celle mesurée chez les poulets standards.

Concernant *Salmonella*, l'Efas a récemment publié une synthèse sur les facteurs de risque en lien avec la présence de Salmonella dans les élevages (Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019). L'impact du système de logement sur la présence de salmonelles chez les poulets de chair n'a été étudié que dans un nombre limité d'études qui, pour la plupart, n'ont pas relevé de différences significatives ou qui présentent des conclusions contradictoires. Selon les études, la prévalence de *Salmonella* peut être soit supérieure chez les poulets élevés en conditions bio par comparaison avec les poulets standards (Cui *et al.*, 2005), soit inférieure (Alali *et al.*, 2010; Heuer *et al.*, 2001), soit équivalente (Van Overbeke *et al.*, 2006 ; Wierup *et al.*, 2017). Cependant, les données limitées disponibles montrent que le stress, la densité d'élevage et l'augmentation du nombre de poulaillers par ferme augmentent la sensibilité aux salmonelloses (Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019). L'Efsa a montré qu'il n'existe aucune donnée permettant d'évaluer le lien entre les indicateurs de bien-être et la présence de *Salmonella* chez les poulets de chair (Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019).

Concernant *L. monocytogenes*, une enquête réalisée en France en 2005-2006 n'a pas mis en évidence d'effet du système d'élevage (standard vs. plein-air) sur la prévalence chez le poulet de chair (Chemaly *et al.*, 2008).

Facteurs de risque aux niveaux des abattoirs

Comme pour les autres animaux, la maitrise de l'hygiène des procédures abattage est un élément de maitrise de l'ensemble des dangers biologiques en filière des volailles de chair. La réglementation du paquet hygiène définit les obligations des professionnels (application des bonnes pratiques d'hygiène, HACCP, traçabilité des produits) et l'inspection vétérinaire à l'abattoir (Salines *et al.*, 2017 ; Stark *et al.*, 2014).

A l'abattoir, la surveillance par des opérateurs de l'étape d'éviscération est un facteur de risque de la contamination des carcasses par *Salmonella* (Hue *et al.*, 2011). Pour *Campylobacter*, plusieurs étapes sont importantes pour la maitrise du niveau de risque (Anses, 2018b). La maîtrise de la température de l'opération d'échaudage est la première étape importante du procédé d'abattage. L'étape de plumaison entraine souvent l'augmentation de la contamination de la carcasse par *Campylobacter*, provoquée par les doigts des plumeuses qui transfèrent, de poulet en poulet, les Campylobacter. L'éviscération peut également être une source de contamination des carcasses et de transfert de *Campylobacter* lors d'accident du processus entraînant une propagation des matières fécales vers la surface de la carcasse. L'étape de refroidissement semble être une étape importante pour réduire le niveau de contamination.

Pour *L. monocytogenes*, la contamination croisée par la flore résidente dans les abattoirs et les ateliers de découpe semble être le facteur le plus important à considérer (Schafer *et al.*, 2017).

Impact du comportement des consommateurs

Les pratiques des consommateurs jouent un rôle dans le niveau de risque des produits à base de viande de volaille. Le respect de la durée de vie et des températures des produits à consommer en l'état (cuit mais consommé sans réchauffage) permettent de maitriser le niveau de risque (Anses, 2015b).

Des niveaux de cuisson insuffisants des viandes de volailles comme la contamination croisée dans la cuisine peut entraîner l'ingestion de salmonelles (Luber, 2009 ; Pouillot *et al.*, 2012). Les mêmes facteurs de risques sont reconnus pour *Campylobacter* (Anses, 2018b ; Pouillot *et al.*, 2012).

La transmission par contact des dangers biologiques

Les virus influenza aviaires peuvent contaminer l'homme[2]. La majorité des cas ont concerné le virus Eurasien H5N1 HP et plus récemment le virus chinois H7N9LP. Le nombre total de cas humains dus au virus H5N1 en Asie et en Afrique entre 2003 et 2013 est de 648 dont 384 sont morts. Le premier facteur de risque pour l'infection de l'homme est le contact direct avec une volaille contaminée vivante ou morte. Quelques cas ont résulté de la consommation de produits de volailles non cuits, de plumaison de cygnes sauvages infectés ou d'un contact étroit avec un autre cas humain. Le principal symptôme est une infection respiratoire. Le nombre total de cas humains dus au virus H7N9 LP en Chine en 2013 était de 137 dont 45 sont morts. Ces personnes ont pour la plupart été exposées à des volailles infectées vivantes dans les marchés. Parmi les 89 cas humains d'infection confirmée aux Pays-Bas en 2003 avec le virus H7N7 HP, le symptôme le plus fréquent était une conjonctivite. Une personne est décédée. Les autres virus influenza contaminent rarement ou pas l'homme. De nombreux oiseaux sauvages en particulier les palmipèdes sont souvent porteurs sains de ces virus qu'ils peuvent disséminer dans le monde entier lors des migrations. Les virus influenza font donc l'objet d'une surveillance mondiale par différents organismes : ministère de l'Agriculture aux USA (USDA), World Health Organization (WHO), World Organization for Animal Health (OIE), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), European Food Safety Agency (Efsa), Anses. De nombreuses mesures de biosécurité ont été mises en place[3]. L'élevage en plein-air est considéré comme le facteur de risque majeur pour l'introduction et la dissémination de l'influenza aviaire ce qui conduit au confinement des animaux lors du passage des oiseaux sauvages migrateurs (Koch et Elbers, 2006). Le transport et l'exportation de volailles sont également très limités voire interdits en cas d'alerte.

Les personnes en contact avec les volailles peuvent contracter la psittacose (Vorimore *et al.*, 2015). C'est une zoonose transmise à l'homme par les oiseaux sauvages ou domestiques. Elle est associée à la bactérie *Chlamydia psittaci*. La maladie prend le plus souvent une maladie bénigne, mais elle peut s'aggraver (forme d'une pneumopathie atypique sévère). En France en milieu professionnel, les sources de contamination les plus souvent incriminées sont les canards.

Les dangers chimiques

La viande de volaille peut faire l'objet de contamination avec des **résidus chimiques** ou des **polluants de l'environnement**. Les résidus chimiques concernent les produits vétérinaires pour lesquels la période de retrait n'a pas été respectée ou les produits phytosanitaires utilisés pour la production des matières premières végétales utilisées pour l'alimentation des volailles. Les polluants de l'environnement sont les mycotoxines, les métaux lourds, les dioxines, les PCBs et les retardateurs de flamme bromés (HBCD). Les mycotoxines peuvent être apportées par les matières premières végétales non traitées avec des fongicides en particulier en production bio ou lors d'une mauvaise conservation de ces matières premières ou des aliments. L'exposition aux autres polluants de l'environnement relève plutôt de l'accident ou de l'état dégradé des bâtiments d'élevage et de leur équipement en particulier les matériaux d'isolation pour HBCD. Par exemple, en Janvier 1999, en Belgique, un mélange de PCBs contaminé avec des dioxines avait été ajouté par mégarde à de la graisse recyclée et utilisée dans l'alimentation animale (Bernard *et al.*, 2002). Environ 2 500 élevages de volailles pouvaient avoir été livrés avec *cet al*iment contaminé provoquant une crise alimentaire majeure résolue après la mise en place d'un plan de surveillance des aliments pour ces contaminants. Les études concernant la contamination de la viande de volailles avec des résidus chimiques et des polluants de l'environnement selon le système d'élevage sont rares. Une étude récente, réalisée en France, a montré que les teneurs en contaminants de l'environnement (dioxines, PCBs, HBCD, Zn, Cu, Cd, Pb, As) des échantillons de viande étaient certes en dessous des valeurs réglementaires admises mais supérieures chez les poulets bio comparés aux poulets standards (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017). En effet, les poulets bio ont une durée d'élevage plus longue que celle des poulets standards et ils ont accès à un parcours extérieur ce qui accroit leur risque d'exposition à des contaminants de l'environnement.

---

[2] https://www.msdvetmanual.com/poultry/avian-influenza/overview-of-avian-influenza

[3] http://www.oie.int/doc/ged/D13947.PDF

http://www.oie.int/en/animal-health-in-the-world/avian-influenza-portal/prevention-and-control/

2.1.2.3. Propriété organoleptique

La couleur de la viande de volailles peut être modifiée par l'alimentation en particulier lorsque l'apport de pigments caroténoïdes est important. Les poulets Label Rouge à peau jaune ont une alimentation plus riche en maïs et pigments caroténoïdes que les poulets Label Rouge à peau blanche. Leurs filets sont également plus foncés, plus rouges et plus jaunes. Lors d'une enquête dans plusieurs abattoirs français, Gigaud *et al*. (2011) ont montré que les valeurs de L*, a* et b* sont de 48,07, 0,88 et 15,15 pour les poulets à peau jaune vs. 49,56, -0,01 et 10,03 pour les poulets à peau blanche. Jahan *et al*. (2005) ont bien montré que les filets de poulets nourris avec une forte proportion de maïs dans l'aliment se distinguaient bien des filets de poulets standards, bio ou élevés en plein-air de par leur coloration plus jaune. De même l'utilisation de protéagineux ou tourteaux d'oléoprotéagineux en remplacement du soja dans l'alimentation des poulets augmente la coloration jaune de la peau et des filets (Lessire *et al.*, 2015 ; Méda *et al.*, 2015). Les canards sont gavés exclusivement avec du maïs. Le magret est plus riche en pigments caroténoïdes et sa teneur en lipides est doublée par comparaison avec le filet de canard maigre. Sa couleur est plutôt brun chocolat alors que la couleur du filet de canard maigre est rouge foncé. Les valeurs de L* et b* sont de 42,30 et 14,52 pour le magret vs. 32,37 et 9,37 pour le filet de canard maigre (Chartrin *et al.*, 2006). Une supplémentation alimentaire avec des extraits de fleurs de soucis à 0, 100, 150 ou 200 mg/kg n'a pas d'effet sur la luminance et l'intensité de rouge des filets et des cuisses-pilons de poulets. Par contre, l'intensité de jaune s'accroît de 8,55 à 14,09 dans la cuisse et de 9,53 à 12,90 dans le filet (Rajput *et al.*, 2012). Une supplémentation alimentaire avec de la spiruline, une algue riche en pigments caroténoïdes, à 0,40 ou 80 g/kg n'a pas d'effet sur la luminance et l'intensité de rouge du filet de poulet. Par contre, l'intensité de jaune s'accroît de 3,5 à 12,3 (Toyomizu *et al.*, 2001). Toutefois, la capacité à fixer les pigments caroténoïdes dépend du génotype. En effet, Le Bihan-Duval *et al*. (2011) ont mis en évidence deux SNP (Single Nucleotide Polymorphisms) sur le promoteur du gène codant pour la bêta-carotène 15, 15'-monooxygénase (BCMO1), une enzyme clé intervenant dans la conversion du bêta-carotène en rétinal. Les filets des poulets porteurs de l'un des allèles (GG) sont plus riches en pigments caroténoïdes (lutéine et zéaxanthine) et présentent une couleur plus jaune que ceux porteurs de l'autre allèle (AA). L'expression du gène est trois fois plus importante avec l'allèle (GG) comparé à l'allèle (AA) et cela traduit par un point de différence sur l'intensité de jaune (b*) dans le filet de poulet (Le Bihan-Duval *et al.*, 2011). **La couleur de la viande dépend aussi de la teneur en lipides et en pigments héminiques**. Plus la teneur en lipides est élevée, plus la viande est claire et plus l'intensité de jaune est accrue. Lorsque la teneur moyenne en lipides du filet de canard s'accroît de 2,6 à 5,6%, la luminance et l'intensité de jaune augmentent de 34,4 à 41,8 et de 10,4 à 14,2 avec des corrélations de 0,49 et 0,47, respectivement (Chartrin *et al.*, 2006). Avec l'âge, la teneur en pigments héminiques augmente et la viande devient plus rouge et plus foncée. Entre les âges de 8 et 15 semaines, la luminance décroit de 45,7 à 35,4 et l'intensité de rouge augmente de 8,4 à 16,1 dans le filet de canard (Baeza *et al.*, 1998b). En comparant des filets de poulets standards abattus à l'âge de 6 semaines avec des filets de poulets Label Rouge abattus à l'âge de 12 semaines, Berri *et al*. (2005b) ont obtenu des valeurs de 52,6 et 50,8 pour la luminance et -0,4 et +0,4 pour l'intensité de rouge, respectivement. Lors de l'enquête dans les abattoirs, réalisée par Gigaud *et al*. (2011), la mesure de la couleur sur les filets avait mis en évidence une coloration plus foncée, plus rouge et plus jaune pour la viande de poulets Label Rouge par comparaison avec les poulets certifiés et standards abattus à des âges plus précoces et présentant des rendements en filets supérieurs. **Pour les viandes blanches, la couleur va fortement dépendre des réserves en glycogène du muscle lors de l'abattage et de l'évolution post-mortem du pH.** Plus le stock de glycogène ante-mortem (ou potentiel glycolytique) est élevé, plus le pH dans la viande va décroître pouvant atteindre 24 h post-mortem (pHu) des valeurs proches de 5,5. Ce pH acide va favoriser la dénaturation des protéines et donc celle des pigments héminiques. Les liaisons des protéines avec l'eau sont aussi plus faibles, la viande va exsuder et paraître plus claire et moins rouge. Dans des filets de poulets standards, Berri *et al*. (2007) ont montré que la corrélation entre le pHu et le potentiel glycolytique était de -0,57 et avec la luminance de -0,61. Dans cette étude, lorsque le potentiel glycolytique augmente de 102 à 112 µM équivalent lactate/g muscle, la valeur du pHu décroît de 5,68 à 5,61 et la luminance augmente de 53,8 à 55,9. Au niveau génétique, la corrélation entre le pHu et la luminance du filet est encore plus forte variant de -0,65 à -0,91 selon les souches étudiées (Chabault *et al.*, 2012; Le Bihan-Duval *et al.*, 2001 ; Le Bihan-Duval *et al.*, 2008). Récemment, une expérience de sélection divergente sur le pHu du filet de poulets à croissance rapide a confirmé ces relations entre ce critère et la couleur de la viande (Alnahhas *et al.*, 2014). Après 5 générations de sélection, les valeurs du pHu étaient de 6,09 et 5,67 pour les lignées à pHu élevé (pHu+) et faible (pHu-), respectivement. Les filets de la lignée pHu+ étaient plus foncés (L* = 47,50 vs. 52,50), moins rouges (a* = -0,17 vs. 0,05) et moins jaunes (b* = 9,49 vs. 11,02). La corrélation génétique entre la luminance et le pHu était beaucoup plus élevée dans la lignée pHu- que dans la lignée pHu+ (-0,71 vs. -0,29), suggérant un impact moindre du pHu sur la couleur lorsqu'il est élevé. Par ailleurs, la sélection des poulets sur l'augmentation de la vitesse de croissance et du rendement en filet a eu pour effet de diminuer l'intensité de rouge et d'augmenter l'intensité de jaune et la luminance par dilution des pigments héminiques (Berri *et al.*, 2001), suggérant que le nombre de capillaires sanguins n'augmente pas dans les mêmes proportions que la taille des fibres

musculaires. Les filets présentant le défaut de « white striping » (muscle présentant des stries blanches parallèles aux fibres musculaires, (Baéza *et al*. (2015a)) ont une intensité de jaune supérieure à celle des filets normaux (3,16 vs. 2,37 ; Kuttapan *et al*. (2013)).

Enfin, la couleur de la viande peut aussi être influencée par les conditions de pré-abattage (jeûne, enlèvement, mise en caisses, transport, attente à l'abattoir) qui peuvent générer un stress chez les animaux et donc impacter le potentiel glycolytique et le pHu des muscles. Par exemple, Chen *et al*. (1991) ont exposé des canards Pékin à un exercice forcé de 10 min après 8 ou 24 h de jeûne. Les filets et les cuisses de ces canards étaient plus foncés, moins rouges et moins jaunes que ceux des canards témoins exposés uniquement à 8 h de jeûne. En production de poulets standards, la durée de jeûne (1 à 24 h), la durée de ramassage à l'élevage (30 à 75 min), la durée de transport (50 min à 3 h), une exposition à la chaleur (10 h à 30°C) ou au froid (10 h à 7°C) et la durée d'accrochage sur la chaîne d'abattage avant la narcose (10 ou 120 s) n'ont pas eu d'effet sur la couleur des filets (Gigaud *et al.*, 2007 ; Schneider *et al.*, 2012). Toutefois, pour les poulets à croissance lente adaptés à la production Label Rouge, plus la durée d'accrochage sur la chaîne d'abattage avant la narcose est longue et plus les filets sont rouges du fait d'une forte réactivité de ces animaux qui battent des ailes et effectuent des tentatives de redressement provoquant un afflux important de sang dans les muscles pectoraux (Berri *et al.*, 2005a ; Debut *et al.*, 2005). D'ailleurs pour ce type de souche, la corrélation génétique entre la durée des battements d'ailes avant électronarcose et l'indice de rouge des filets est estimée à 0,52 (Chabault *et al.*, 2012). **La couleur de la viande de volailles est en général peu modifiée au cours de la conservation au froid**. Toutefois Zouari *et al*. (2010) ont mis en évidence une baisse de l'intensité de rouge sur les muscles de la cuisse de poulets de 8-9 à 6-7 après 5 jours de stockage à 8°C dans une vitrine éclairée 12 h par jour ou après 9 jours de stockage à +4°C à l'obscurité. Russell *et al*. (2004) ont également observé une diminution de l'intensité de rouge lors de la conservation de filets et cuisses de canard à +4°C. Par ailleurs, l'apport alimentaire d'antioxydants (vitamines E et C, sélénium) et les modalités de conservation (emballage sous film plastique, sous vide ou sous atmosphère modifiée) ont peu d'impact sur la stabilité de la couleur de la viande de volailles lors de sa conservation au froid (Blacha *et al.*, 2013 ; 2014 ; Coetzee et Hoffman, 2001 ; Marcinkowska-Lesiak *et al.*, 2016; Mercier *et al.*, 1998 ; Russell *et al.*, 2004 ; Skrivan *et al.*, 2012).

La jutosité de la viande dépend de sa teneur en eau et en lipides et de sa capacité de rétention en eau. **Elle est peu impactée par l'alimentation**, à l'exception des facteurs qui ont un effet sur la teneur en lipides. Lorsque la teneur moyenne en lipides du filet de canard s'accroît de 2,6 à 5,6%, les pertes en jus après cuisson augmentent de 15,0 à 17,8% avec une corrélation de 0,54 et la note de jutosité s'accroît (Chartrin *et al.*, 2006). **La jutosité de la viande est surtout influencée par l'âge et le génotype.** Pour des canards de Barbarie mâles abattus à 8 ou 15 semaines, la note de jutosité après cuisson au grill diminue de 6,2 à 5,8 (Baeza *et al.*, 1998b). Culioli *et al*. (1990) et Rabot (1998) ont montré que la viande de poulets standards cuits en carcasse entière en rôtissoire (cuisses et filets) était plus juteuse que celle de poulets Label Rouge. Pour des poulets à vitesse de croissance lente abattus à différents âges entre 8 et 16 semaines, Touraille *et al*. (1981) ont montré également une diminution de la note de jutosité des filets et des cuisses avec l'âge. Le délai entre abattage et découpe peut aussi influencer la jutosité des filets de poulets, la viande étant jugée d'autant plus sèche en bouche que ce délai est court (Gigaud *et al.*, 2010).

La tendreté et le caractère fibreux de la viande dépendent de la teneur et du niveau de réticulation du collagène mais également de la taille des fibres musculaires. Les volailles sont abattues à des âges très précoces par comparaison avec les autres espèces. La viande de volailles est donc en général jugée plutôt tendre. **L'alimentation a peu d'effet sur la tendreté de la viande**. Toutefois, Carreras *et al*. (2004) ont montré qu'une supplémentation des régimes avec des antioxydants (vitamines A et E) pouvait accroître la tendreté des filets cuits de poulets. **La texture de la viande de volailles est surtout impactée par l'âge, le sexe, le génotype, le système d'élevage et les techniques d'abattage** (mode de narcose) **et de traitement post-mortem des carcasses** (électrostimulation, vitesse de refroidissement, intervalle abattage-découpe) qui vont influencer l'évolution du pH et de la *rigor mortis*. Pour des canards de Barbarie mâles abattus aux âges de 8 et 15 semaines, la note de tendreté des filets après cuisson au grill diminue de 7,06 à 5,94 (Baeza *et al.*, 1998b). Pour des poulets à vitesse de croissance lente abattus à différents âges entre 8 et 16 semaines, Touraille *et al*. (1981) ont montré une diminution de la note de tendreté des filets et des cuisses avec l'âge. La résistance à une force de compression des filets et des muscles de la cuisse, cuits des poulets Label Rouge est supérieure à celle des poulets standards (53 vs. 43 N/cm^2 et 95 vs. 80 N/cm^2, respectivement) et la note de tendreté est inférieure (5,66 vs. 7,13 ; Culioli *et al*. (1990)). Cette différence est certainement due à la différence de l'âge à l'abattage (6 vs. 12 semaines) mais d'autres éléments pourraient intervenir comme un pHu de la viande nettement plus acide, un diamètre des fibres musculaires plus petits (Berri *et al.*, 2005b) ou encore l'accès des poulets Label Rouge à un parcours extérieur qui leur permet d'avoir un exercice physique et donc une activité musculaire plus importants. D'ailleurs, en élevant des poulets à croissance intermédiaire avec accès ou non à un parcours de

l'âge de 28 à 63 jours, Michalczuk *et al*. (2017) ont obtenu une force de cisaillement plus importante sur les filets des poulets ayant eu accès au parcours (30,39 *vs.* 28,66 N). Après cuisson au grill, les filets des oies Landaises élevées de façon intensive et abattues à l'âge de 14 semaines sont jugés plus tendres que ceux des oies élevées de façon extensive et abattues à l'âge de 24 semaines (note de 5,99 vs. 4,31 ; Baéza *et al*. (1998a)). Les filets des canards de Barbarie ont une résistance à une force de compression-cisaillement et une note de fibrosité supérieures à ceux des canards Pékin (183 vs. 151 J et 4,35 vs. 3,71, respectivement ; (Chartrin *et al.*, 2006) et la note de tendreté est inférieure (4,39 vs. 5,44). Ces différences pourraient être expliquées, en partie, par la taille des fibres musculaires qui est supérieure chez le canard de Barbarie (aire de section transversale de 929 vs. 683 μm^2 et 2028 vs. 1680 μm^2 pour les fibres oxydatives et oxydo-glycolytiques, respectivement ; Chartrin *et al*. (2005b). Chartrin *et al*. (2006) ont montré que la tendreté des filets de canards dépendait aussi de leur teneur en lipides avec une corrélation de 0,43. Culioli *et al*. (1990) ont montré que les filets et les cuisses des poulets mâles Label Rouge ont une résistance à une force de compression inférieure à celle des poulets femelles Label Rouge (48,4 vs. 57,4 N/cm^2 et 87,4 vs. 102,9 N/cm^2, respectivement). Cependant, des travaux récents ne mettent pas en évidence un effet significatif du sexe sur la résistance au cisaillement des filets de poulets Label Rouge (Méda *et al.*, 2015), certifiés (Lessire *et al.*, 2015) ou standards (Alnahhas *et al.*, 2014). Pour un âge donné, les filets des canes de Barbarie sont jugés moins tendres et moins moelleux après une cuisson au grill que ceux des canards de Barbarie (Baeza *et al.*, 1998b). En effet, chez les volailles, les femelles ont un développement corporel et musculaire plus précoce que celui des mâles. Les caractéristiques structurales, physico-chimiques et sensorielles de leurs muscles ont donc une avance de 1-2 semaines sur celles des mâles. La texture de la viande va dépendre aussi de l'évolution post-mortem du pH et de la phase de *rigor mortis*. Lorsque le pHu est supérieur à 6,0 la viande est qualifiée de DFD pour « Dark, Firm and Dry » et lorsque le pHu est inférieur à 5,7, la viande est qualifiée d'acide et présente les caractéristiques des viandes PSE pour « Pale, Soft and Exudative ». Toutefois, cet impact sur la texture ne concerne que la viande crue. En effet, après cuisson, c'est l'inverse qui est observé. Chez deux lignées expérimentales de poulets présentant un pHu moyen de 6,09 et 5,67, la résistance des filets cuits à une force de compression-cisaillement est de 10,9 et 16,0 N/cm^2, respectivement (Alnahhas *et al.*, 2014). Les filets et les cuisses rôtis des poulets pHu+ sont aussi jugés plus tendres que ceux des poulets pHu- (Alnahhas *et al.*, 2015). En comparant deux génotypes de poulets standards, Petracci *et al*. (2013b) ont montré que celui présentant le plus fort rendement en filets avait une résistance à une force de compression-cisaillement supérieure (2,59 vs. 2,11 kg/g). Les filets de poulets crûs présentant le défaut de « white striping » de façon prononcée ont une résistance à une force de compression-cisaillement inférieure à celle mesurée dans les filets normaux (3,69 vs. 4,91 kg/g ; Petracci *et al*. (2013a)). Le délai entre abattage et découpe a une incidence très marquée sur la tendreté de la viande cuite. Il est recommandé d'attendre au moins 4 h avant de découper les filets des os du bréchet pour éviter d'avoir une viande jugée ensuite dure par le consommateur. Des filets de poulets découpés 45 min ou 2 h après abattage ont une note de fermeté plus élevée après cuisson que ceux de poulets découpés 24 h après abattage (6,6 et 6,4 vs. 4,7 ; Zhuang et Savage (2011). Des filets de poulets mâles découpés 2 ou 4 h après abattage ont une résistance à une force de cisaillement supérieure à celle des filets découpés 6 h après abattage (193 et 174 vs. 164 N/mm ; Brewer *et al*. (2012)). Le tableau 2.1.5 illustre bien la diminution de la dureté de la viande en fonction de l'intervalle abattage-découpe. L'effet négatif sur la texture de la découpe précoce de la viande juste avant ou pendant la période de *rigor mortis* peut être, dans certains cas, compensé par une phase de maturation plus longue. Par exemple, la viande de canard de Barbarie découpée 0,5 h après abattage et stockée à +4°C pendant 4 jours est aussi tendre que la viande de canard découpée 4 jours après abattage (Knust *et al.*, 1997).

Tableau 2.1.5. Force de cisaillement (kg/g viande) mesurée sur des filets de canards Pékin ou de poulets découpés 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 6 ou 24 h après abattage et cuits aussitôt (0 h) ou 24 h après découpe (n=8 ; Smith *et al*. (1992)

	Canard Pékin		**Poulet**	
Intervalle abattage-découpe (h)	0 h	24 h	0 h	24 h
0,25	13,2 a	14,0 a	19,6 a	19,1 a
0,5	14,0 a	13,2 ab	20,9 a	17,5 ab
1	13,2 a	10,5 bc	17,1 ab	13,5 bc
2	13,0 a	9,4 cd	14,1 bc	10,1 c
4	11,6 a	9,5 cd	8,4 de	8,9 c
6	11,8 a	9,6 cd	10,4 cd	9,4 c
24	9,1 b	7,2 d	4,2 e	4,1 d

a-e : Les moyennes d'une même colonne non suivies par les mêmes lettres sont significativement différentes à $P < 0,01$.

L'impact négatif sur la texture d'un délai court entre abattage et découpe est vérifié quel que soit le type de production, avec un effet plus marqué sur les filets des poulets Label Rouge dont la viande est plus ferme que celle des poulets certifiés et standards (Figure 2.1.1).

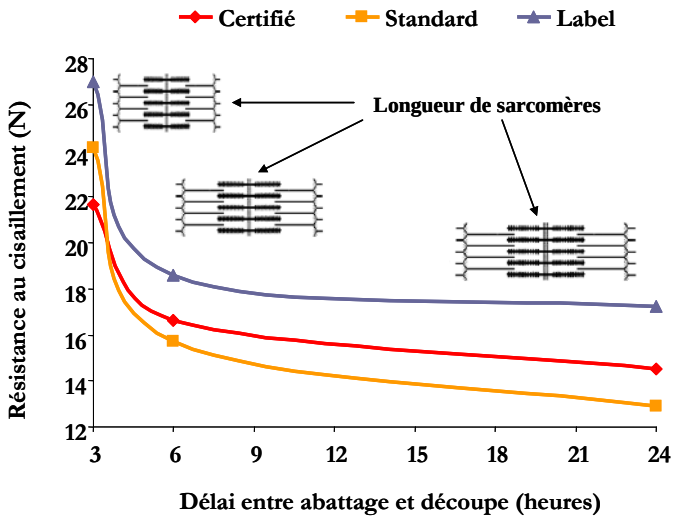


Figure 2.1.1. Effet du délai de découpe après abattage sur la résistance au cisaillement et la longueur des sarcomères des filets de poulets standards, certifiés et Label Rouge (Berri *et al.*, 2006)

La narcose au gaz, qui prive plus rapidement l'apport en oxygène aux muscles que la narcose électrique, accélère l'entrée en phase de rigor mortis ce qui permet de raccourcir le délai abattage-découpe (Raj, 1994). Il est aussi possible de réduire le délai de découpe après abattage sans altérer la texture de la viande en pratiquant une électrostimulation des carcasses au cours du processus d'abattage. Ce procédé qui provoque une contraction des muscles accélère la glycolyse post mortem et la chute du pH en utilisant les réserves énergétiques du muscle et permet une entrée en phase de *rigor mortis* plus rapide. La stimulation électrique pratiquée après la saignée est plus efficace que celle pratiquée après plumaison (Zhuang *et al.*, 2010). Dans cette étude, les carcasses étaient soumises à un courant électrique alternatif de 60 Hz et 200 V avec des pulses de 0,5 s suivis d'un arrêt du courant de 1 s et sur une durée totale de 90 s. Le délai de découpe après abattage peut ainsi être réduit à 2 h. L'électrostimulation avec un courant d'intensité élevée (350 à 500 mA) est plus efficace que celle utilisant un courant de faible intensité (< 200 mA ; Sams (2002)). La texture de la viande est également influencée par la température de refroidissement des carcasses. Lorsque cette température est de l'ordre de 0°C, le muscle subit un phénomène de contraction au froid surtout au cours de la première heure qui suit l'abattage (Dunn *et al.*, 1993 ; Papinaho et Fletcher, 1996) non suivie d'une relaxation *et al*térant la tendreté ultérieure de la viande. Toutefois, pour le canard, le refroidissement des carcasses à 0, 10 ou 20°C pendant 30 min suivi d'un stockage à +4°C pendant 24 h n'a pas d'effet sur la qualité des filets (Ali *et al.*, 2008).

La flaveur et le goût dépendent surtout de la composition chimique de la viande. **L'alimentation va donc avoir une forte influence sur ces paramètres en modulant en particulier la teneur et la composition des lipides et la teneur en antioxydants.** Chartrin *et al*. (2006) ont montré que plus la teneur en lipides du filet de canard est élevée, plus la note de flaveur est importante avec une corrélation de 0,28. Les magrets de canard, plus riches en lipides, ont une note de flaveur supérieure à celle des filets de canards. La viande de canard, plus riche en phospholipides qui sont des précurseurs des arômes après cuisson, a une flaveur jugée plus prononcée que la viande de poulet. Il en est de même pour les cuisses comparées aux filets (Rabot, 1998). La composition en acides gras est également importante, en particulier la teneur en AGPI n-3 à longue chaîne. L'utilisation d'huiles de poisson à des concentrations supérieures à 1,5% dans l'aliment a un impact négatif sur la flaveur de la viande de poulet (Lopez-Ferrer *et al.*, 2001b). L'incorporation de microalgues dans l'aliment, avec une teneur à 2%, est détectée lors de l'analyse sensorielle des cuisses rôties de poulets, avec la mise en évidence d'une flaveur anormale qualifiée de goût de poisson (Baeza *et al.*, 2015b). Par contre, la flaveur des filets, moins riches en lipides, n'est pas modifiée. Bou *et al*. (2001) ont analysé l'effet de la source de lipides dans l'aliment sur la flaveur des cuisses de poulets cuites après 13 mois de stockage à -20°C. La flaveur rance est beaucoup plus prononcée pour l'aliment contenant de l'huile de lin riche en AGPI par comparaison avec ceux contenant du suif de bœuf ou de l'huile de tournesol. La supplémentation de l'aliment avec 225 mg de vitamine E permet de réduire fortement ce défaut. Sheldon *et al*. (1997) ont également montré que la supplémentation de l'aliment avec des doses élevées de vitamine E (250-300 ppm) avait un effet positif sur la flaveur des

filets de dinde cuits après conservation pendant 8 jours à +4°C ou 90 jours à -20°C. Elle permet aussi de diminuer la formation de flaveurs désagréables après cuisson de cuisses de poulets conservées 3 ou 5 jours à +4°C ou 5 ou 10 semaines à -20°C (O'Neill *et al.*, 1998). Augmenter la concentration de l'aliment en valine, isoleucine et leucine à 150% du besoin, 10 jours avant l'abattage, accroît les notes de flaveur et de goût umami des filets après cuisson par comparaison avec ceux des poulets alimentés avec un régime à 100% du besoin (Imanari *et al.*, 2008).

La flaveur et le goût de la viande sont également influencés par l'âge, le sexe et le génotype de par leurs effets sur la teneur et la composition des lipides. Touraille *et al*. (1981) ont bien montré que la note de flaveur des filets et des cuisses de poulet augmentait entre les âges de 8 et 14 semaines. En comparant des poulets à croissance lente et rapide abattus à 48 ou 83 jours, Farmer *et al*. (1997) ont aussi observé une augmentation de la flaveur des filets avec l'âge. Cependant, Culioli *et al*. (1990), Girad *et al*. (1993) et Rabot (1998) n'ont pas mis en évidence de différence de flaveur sur les filets et les cuisses rôties de poulets Label Rouge comparés à ceux de poulets standards. La note de flaveur des filets grillés de canard de Barbarie s'accroît de 4,83 à 6,23 entre les âges de 8 et 15 semaines (Baeza *et al.*, 1998b). Pour un âge donné, la note de flaveur du filet grillé de cane de Barbarie est toujours supérieure à celle du filet de canard (Baeza *et al.*, 1998b). La sélection sur le pHu du filet de poulet a également un impact sur la perception de l'acidité des filets rôtis ou grillés, les poulets de la lignée expérimentale pHu- ayant une note supérieure à celle des poulets pHu+ (Alnahhas *et al.*, 2015). Fanatico *et al*. (2006 ; Fanatico *et al.*) ont également mis en évidence un effet du génotype sur la flaveur des cuisses en comparant différentes souches de poulet. Enfin, **la durée et les conditions de conservation peuvent aussi avoir un impact sur la flaveur de la viande**. Par exemple, Haugen *et al*. (2006) ont noté le développement de l'odeur rance de muscles de cuisses de dindes sans peau, broyés et conservés à -10°C ou -20°C sous un film plastique perméable à l'air ou sous vide. L'odeur rance se développe de façon plus intense lors de la conservation sous film plastique à -10°C en particulier après 20 jours de stockage. La formation d'odeurs désagréables lors d'un stockage à +8°C de filets de poulets sous atmosphère modifiée (0, 2 ou 4% d'oxygène) est plus rapide (2 vs. 5 jours) et plus importante (note 5 vs. 4) que celle observée à +4°C (Pettersen *et al.*, 2004). Des filets de poulets stockés sous atmosphère modifiée (70% CO_2, 30% N_2) ont des notes de goût et d'odeur supérieures à celles de filets stockés sous film plastique perméable à l'air, en particulier, après 6 jours de conservation à +4°C (Latou *et al.*, 2014). Des filets de poulets ont été stabilisés par un stockage dans un sac contenant 95% de CO_2 pendant 12 h puis ils ont été stockés sous atmosphère modifiée (59% CO_2 et 41% N_2) pendant 24 jours à +4°C. Ce traitement a permis de réduire significativement la formation d'odeurs désagréables par comparaison avec des filets emballés directement sous atmosphère modifiée (note de 2,4 vs. 3,1 ; Rotabakk *et al*. (2006)).

2.1.2.4. Propriété nutritionnelle

La viande de poulet présente une **teneur en protéines** élevée de l'ordre de 23-25% dans le filet et de 18% dans la cuisse (Baeza *et al.*, 2012; Berri *et al.*, 2005b ; Rabot, 1998). Les acides aminés majoritaires sont la glutamine, l'asparagine, la lysine, la leucine, l'arginine et l'alanine avec des teneurs comprises entre 49 et 110 mg/g de matières sèches dans le filet et 38 à 94 mg/g matières sèches dans les muscles de la cuisse (Strakova *et al.*, 2006). **La composition en acides aminés** de la viande de volailles est relativement stable. Toutefois, il est possible de la faire varier à la marge en modulant l'apport en acides aminés du régime. Augmenter la concentration de l'aliment en valine, isoleucine et leucine à 150% du besoin, 10 jours avant l'abattage, accroît la teneur en glutamate (précurseur de l'arôme umami recherché dans certains pays asiatiques) du filet de poulet de 30% par comparaison avec les filets de poulets alimentés avec un régime à 100% du besoin (Imanari *et al.*, 2008). En augmentant la teneur en lysine du régime à 150% du besoin pendant 10 jours, Watanabe *et al*. (2015) ont aussi accru la teneur en glutamate des filets de poulet de 44% par comparaison avec les filets de poulets alimentés avec un régime à 100% du besoin en lysine.

La teneur en protéines de la viande de volailles est essentiellement influencée par l'âge à l'abattage. Pour une souche lourde de poulet standard, la teneur en protéines des filets s'accroît de 23,5 à 24,9% pour un abattage à 35 ou 63 jours (Baeza *et al.*, 2012). La teneur en protéines du filet de canard mulard s'accroît de 20,6% à 22,4% lorsque les animaux sont abattus à l'âge de 8 ou 13 semaines (Baeza *et al.*, 2000). Dans une comparaison de 3 souches de poulet à croissance rapide, moyenne et lente et abattues aux âges de 6, 8 et 12 semaines, Berri *et al*. (2005b) ont montré que la teneur en protéines des filets était de 23,8, 24,3 et 24,7%, respectivement. Avec la sélection sur la vitesse de croissance, l'âge à l'abattage du poulet standard ne cesse de décroître. Ceci a pour conséquence une augmentation du ratio teneur en eau/teneur en protéines des filets qui selon la législation européenne ne doit pas dépasser 3,40. Hahn *et al*. (2013) ont montré que ce ratio avait progressé pour la production de poulets standards en Allemagne de 3,10 en 1993 à 3,31 en 2012, avec une proportion accrue de filets dépassant la valeur limite autorisée par la législation. L'âge va également impacter la **teneur en collagène** de la viande. Cette teneur est divisée par deux dans le filet de canard de Barbarie entre les âges de 8 et 12 semaines (Baeza *et al.*, 2002). Dans le filet et la cuisse de poulet, elle évolue entre 8,7 et 7,3 mg/g et 16,1 et 17,4 mg/g, respectivement, entre les âges de

8 et 16 semaines (Touraille *et al.*, 1981). Récemment, avec l'apparition de défauts de qualité comme le « white striping » ou le « wooden breast », il a été observé une diminution importante de la teneur en protéines musculaires et une augmentation de la teneur en collagène dans la viande de poulets de souches à vitesse de croissance élevée et présentant de forts rendements en filets (Mazzoni *et al.*, 2015; Mudalal *et al.*, 2014). Enfin, la **teneur en pigments éminiques**, en particulier la myoglobine, augmente avec l'âge. Cette évolution est surtout notable dans les viandes dites rouges. Elle est par exemple multipliée par deux dans le filet de canard de Barbarie entre les âges de 8 et 12 semaines (Baeza *et al.*, 2002). A l'inverse, la sélection pour l'augmentation de la vitesse de croissance et le rendement en filet a eu pour conséquence de diminuer cette teneur, avec des conséquences négatives sur l'indice de rouge des filets de poulet (Berri *et al.*, 2001).

La teneur en matières minérales (calcium, phosphore et potassium essentiellement) de la viande de volailles est de 1,1% (Rabot, 1998). Ce paramètre est peu impacté par l'alimentation et les autres facteurs d'élevage à condition que les apports couvrent les besoins des animaux.

La fraction la plus variable concerne les lipides. **La teneur en lipides** est en moyenne de 1,3% dans le filet et 4,5% dans la cuisse de poulet standard (Rabot, 1998). La viande de dinde et de poulet label est plus maigre (0,8% dans le filet, Jankowski *et al*. (2012) ; Gigaud *et al*. (2011)). Celle de canard est plus grasse (1,5 à 2% dans le filet selon l'espèce (Baeza, 2000). Au sein des lipides, la fraction la plus variable est celle des triglycérides dont la quantité est positivement corrélée avec celle de la teneur en lipides : 0,7% dans le filet et 3% dans la cuisse de poulet (Rabot, 1998), 0,5 à 0,8% dans le filet de canard (Baeza, 2000). La teneur en phospholipides est de 0,6% dans le filet et de 0,8% dans la cuisse de poulet (Rabot, 1998). Dans le filet de canard, cette teneur est de 1,1% (Baeza, 2000). Les viandes dites rouges sont plus riches en phospholipides car elles comportent de nombreuses fibres musculaires oxydatives ou oxydo-glycolytiques dont le diamètre est plus petit que celui des fibres glycolytiques et qui développent donc une surface membranaire plus importante où sont localisés la majorité des phospholipides. La teneur en cholestérol est de 0,05% dans le filet et de 0,09% dans la cuisse de poulet (Rabot, 1998). Elle est comprise entre 0,07 et 0,12% dans le filet de canard (Baeza, 2000). L'alimentation va impacter la teneur en lipides intramusculaires essentiellement par la teneur en énergie des régimes et surtout par le ratio énergie/protéines ou lorsque les apports en acides aminés essentiels (lysine, méthionine) sont inférieurs au besoin pour la croissance. En augmentant la teneur en lipides du régime de 30 ou 90 g/kg, la teneur en lipides du filet de dinde mâle est accrue de 14 et 40% et celle de la cuisse de 27 et 53% par rapport au témoin, parallèlement à une augmentation du poids vif (Salmon et Stevens, 1989). Dans cette même étude, lorsque le ratio énergie/protéines augmente de 65 à 83 KJ/g, la teneur en lipides du filet décroît de 27% et celle de la cuisse de 5%, parallèlement à une diminution du poids vif. Conde-Aguilera *et al*. (2013) ont comparé deux niveaux d'apport en méthionine chez des poulets entre 7 et 42 jours. En réduisant cet apport de 34% par rapport au besoin pour la croissance dans des régimes isoprotéiques et isocaloriques, la teneur en lipides du filet est accrue de 28% à l'âge de 42 jours. Par contre, la source en énergie du régime (glucides ou lipides) n'a pas d'effet sur le niveau d'engraissement intramusculaire du poulet (Baeza *et al.*, 2015a). Bien entendu, la restriction alimentaire a pour effet de diminuer la teneur en lipides intramusculaires, alors que le gavage, pratiqué uniquement chez le canard et l'oie, va multiplier par deux cette teneur (Baeza, 2000 ; Baeza *et al.*, 2013b).

La teneur en lipides de la viande de volailles est également influencée par l'âge, le sexe, le génotype et le système de production. Pour une souche lourde de poulet standard, la teneur en lipides des filets s'accroît de 1,29 à 1,68% pour un abattage à 35 ou 63 jours (Baeza *et al.*, 2012). Chez le canard mulard mâle, la teneur en lipides du filet augmente de 1,79 à 2,74% pour un abattage à 8 ou 13 semaines (Baeza, 2000). Pour un âge donné, les femelles présentent en général un engraissement corporel et une teneur en lipides intramusculaires supérieurs à celui des mâles. Toutefois, l'effet du sexe peut-être plus ou moins prononcé. En comparant différents génotypes de poulets, Tang *et al*. (2009) n'ont pas mis en évidence d'effet du sexe sur la teneur moyenne en lipides du filet et de la cuisse. Dans l'étude de Yang *et al*. (2015), les femelles présentent une teneur en lipides supérieure à celle des mâles, dans le filet (2,78 vs. 1,56%) et la cuisse (11,25 vs. 8,59%), alors que dans l'étude de Baéza *et al*. (2010) l'effet du sexe sur la teneur en lipides n'est significatif que dans la cuisse. Dans ces deux dernières études, les volailles étudiées étaient à croissance lente. Une étude récente menée sur des poulets de type certifié à croissance intermédiaire a montré une teneur en lipides plus faible chez les femelles que chez les mâles (Lessire *et al.*, 2015). En comparant cinq génotypes de poulets présentant des vitesses de croissance différentes et donc des âges à l'abattage différents pour un poids vif à l'abattage de 1,5 à 2 kg, Tang *et al*. (2009) ont montré que la teneur moyenne en lipides des muscles du filet et de la cuisse pouvait varier de 0,96 à 1,42%. En comparant deux génotypes de poulets standards, Petracci *et al*. (2013b) ont montré que celui présentant le plus fort rendement en filets avait une teneur en lipides inférieure. Les races anciennes de poulets présentant des vitesses de croissance très lente sont en général plus grasses que les génotypes commerciaux issus de croisements car elles n'ont pas fait l'objet d'une sélection contre l'engraissement corporel. C'est le cas par exemple de la Géline de Touraine qui présente à l'âge de 84 jours une teneur en lipides dans le filet et dans la cuisse de

1,2 et 10,5%, respectivement alors que pour une souche utilisée en production Label Rouge et élevée dans les mêmes conditions, ces teneurs sont de 0,9 et 7,0%, respectivement (Baeza *et al.*, 2010). Récemment, avec l'apparition de défauts de qualité comme le « white striping » ou le « wooden breast », il a été observé une augmentation de la teneur en lipides dans la viande de poulets de souches à vitesse de croissance élevée et présentant de forts rendements en filets (Mazzoni *et al.*, 2015; Mudalal *et al.*, 2014). Le système de production associe l'effet de plusieurs facteurs. En production Label Rouge, les génotypes utilisés présentent des vitesses de croissance plus lentes que celles des poulets utilisés en production standard et donc des âges à l'abattage plus tardifs (81 jours minimum vs. 35 jours). La concentration en énergie et en protéines des aliments utilisés pour les différentes périodes d'élevage (démarrage, croissance et finition) est moindre que celle des aliments utilisés en production standard. La densité dans les bâtiments est plus faible et les animaux ont accès à un parcours extérieur ce qui leur permet d'avoir une activité physique supérieure et un engraissement abdominal inférieur (Bourin *et al.*, 2015). Une enquête réalisée dans plusieurs abattoirs français et sur différents systèmes de production a montré que la teneur en lipides des filets était de 0,89, 1,07 et 1,31% pour les productions Label Rouge, certifiées et standards, respectivement (Gigaud *et al.*, 2011) ; (Yang *et al.*, 2015) ont élevé des poulets à croissance lente en bâtiment fermé ou avec un accès à un parcours. La teneur en lipides des cuisses est plus élevée pour les poulets élevés en claustration (10,3 vs. 8,5%) alors que la teneur en lipides du filet n'est pas affectée par le système de production (2,1 vs. 1,9%). La diminution de l'engraissement abdominal et intramusculaire a également été observée par Castellini *et al*. (2002) qui ont comparé un élevage de poulets avec accès ou non à un parcours extérieur.

Les acides gras (AG) des lipides totaux de la viande de poulet se composent environ d'un tiers d'acides gras saturés (AGS), d'un tiers d'acides gras mono-insaturés (AGMI) et d'un tiers d'acides gras polyinsaturés (AGPI) (Rabot, 1998). Les AGS sont principalement de l'acide palmitique (2/3) et de l'acide stéarique (1/3). L'acide oléique est l'AGMI majeur (5/6) puis vient l'acide palmitoléique (1/6). Les AGPI majeurs sont l'acide linoléique et l'acide arachidonique. Les lipides totaux des muscles de poulet contiennent également de l'acide linolénique et des AGPI à longue chaîne des séries n-6 et n-3. **Le principal facteur de variation de la composition en AG des lipides totaux est la composition en AG de l'alimentation.** Les huiles de palme et de coprah accroissent les proportions des AG à chaîne courte et saturée ; les graisses animales enrichissent les dépôts lipidiques du poulet en acides palmitique et stéarique. A l'inverse, avec les huiles végétales, ce sont les proportions d'AGPI à 18 atomes de carbone qui augmentent. Les huiles marines, quant à elles, accroissent de façon très significative les proportions des AGPI à longue chaîne de la série n-3 comme illustré par le tableau ci-après (Lessire, 2001; Marion et Woodroof, 1963).

Tableau 2.1.6. Effet de la nature des lipides ingérés sur la composition en acides gras (en % des AG totaux) de la cuisse de poulet (Marion et Woodroof, 1963)

	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:5	C22:5	C22:6
Aliment de base*	19,9	4,7	8,4	27,7	23,6	1,0	0,5	1,0	1,9
+ huile de maïs (6%)	16,2	2,4	6,0	24,7	38,7	1,8	0,8	0,7	0,7
+ suif (6%)	22,1	5,8	10,4	34,5	13,8	1,6	0,3	0,5	1,4
+ huile de maïs (5%) **+ huile de poisson (1%)**	17,4	4,4	5,2	28,7	33,8	1,0	1,0	1,3	1,6
+ suif (5%) **+ huile de poisson (1%)**	22,6	5,3	10,6	29,8	15,3	1,9	1,7	2,5	2,4

*L'aliment de base contient du maïs, du tourteau de soja et de la farine de poisson.

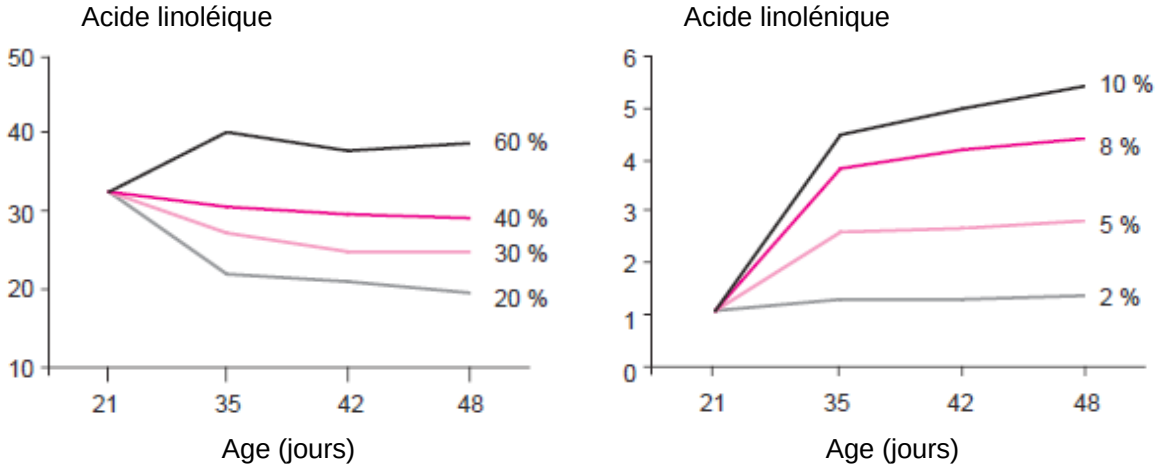
Depuis 2001, le remplacement des matières grasses d'origine animale (suif et saindoux) par des huiles végétales (colza, soja ou lin), dans l'alimentation des volailles, a eu pour effet d'accroitre la proportion d'AGPI dans la viande de volailles. Avant cette date, un critère de démarcation de la qualité nutritionnelle des poulets Label Rouge par rapport aux poulets standards était une proportion d'AGPI dans la viande plus importante (30,9 vs. 27,2% dans les aiguillettes, Girad *et al*. (1993). En effet, l'alimentation des poulets Label Rouge ne contenait que des huiles végétales comme exigé par le cahier des charges, alors que celle des poulets standards contenait une proportion non négligeable de matières grasses d'origine animale. A présent, ce sont les poulets standards qui présentent une viande plus riche en AGPI que les poulets Label Rouge (30,02 vs. 21,21% dans le filet, Chartrin *et al*. (2005a)), du fait d'un apport alimentaire plus important (teneur en lipides des régimes pour

poulets standards plus élevée que celle des régimes pour poulets Label Rouge) et d'une teneur en lipides de la viande plus importante également (1,25 vs. 1,18%, Chartrin *et al*. (2005a)).

Dans les pays occidentaux, l'apport journalier en AG n'est pas satisfaisant car le ratio AG n-6/AG n-3 est voisin de 15 alors que l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) recommande une valeur de 5. Afin d'accroitre l'apport journalier en AG n-3 plusieurs démarches ont été entreprises visant toutes l'augmentation de la teneur en ces AG dans les différents aliments consommés quotidiennement (pain, produits laitiers, viandes, charcuteries, œufs) en évitant des modifications trop importantes et définitives des habitudes alimentaires comme par exemple d'augmenter fortement la consommation de poissons gras au détriment de celle des produits carnés et laitiers. L'enrichissement de la viande fraîche de poulets avec des AG n-3 a donc fait l'objet de nombreuses études. L'utilisation d'huiles de poissons riches en AGPI à longue chaîne est le moyen le plus efficace (Bou *et al.*, 2005 ; Rymer *et al.*, 2010). Les huiles de poisson peuvent être remplacées par des microalgues (Yan et Kim, 2013). Il est possible aussi d'utiliser des huiles de lin ou de colza qui sont riches en acide linolénique, bien que dans ce cas, la proportion des AGPI à longue chaîne déposés dans les muscles reste faible (Lopez-Ferrer *et al.*, 2001a). Baéza *et al*. (2015b) ont montré que l'association de graines de lin extrudées avec des microalgues dans l'aliment de poulets standards permettait d'enrichir la viande en acide linolénique (2,65% des AG totaux) et en AG n-3 à longue chaîne (2,41% des AG totaux) avec un ratio AG n-6/AG n-3 de 3,65 par comparaison avec un régime à base d'huile de soja, riche en AG n-6 (19,16% des AG totaux) et un ratio AG n-6/AG n-3 de 11,52.

Il faut administrer un régime donné pendant au moins deux semaines pour que la composition en AG de la viande soit significativement modifiée comme illustré par la figure 2.1.2 (Gandemer *et al.*, 1999 ; Lessire, 2001; Viau *et al.*, 1999)).

Figure 2.1.2. Cinétique d'incorporation des acides linoléique et linolénique (% AG totaux) dans les triglycérides du filet de poulet en fonction des apports alimentaires en ces acides gras et de l'âge (Gandemer *et al.*, 1999; Viau *et al.*, 1999)



De nombreuses études se sont intéressées également à l'enrichissement des viandes de volailles avec des CLA (conjugated linoleic acids). Il s'agit d'un groupe de 16 isomères de l'acide linoléique qui ont des effets positifs en santé humaine en particulier lors de cancers, d'athérosclérose, d'obésité et de diabète et qui stimuleraient les fonctions immunitaires (Brown et McIntosh, 2003). Les CLA sont des composés naturels retrouvés dans la fraction lipidique des produits issus de ruminants (lait, viande). Du et Ahn (2002) et Sirri *et al*. (Sirri *et al.*, 2003) ont testé chez le poulet différents niveaux d'apports en CLA de 0,25 à 4% dans l'aliment pendant 3 à 5 semaines. Le dépôt de CLA dans la viande (filet et cuisse) augmente avec la teneur croissante en CLA du régime alors que les teneurs en acides oléique, palmitoléique et arachidonique diminuent. Un apport combiné de CLA avec de l'huile de poisson dans l'aliment accroît l'efficacité de dépôt dans les muscles de poulet d'AGPI n-3 à longue chaîne et de CLA par comparaison à un apport unique de CLA ou d'huile de poisson (Royan *et al.*, 2013). Le frein à l'utilisation des CLA est leur coût et leur effet parfois négatif sur les performances de croissance des volailles (Du et Ahn, 2002 ; Sirri *et al.*, 2003).

La source en énergie de l'aliment peut également influencer la composition en AG de la viande de volailles. Un régime riche en glucides va favoriser la lipogenèse hépatique et donc la synthèse d'AGS et d'AGMI, alors qu'un régime riche en lipides va plutôt favoriser le dépôt direct des AG de l'aliment dans les tissus périphériques. Baéza *et al*. (2015a) ont ainsi montré que les muscles de la cuisse et du filet de poulets alimentés avec un régime contenant 8% de lipides et 379 g d'amidon/kg aliment étaient plus riches en AGPI et moins riches en AGS et AGMI que ceux de poulets alimentés avec un régime contenant 2% de

lipides et 514 g d'amidon/kg aliment. Il faut noter que les régimes étaient isoénergétiques et isoprotéiques. Dans le cas le plus extrême du gavage, l'apport journalier en glucides (amidon du maïs) est très élevé. La lipogenèse hépatique est fortement stimulée et en particulier la synthèse des acides palmitoléique et oléique qui vont être déposés ensuite dans les tissus périphériques (tissus adipeux et musculaires). Dans le magret, les proportions d'AGMI et AGPI représentent 50 et 16% des AG totaux, respectivement vs. 36 et 31% dans le filet de canard maigre (Girad *et al.*, 1993).

D'autres facteurs peuvent impacter la composition en AG de la viande de volailles tels que l'âge, le sexe, l'espèce et le génotype, qui vont intervenir de façon indirecte en modulant la teneur en lipides de la viande. Une augmentation de cette teneur se traduira par une augmentation du pourcentage d'AGMI néo-synthétisés au détriment de celui des AGPI et inversement. Par exemple, dans le filet de canard mulard abattu à 8 ou 13 semaines, la proportion en AGMI s'accroît de 29,6 à 33,0% alors que celle en AGPI décroît de 35,5 à 32,1% et que celle en AGS reste stable (35,2 et 34,3% ; Baéza (2000)). Le système d'élevage va surtout intervenir par le biais de l'alimentation et de l'accès ou non à un parcours. Les filets d'oies élevées à l'herbe et supplémentées avec 140 g de maïs par jour de 10 à 24 semaines ont des teneurs en AGS (33,1 vs. 29,9%) et AGPI (21,9 vs. 19,8%) supérieures et une teneur en AGMI (43,7 vs. 49,3%) inférieure à celles des oies élevées en claustration avec un aliment finition de 10 à 14 semaines (Baeza *et al.*, 1998a).

Selon les études, la composition en AG de la viande de volailles peut également varier ou non au cours de la conservation à +4°C ou -20°C (Ali *et al.*, 2007 ; Jahan *et al.*, 2004). La cuisson peut aussi avoir ou pas un effet sur cette composition. Par exemple, Baéza *et al*. (2013a) ont montré que la transformation de filets de poulets en blancs après saumurage-cuisson avait peu d'impact sur leur composition en AG. Il en est de même après une cuisson de 30 min à 80°C à cœur d'un mélange de muscles de dinde broyés (25% filets, 25% cuisses, 50% viande séparée mécaniquement, Ahn *et al*. (1993)). La teneur en CLA des cuisses de poulet est peu modifiée par une cuisson en rôtissoire. Par contre, elle est diminuée lorsque la viande est bouillie ou frite (Franczyk-Zarow *et al.*, 2017). Après une cuisson en rôtissoire de carcasses entières de poulets la composition de la viande est modifiée car les acides gras contenus dans le tissu adipeux sous-cutané vont migrer vers la viande. Il s'agit surtout d'acides gras constitutifs des triglycérides et donc plutôt des AGS et des AGMI (Rabot, 1998). Krempa *et al*. (2019) ont également observé une augmentation des AGMI dans la viande de carcasses de canards col-vert cuites en rôtissoires avec la peau.

La viande de volailles comporte aussi différents **micronutriments** (vitamines, pigments caroténoïdes, oligo-éléments, Tableau 2.1.7) dont la teneur va surtout dépendre de l'apport alimentaire.

Tableau 2.1.7. Teneur en micronutriments de la viande crue de poulet (Favier *et al.*, 1995)

Micronutriments (mg/100 g)	Teneurs
Sodium	76
Magnésium	25
Fer	1
Rétinol (µg)	12
Vitamine D (µg)	0,1
Vitamine E	0,22
Thiamine	0,08
Riboflavine	0,16
Niacine	7,7
Acide pantothénique	1,1
Vitamine B6	0,45
Vitamine B12 (µg)	0,4
Folates (µg)	10

De très nombreuses études ont été réalisées pour enrichir la viande de volailles en **vitamine E** (Sheehy *et al.*, 1991) mais également en **vitamines A et C** (Bartov *et al.*, 1997 ; King *et al.*, 1995 ; Lauridsen *et al.*, 1997). L'efficacité de dépôt de la vitamine E ingérée avec l'aliment dans les muscles peut varier selon l'espèce. Elle est deux fois plus élevée chez le poulet par

comparaison avec la dinde (Gong *et al.*, 2010). L'accès à un parcours favorise l'augmentation de la vitamine E dans la viande de poulets (Michalczuk *et al.*, 2017). Les aliments pour volailles sont souvent supplémentés en **pigments caroténoïdes** afin de colorer en jaune la peau des poulets. Nous avons évoqué précédemment l'effet d'une mutation sur le promoteur du gène BCMO1 sur la capacité du muscle à stocker ces pigments (Le Bihan-Duval *et al.*, 2011). Ces pigments liposolubles peuvent aussi être apportés par différentes matières premières qui rentrent dans la composition des aliments tels que le maïs ou les microalgues. Ils vont également être déposés dans la viande de volailles. Par exemple, les filets et les cuisses de poulets nourris avec un aliment contenant des microalgues riches en AGPI n-3 à longue chaîne ont une teneur en caroténoïdes deux fois plus élevée que ceux de poulets témoins (Kalogeropoulos *et al.*, 2010). L'efficacité de dépôt des pigments caroténoïdes ingérés avec l'aliment varie aussi selon le génotype. L'enrichissement de la viande en différents oligo-éléments tels que le sélénium et le magnésium a aussi été testé. En distribuant des aliments supplémentés avec 4 niveaux croissants de **sélénium** (0, 0,2, 0,4 et 0,6 mg/kg) de 0 à 49 jours à des canards Pékin, Baltic *et al*. (2015) ont montré que la teneur en sélénium augmentait de 0,05 à 0,87 mg/kg dans le filet et de 0,04 à 0,64 mg/kg dans la cuisse. Le sélénium peut être apporté sous différentes formes et ce sont les formes organiques (levures séléniées, séléno-méthionine) qui permettent le dépôt le plus efficace dans les muscles par rapport aux formes minérales (sélénite de sodium ; Briens *et al*. (2013) chez le poulet). Une supplémentation en **zinc** de l'aliment n'augmente pas forcément la teneur en zinc de la viande de volailles (Bou *et al.*, 2005; Bou *et al.*, 2004). Ces différents micronutriments sont surtout utilisés pour leur activité antioxydante.

2.1.2.5. Propriété technologique

La qualité technologique de la viande correspond à son aptitude à la transformation et à la conservation. **L'aptitude à la transformation** va être évaluée par la capacité de rétention en eau en mesurant les pertes en jus lors de la conservation à +4°C ou après décongélation et/ou cuisson et par la détermination du rendement technologique en mesurant la perte de matière après transformation. **La capacité de rétention d'eau dépend en grande partie du pHu de la viande qui impacte la conformation des protéines musculaires et leur fonctionnalité.** Le Bihan-Duval *et al*. (2008) ont estimé des corrélations génétiques de -0,89 et -0,80 entre le pHu d'une part et l'exsudat et les pertes en eau du filet de poulet d'autre part. **L'alimentation va agir sur la capacité de rétention d'eau de façon indirecte en modulant tout d'abord les réserves glycolytiques des muscles avant abattage et donc le pHu de la viande.** Berri *et al*. (2008) ont fait varier la teneur en lysine digestible du régime de finition distribué à des poulets standards. Lorsque cette teneur s'accroît de 0,83 à 1,13%, la perte en jus après 4 jours de stockage à +4°C décroît de 1,10 à 0,87. Jlali *et al*. (2012) ont comparé deux régimes de finition isoénergétiques mais présentant des teneurs en protéines différentes. Les filets des poulets alimentés avec le régime contenant 23% de protéines avaient des pertes en jus après 4 jours de stockage à +4°C supérieures à celles des poulets alimentés avec le régime contenant 17% de protéines (1,30 vs. 1,08%). L'impact de l'aliment sur les caractéristiques du filet dépendait toutefois du type génétique, les animaux sélectionnés pour un engraissement périphérique faible étant plus sensibles aux variations d'apports protéiques. Dans le but de mieux définir les lois de réponse qui régissent les variations de qualité du filet en fonction de l'apport en acides aminés, plusieurs études (Guardia *et al.*, 2014; Lessire *et al.*, 2013) ont mis en évidence qu'au-delà de la quantité de protéines, le profil en acides aminés du régime pouvait influencer le pH ultime de la viande et certains caractères associés (couleur, exsudat). Les résultats montrent qu'un apport excédentaire en acides aminés (+ 10%), conjugué à un apport faible en lysine (0,7-0,8%), favorise la production des viandes avec des pH acides et donc exsudatives. L'hypothèse serait qu'un poulet soumis à un apport en acides aminés excédant ses besoins pour la synthèse protéique et la croissance du muscle utiliserait une partie de ses apports alimentaires à des fins énergétiques, notamment sous forme de glycogène musculaire, expliquant ainsi la diminution de pH observée (Tesseraud *et al.*, 2014). La réponse des animaux serait néanmoins dépendante des apports initiaux en lysine (et donc en protéines brutes) et de la durée d'exposition à ces déséquilibres, qui en modulant la proportion des nutriments utilisés à des fins de synthèse protéique ou à des fins de stockage énergétique vont déterminer les seuils de réponse métabolique des animaux aux variations d'apports en acides aminés. Au-delà du pHu, le degré d'oxydation du muscle peut aussi impacter les propriétés technologiques de la viande. Ainsi L'utilisation de DL-HMTBA (hydroxy-analogue de la méthionine) peut améliorer de manière significative les propriétés fonctionnelles du filet de poulet (exsudat et rendement technologique) en réduisant l'indice d'oxydation musculaire (Mercier *et al.*, 2009).

D'ailleurs, les antioxydants ont un effet sur la capacité de rétention d'eau de la viande. Par exemple, en augmentant la teneur en levures séléniées de l'aliment de 0,15 à 0,60 ppm, Oliveira *et al*. (2014) ont diminué les pertes en jus après cuisson des filets de poulets de 21 à 16%. Dans cette étude, l'apport alimentaire de sélénium sous forme organique était plus efficace pour réduire les pertes en jus après cuisson que l'apport de sélénium sous forme minérale. Par contre, chez la dinde, la supplémentation de l'aliment avec du sélénium à 0,3 à 0,5 mg/kg n'a pas eu d'effet sur les pertes en jus des filets stockés

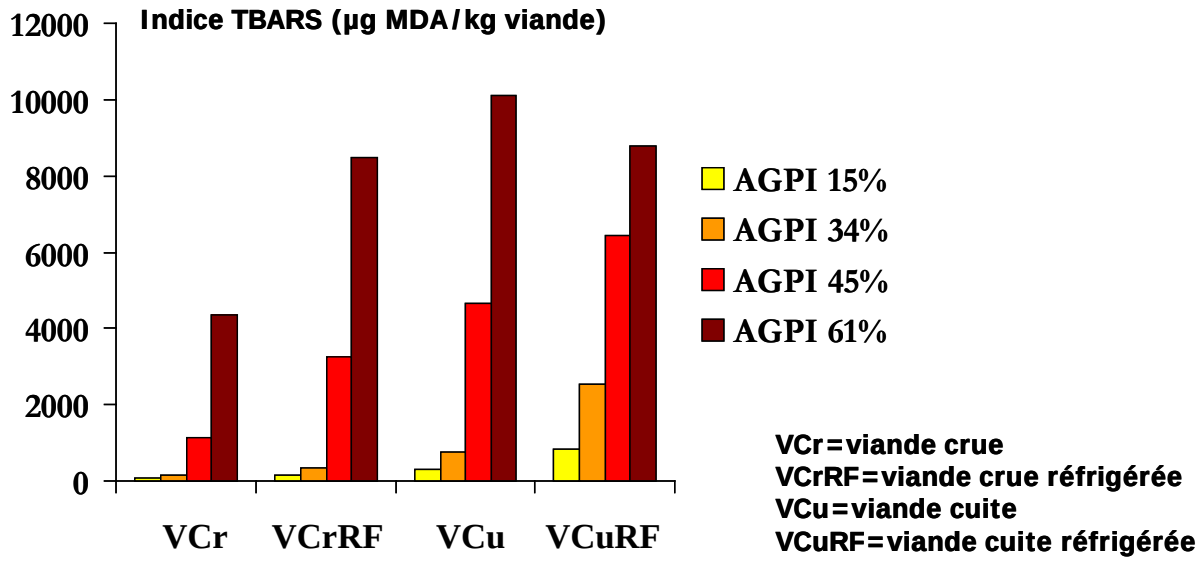
48 h à +4°C (Juniper *et al.*, 2011). L'apport de 40 ou 80 ppm de zinc dans l'aliment permet également d'accroître la capacité de rétention d'eau des filets de poulets par rapport au témoin non supplémenté (63-66 vs. 56% ; Salim *et al*. (2011)).

La capacité de rétention d'eau peut aussi être influencée par l'âge, le génotype, les conditions de pré-abattage (stress thermique essentiellement) et l'évolution post-mortem du pH de la viande. Pour des poulets standards lourds abattus entre les âges de 35 et 63 jours, les pertes en jus après 4 jours de stockage à +4°C et après cuisson diminuent de 2,02 à 1% et de 18,8 à 17,4%, respectivement (Baeza *et al.*, 2012). A l'inverse, pour des filets de canards de Barbarie abattus entre les âges de 8 et 15 semaines, les pertes en jus après 24 h de stockage à +4°C augmentent de 0,68 à 1,62% (Baeza *et al.*, 1998b). Pour des filets de canards mulards abattus entre 8 et 13 semaines, les pertes en jus après 24 h de stockage à +4°C ne sont pas affectées par l'âge (Baeza, 2000). Les pertes en jus après 2 jours de stockage à +4°C sont supérieures dans les filets de poulets Label Rouge comparés aux filets des poulets standards (1,64 vs. 1,24% ; (Berri *et al.*, 2005b)). En cohérence avec ce résultat, le rendement technologique après saumurage-cuisson des filets est supérieur chez les poulets standards comparés aux poulets Label Rouge (106,8 vs. 100,0%). En comparant deux lignées de poulets sélectionnés de façon divergente sur la proportion de gras abdominal par rapport au poids vif (4,66 vs. 2,09%) et présentant des différences de pHu (5,79 vs. 5,66 pour les lignées maigre et grasse, respectivement), Sibut *et al*. (2008) ont montré que les filets des poulets gras avaient des pertes en jus après 4 jours de stockage à +4°C légèrement supérieures à celles des poulets maigres (1,35 vs. 1,12%). Une lignée de poulet sélectionnée pour un pHu élevé (6,09 en moyenne) dans le filet a des pertes en jus, après 5 jours de conservation à +4°C ou après cuisson, moins élevées que la lignée sélectionné pour un pHu plus acide (2,20 vs. 3,80% et 10,2 vs. 11,9%, respectivement ; Alnahhas *et al*. (2014)). En cohérence avec ces différences, le rendement technologique après saumurage-cuisson est supérieur pour la lignée à pHu élevé (86,6 vs. 80,5%). Les filets de poulets, présentant le défaut « white striping » de façon prononcée, ont des pertes à la cuisson, supérieures à celle des filets normaux (26,7 vs. 21,3% ; Petracci *et al*. (2013a)). Ceux atteints de « wooden breast » ont des pertes en jus après stockage au froid mais surtout après cuisson supérieures à celles des filets normaux (1,19 vs. 0,93% et 28,0 vs. 21,6%, respectivement ; Mudalal *et al*. (2015)). La prise de marinade et le rendement technologique sont également beaucoup plus faibles pour les filets atteints de « wooden breast » (6,94 vs. 13,15% et 87,3 vs. 94,5%, respectivement). En comparant l'exposition de poulets à différentes températures lors du transport de pré-abattage, Dadgar *et al*. (2011) ont montré que les températures négatives (-14 à -17°C) impactaient négativement les réserves en glycogène musculaire et de ce fait augmentaient le pHu et réduisaient les pertes à la cuisson des filets (10,52 vs. 13,45%) par comparaison avec des températures positives (20 à 22°C). Les pertes en jus après 48 h de stockage à +4°C des filets de poulets exposés à 33°C pendant 2 h avant abattage sont supérieures à celles des poulets exposés à 21°C (3,7 vs. 2,0% ; Sandercock *et al*. (1999)). Enfin, une vitesse de chute du pH post mortem trop rapide impacte négativement le rendement technologique. Des filets de dinde présentant des pH mesurés 20 min après abattage de 5,90 ou 6,55 ont des rendements technologiques après saumurage-cuisson de 97,4 et 98,3%, respectivement (Fernandez *et al.*, 2002).

L'aptitude à la conservation est estimée par la sensibilité à l'oxydation des lipides et des protéines de la viande. Les cuisses qui sont plus riches en lipides sont plus sensibles à l'oxydation que les filets (Kralik *et al.*, 2012; Mercier *et al.*, 1998). La viande de dinde est plus sensible à l'oxydation que la viande de poulet et de canard (Gong *et al.*, 2010). **L'aptitude à la conservation est fortement influencée par l'alimentation** qui va impacter la teneur en lipides, en AGPI et en antioxydants de la viande. **Elle dépend aussi des modalités de conservation**. Cortinas *et al*. (2005) ont comparé 4 niveaux d'AGPI dans les aliments (15, 34, 45 et 61%) et 4 modalités de conservation des cuisses de poulets (viande crue, viande crue réfrigérée 3 jours à +4°C, viande cuite et viande cuite réfrigérée 2 mois à +4°C). Plus la teneur en AGPI de la viande est élevée, plus la sensibilité à l'oxydation est importante (Figure 3). L'indice TBARS s'accroît avec la durée de conservation de la viande à +4°C. La cuisson favorise aussi l'oxydation (Figure 3). Des filets de poulets emballés sous vide et cuits sont plus sensibles à l'oxydation lors d'une conservation à +4°C que des filets de poulets stockés crûs puis cuits sous vide à l'issue de la période de stockage (Hong *et al.*, 2015). Jankowski *et al*. (2012) ont comparé trois huiles différentes dans l'aliment (soja, colza et lin). Plus le rapport AG n-6/n-3 dans l'aliment est faible, plus l'indice TBARS dans les filets de dinde est élevé (17,07 vs. 15,64 et 10,91 nmol/g pour les régimes à base d'huile de lin, colza et soja, respectivement). Un stockage à -20°C de filets de dindes pendant 4 mois favorise fortement l'oxydation des lipides en particulier pour le groupe alimenté avec l'huile de lin pour lequel l'indice TBARS est multiplié par 4,7 par comparaison avec la viande non congelée. L'utilisation d'huile de lin dans l'aliment favorise aussi l'oxydation des protéines dans les cuisses de poulets (Kralik *et al.*, 2012). L'incorporation de microalgues dans l'aliment avec une teneur de 2% accroît la sensibilité à l'oxydation des filets de poulets stockés 6 jours à +4°C puis cuits par comparaison avec les filets de poulets alimentés avec un régime contenant des huiles de soja et de palme (1,79 vs. 0,49 mg équivalent MDA/kg viande ; Baéza *et al*. (2015b)). Mercier *et al*. (1998) ont également montré que l'oxydation des protéines était plus élevée dans le muscle *Sartorius* de cuisses de dindes alimentées avec un régime contenant de l'huile de soja par comparaison avec des dindes alimentées avec un régime contenant du suif. Le système de production

peut aussi avoir un impact. L'indice TBARS du filet et de la cuisse de poulets élevés en conditions bio est plus élevé que celui mesuré chez les poulets élevés en conditions standards alors que pour la teneur en lipides c'est l'inverse qui est observé (Castellini *et al.*, 2002).

Figure 2.1.3. Effet de la teneur en AGPI de l'aliment sur la sensibilité à l'oxydation des cuisses de poulets (Cortinas *et al.*, 2005)



Le pH peut aussi avoir un effet sur la sensibilité à l'oxydation de la viande. Plus une viande est acide, plus le risque d'oxydation est élevé. Dans la lignée de poulets sélectionnée pour un pHu acide, l'indice TBARS des filets conservés 8 jours à +4°C est supérieur à celui mesuré dans les filets de poulets de la lignée sélectionnée pour un pHu élevé (0,65 vs. 0,50 mg d'équivalent MDA/kg viande ; Alnahhas *et al*. (2015)).

L'utilisation d'antioxydants dans l'aliment permet de limiter la sensibilité à l'oxydation de la viande. Une supplémentation de l'aliment avec 400 mg de vitamine E/kg permet de diviser par 2 à 3 la valeur de l'indice TBARS mesuré dans les muscles *Pectoralis major* et *Sartorius* de dindes conservés à +4°C pendant 1, 3 ou 9 jours (Mercier *et al.*, 1998). Chez le poulet une supplémentation avec 200 mg de vitamine E/kg est suffisante. Les vitamines A et C n'ont pas le même pouvoir antioxydant (Bartov *et al.*, 1997; King *et al.*, 1995). La supplémentation en vitamine E permet aussi de limiter la formation de produits d'oxydation du cholestérol. Après cuisson de viande de poulet stockée ensuite 12 jours à +4°C, cette réduction est de 42 et 75% pour les filets et 50 et 72% pour les cuisses lorsque la supplémentation en vitamine E est de 200 ou 800 mg/kg par comparaison avec un régime témoin supplémenté avec 20 mg de vitamine E/kg (Galvin *et al.*, 1998). L'effet antioxydant de la vitamine E peut être accru lors d'une association avec d'autres composés tels que l'huile essentielle d'origan (Botsoglou *et al.*, 2003). La conservation de la viande de poulet placée sous vide dans un emballage composé de bio-polymères avec des molécules antioxydantes peut également limiter les risques d'oxydation. Ainsi Sogut *et al*. (2018) ont conservé à +4°C des filets de poulet emballés sous vide avec un bio polymère de chitosane associé à différentes concentrations d'extraits de pépins de raisin (5, 10 et 15%). Le taux d'incorporation de 15% a inhibé l'oxydation des filets après 15 jours de stockage.

2.1.2.6. Propriété d'usage

La proportion de volailles consommées sous forme découpée ou transformée ne cesse de s'accroître en particulier pour la production standard pour des raisons de prix. Les morceaux découpés (cuisses, pilons, manchons, filets) se prêtent facilement à la présentation en portions largement utilisées dans la RHD (Restauration Hors Domicile) et à un mode de cuisson rapide. Une étude, réalisée au Canada en 1999, a montré que la qualité d'usage (variété des modes de cuisson et des recettes) était le premier critère pris en compte pour l'achat de viande de poulet (Latter-Dubois J., 2000). De plus, la viande de volailles peut être facilement conservée fraîche ou congelée.

2.1.2.7. Propriété d'image

La viande de volailles est globalement bien perçue par les consommateurs pour sa teneur en protéines élevée, sa faible teneur en lipides et la proportion importante d'acides gras insaturés (environ 65% des acides gras totaux). Sur le plan gustatif, le consommateur dispose d'un large choix de viandes rouges (cuisses, filets de canards) ou blanches (filets de dindes et poulets) de tendreté et flaveur différentes (poulet standard, poulet label rouge). Enfin, elle n'est l'objet d'aucun interdit religieux. Néanmoins, ces points positifs sont contrebalancés par des critiques de plus en plus violentes du mode de production, le système standard restant le modèle majoritaire dans tous les pays producteurs. Les critiques peuvent être classées en 4 catégories : l'impact environnemental, la condition animale, le risque sanitaire et l'organisation économique et sociale de l'élevage (Magdelaine *et al.*, 2018).

Les débats liés à l'**environnement** concernent les pollutions engendrées par les élevages, et plus particulièrement par les rejets des animaux (gaz ou déjections). Les rejets gazeux (méthane et carbone) contribuent au phénomène de réchauffement climatique, tandis que les fumiers et les lisiers peuvent polluer les sols et l'eau lorsqu'ils sont épandus en excès. L'activité d'élevage en elle-même est consommatrice de ressources (végétaux et eau pour l'alimentation des animaux, le nettoyage des locaux, énergie pour les bâtiments) qui pourraient être directement utilisées par l'homme. Plus localement, des conflits concernent la production de nuisances (odeurs, bruits, modifications paysagères). Les filières avicoles essaient de répondre à ces critiques en mettant en place différentes solutions. Pour limiter les déjections, l'efficacité alimentaire des animaux a été améliorée par la sélection génétique (De Verdal *et al.*, 2011) et par la supplémentation des aliments avec des enzymes (phytases, carbohydrases, protéases) favorisant la digestion et l'absorption des nutriments (Beckers et Piron, 2009). Les plans d'épandage des fumiers et lisiers sont définis en tenant compte des normes Corpen (Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement) qui sont revues régulièrement. L'alimentation des volailles utilise de nombreux coproduits de l'industrie agro-alimentaire qui ne pourraient pas être valorisés pour l'alimentation humaine tels que les tourteaux issus de la production d'huiles végétales à partir de graines oléagineuses ou les drèches de blé et maïs issues de la production de bioéthanol ou du brassage. Pour limiter les odeurs, les éleveurs peuvent utiliser des additifs mis dans les litières ou les fosses à lisier ou couvrir ces dernières. Il existe également des recommandations et une réglementation concernant la mise en œuvre de l'épandage de matières fertilisantes sur les sols (Gaillot *et al.*, 2015). L'impact environnemental des productions animales a fait l'objet de plusieurs études d'analyse du cycle de vie (Aubin, 2014). L'alimentation pouvant représenter 30 à 95% des impacts environnementaux des produits animaux en sortie de ferme, une méthodologie de formulation multi objectif a été développée pour produire des éco-aliments à impacts réduits et à prix maîtrisé (Wilfart *et al.*, 2018). Seguin *et al.* (2013 ; Seguin *et al.*) ont évalué les impacts environnementaux liés à la production d'aliments pour poulets biologiques en comparant deux scenarii, le premier reposant sur l'importation des matières premières d'origine biologique et le deuxième sur la production locale de ces matières premières. La production locale permet de réduire d'environ 10% la consommation d'énergie et l'impact potentiel sur le changement climatique. En revanche, l'impact potentiel sur l'acidification reste stable et ceux portant sur l'eutrophisation, l'utilisation de l'eau et l'occupation des terres augmentent respectivement de 8, 24 et 12%. Ces analyses permettent de dresser un bilan à un instant donné et de mettre en évidence des leviers pour réduire les impacts environnementaux afin d'inscrire les filières dans des démarches de progrès qui sont ensuite déclinées à tous les maillons de la production. D'autres solutions passent par exemple par le renouvellement du parc de bâtiments d'élevage avec une meilleure isolation, l'utilisation d'échangeurs récupérateurs de chaleur et d'éclairage à basse consommation pour économiser l'énergie voire la méthanisation des fumiers et lisiers. Plus en aval dans les filières, le projet ACYDIA a permis de générer trois niveaux de base de données pour réaliser des analyses de cycle de vie dans les industries agro-alimentaires et aider les industriels à mettre en place des démarches d'écoconception et l'affichage environnemental des produits[4].

Les débats concernant le **traitement des animaux** dans les élevages, depuis leurs conditions de logement (élevage en bâtiment ou en plein air) jusqu'aux manipulations effectuées par le couvoir, l'éleveur ou l'abattoir (sexage, épointage, dégriffage, castration, collecte de sperme et insémination artificielle, ramassage, accrochage sur la chaîne d'abattage, étourdissement et saignée) ne cessent de s'amplifier. La définition du bien-être animal et ses méthodes d'évaluation sont aussi régulièrement mises en cause. Plus récemment, c'est l'éthique même de l'exploitation animale qui est questionnée. Plus généralement, le système d'élevage intensif est assimilé par de nombreuses associations à un procédé industriel. Face à ces critiques, les filières mettent en place différentes réponses (Roguet *et al.*, 2018). En partenariat avec des organisations de protection animale, un distributeur a par exemple créé, fin 2018, en France, un étiquetage sur le bien-être animal. Cet étiquetage s'appuie sur un référentiel comprenant 230 critères de bien-être animal prenant en compte toutes les étapes de

[4] https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/fiche_bilan2016_054.pdf

la vie de l'animal, de l'éclosion à l'abattage. Trois groupements de production de volailles ont rejoint cette démarche début 2019. Désormais, 10% de l'ensemble des poulets produits en France sont concernés par cet étiquetage. Un outil d'évaluation du bien-être animal en élevage, la méthode EBENE, a également été développé pour et par les filières avicoles avec une application numérique sur smartphone[5]. Cette méthode s'appuie en partie sur les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche européen « Welfare Quality » (Veissier *et al.*, 2005).

L'utilisation de souches performantes (vitesse de croissance rapide, rendement en viande élevé) se traduit par une plus grande sensibilité des animaux vis-à-vis des pathologies, des aléas climatiques (coup de chaleur) et une mortalité en élevage plus importante supposant un recours aux intrants médicamenteux plus importants. Cependant, **l'emploi d'antibiotiques** sur les animaux d'élevage pose la question de l'impact sur la santé humaine de leurs éventuels résidus dans la viande et du développement de résistances microbiennes à ces traitements. Par ailleurs, les évènements ponctuels d'épizooties et de zoonoses interrogent la façon dont le risque sanitaire est géré en élevage comme par exemple la grippe aviaire en 2006 puis 2015-2017. Il faut rappeler que l'utilisation des antibiotiques dans l'alimentation comme facteurs de croissance a été interdite dans l'UE depuis 2006. Depuis 2012, une réduction de l'usage des antibiotiques lors de pathologies avérées a également été mise en œuvre et de nombreuses études sont conduites pour trouver des alternatives à ces molécules. Le dernier rapport de l'Anses sur le suivi des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques en France en 2017 révèle que le niveau d'exposition des volailles aux antibiotiques a diminué de 21,3% depuis 1999 (Anses, 2018d). Un réseau européen (DISARM) visant à promouvoir une utilisation responsable des antibiotiques en élevage a été lancé début 2019[6]. La réduction du recours aux antibiotiques a été accompagnée par le développement de produits alternatifs (probiotiques, pré biotiques, phytothérapie, etc. ; Ducrot *et al*. (2017)).

Ces différents volets sont abordés dans les approches de **durabilité des filières** pour lesquelles des outils ont été générés tels que AVIBIO, IDEA, DIAMOND, OVALI et qui permettent d'évaluer les trois dimensions de la durabilité au niveau de la filière, de l'exploitation ou de l'atelier (Bouvarel et Fortun-Lamothe, 2013 ; Pottiez *et al.*, 2013 ; Protino *et al.*, 2015). Le projet ANR ACYDU a permis d'évaluer la durabilité de trois filières agro-alimentaires dont l'IGP Foie Gras du Sud-Ouest (Farrant *et al.*, 2018). Les groupements de production se sont approprié ces outils pour les mettre en œuvre et évaluer chaque année les progrès réalisés sur les différents piliers de la durabilité (Magnin *et al.*, 2013). Protino *et al*. (2013) ont analysé au travers de deux groupes de consommateurs, les critères fondant leurs choix lors de l'achat de viande de poulet et d'appréhender leur représentation du développement durable. Il ressort de cette étude que le consommateur est réticent à payer un « surprix » pour encourager des produits « durables », notion mal comprise. Il reconnaît, en revanche, la pertinence de l'enjeu et attend des propositions de la part de la filière pour garantir un approvisionnement national dans des conditions satisfaisantes. Afin de faire du développement durable un outil efficace pour concevoir un avenir viable, vivable et équitable, les instances dirigeantes et les filières de production ont la responsabilité d'orienter les comportements des citoyens, à la fois à travers l'offre de produits mais aussi la communication institutionnelle. De cette manière, les besoins pragmatiques des consommateurs cèderont la place à des valeurs profitables à l'ensemble de la société. Le défi consiste à faire en sorte que l'engagement des citoyens envers le développement durable soit perçu non plus comme une contrainte, mais comme une source de bénéfices en matière d'emploi, de santé, de qualité des produits et d'environnement.

Les productions alternatives ont été créées pour répondre aux attentes des consommateurs sur les aspects organoleptiques (Label Rouge), bien-être animal (densité, accès à un parcours, taille des élevages, enrichissement du milieu, vitesse de croissance), santé (bio, démarche « bleu, blanc, cœur ») et traçabilité de la production (IGP, AOC, circuits courts et vente directe). Toutefois, une enquête récente réalisée en Allemagne a montré que le grand public n'est pas toujours vraiment informé des modifications des pratiques d'élevage telles que l'abandon de la cage individuelle pour les poules pondeuses et conservent une image plutôt négative de la production de volailles qualifiée d'industrielle (Sonntag *et al.*, 2019). Aux USA, Adams et Salois (2010) ont mis en évidence un engouement des consommateurs, depuis les années 2000, pour les filières de production locale au détriment des filières bios jugées à présent trop concentrées économiquement sur un petit nombre de distributeurs : 80% des produits bios commercialisés par 2 distributeurs. Une enquête réalisée en 2015 aux USA a montré que les filets de poulet produits sous label de qualité sont jugés plus acceptables et de qualité supérieure lorsque les consommateurs connaissent et ont confiance dans ces labels (Samant et Seo, 2016). Toutefois la création de nouveaux labels doit être contrôlée par les pouvoirs publics afin que les revendications indiquées sur les produits soient parfaitement définies et ne créent pas de la confusion pour les consommateurs comme par exemple le label « élevés sans antibiotiques » introduit

[5] https://www.itavi.asso.fr/content/protocole-ebene-guide-pour-les-utilisateurs

[6] http://www.acta.asso.fr/fileadmin/ressources/Europe/Communique_presse_projet_europeen_DISARM_040319.pdf

par les compagnies Tyson et Perdue aux USA en 2007 (Bowman *et al.*, 2016). Néanmoins, le contrôle et la mise en place de règlementation ne doivent pas intervenir trop tôt pour éviter de freiner l'innovation.

2.1.3. Produits transformés

Les produits transformés à base de viande de volaille peuvent être classés en 4 grandes catégories :

- Produits panés (cordons bleus, escalopes à la viennoise, nuggets) ;
- Charcuteries (jambons, pâtés et terrines, rillettes, boudin blanc, saucisses et saucissons, galantine) ;
- Produits élaborés saumurés, marinés ou crus (découpes, brochettes, produits hachés et farcis) ;
- Produits cuits (confits, rôtis).

Ces produits sont parfaitement définis et décrits dans la note technique n°B1-19-08 élaborée par le groupe d'étude des marchés de restauration collective et de nutrition (Groupe d'étude des marchés de restauration collective et de nutrition (GEMRCN), 2008). Ils sont élaborés en utilisant un grand nombre d'ingrédients tels que l'eau, des sels, des épices et des agents conservateurs et texturant (Barbut, 2015).

L'**eau** est couramment utilisée pour compenser les pertes en jus au cours de la cuisson. Elle accroît la jutosité et réduit la teneur en lipides des produits. Plusieurs **sels** peuvent être utilisés : chlorure de sodium, phosphates, nitrites, nitrates, sodium ascorbate et sodium erythorbate. Ils agissent sur la flaveur, la solubilisation des protéines, le pouvoir de rétention en eau de la viande et ils ont un rôle antimicrobien et antioxydant. Les **épices** sont utilisés pour leur action sur la flaveur et la couleur (exemple : le paprika) des produits. Ils ont également des propriétés antioxydantes et antimicrobiennes (exemple : le romarin). Il est possible aussi d'utiliser des **arômes**, des **agents sucrant et brunissant**, des **antioxydants**, des **ferments**, des **inhibiteurs de moisissures**, des **acidifiants**, des **enzymes** et des **gélifiants**. Les principaux gélifiants sont dérivés du lait, des protéines végétales (soja, pois) et des protéines animales (collagène, plasma sanguin). Les autres agents texturant sont des sucres complexes (exemple : amidon de blé ou de maïs) ou des gommes hydrocolloïdes (alginate, carragénine). Les **produits** peuvent également être **fumés** de façon naturelle ou en utilisant des formulations liquides.

Les produits transformés utilisent les propriétés gélifiantes et liantes des protéines et les propriétés liantes et émulsifiantes des lipides de la viande. Ils peuvent être enveloppés dans une matrice naturelle (boyaux, structure de collagène) ou synthétique (cellulose, plastique).

Les produits à base de viande de volailles peuvent faire l'objet de critiques relayées par la presse grand public :

Les **kebabs** sont riches en graisse, en sel et en acides gras trans[7]. La viande laissée longtemps à température ambiante puis cuite, chauffée, réchauffée peut être plus facilement contaminée par des micro-organismes pathogènes[8]. La majorité des points de vente se fournit chez des grossistes en broches surgelées. La viande utilisée est 100% dinde, 100% veau ou des mixtes, dinde-veau, parfois bœuf mais les espèces animales ne sont pas toujours annoncées[9].

Une enquête du magazine 60 millions de consommateurs révèle que la panure peut représenter entre 18 et 25% du poids total des **cordons bleus**[10]. Ils peuvent contenir des arômes de synthèse, des fibres et des protéines végétales pour améliorer leur texture et leur teneur protidique. Trois produits sur douze présentaient de la peau de volaille dans leurs ingrédients. Des plumes, des fragments d'os, de tissus cartilagineux et des tissus lymphoïdes peuvent se retrouver dans la farce.

Les **nuggets** représentent un moyen de valoriser de la viande qui ne serait pas commercialisée autrement[11]. Les additifs sont légion dans ces produits. Les nuggets sont très gras et riches en sel. Ils contiennent de la chair comprenant pour moitié du muscle et pour autre moitié de la peau, du gras, d'autres morceaux issus de la carcasse, des liants, des conservateurs, des exhausteurs de goûts et des arômes artificiels[12].

---

[7] http://news.bbc.co.uk/ 2/hi/uk_news/magazine/7841890.stm

[8] https://www.sciencesetavenir.fr/nutrition/aliments/le-kebab-est-il-un-plaisir-avouable_____30197 ; http://www.2012un-nouveau-paradigme.com/2015/11/ces-substances-que-nous-cache-le-kebab.html

[9] http://www.2012un-nouveau-paradigme. com/2015/11/ces-substances-que-nous-cache-le-kebab.html

[10] https://www.medisite.fr /a-la-une-que-contiennent-vraiment-les-cordonsbleus.684641.2035.html

[11] (https://reporterre.net/Vous-mangez-des-nuggetsVraiment-Voici-ce-qu-ils-contiennent)

[12] (http://www.natura-sciences.com/sante/ recette-nuggets-poulet603.html).

Le **blanc de poulet** est considéré comme peu calorique, riche en protéines et pauvre en glucides. Sa teneur en sel peut être réduite de 25% par comparaison avec une fabrication de jambon traditionnel[13].

La littérature scientifique concerne surtout les effets des recettes, des procédés industriels et de la cuisson sur la qualité des produits transformés à base de viande de volailles. Elle comprend également quelques études en rapport avec des préoccupations de santé des consommateurs telles que l'offre de produits sans gluten ou à teneurs réduites en sel et en lipides. Les aspects relatifs à la qualité microbiologique des produits transformés sont nombreux mais ils sont traités dans le paragraphe concernant la qualité sanitaire des produits.

2.1.3.1. Caractéristiques générales

Les **nuggets** sont riches en AGS et en sel. Une portion journalière de nuggets peut représenter jusqu'à 49% du besoin journalier en sel d'une personne adulte (Albuquerque *et al.*, 2016). Une analyse histologique de nuggets a mis en évidence que l'émulsion de viande contient en fait 40-50% de muscle, le reste étant de la graisse, des nerfs, des vaisseaux sanguins, de l'épithélium de peau ou de viscères et des spicules osseux (de Shazo *et al.*, 2013). Kayisoglu *et al*. (2003) ont analysé la composition chimique de **kebabs** de poulets crûs et cuits commercialisés en Turquie. La cuisson accroît la teneur en protéines (27,89 vs. 19,80%), en sel (1,66 vs. 1,12%) et en minéraux (2,37 vs. 1,91%) alors que la teneur en lipides diminue (12,81 vs. 15,99). Panozzo *et al*. (2015) ont analysé la qualité nutritionnelle de kebabs commercialisés dans le nord de l'Italie contenant de la viande de poulet et/ou de dinde. De leur étude, il ressort que la recette est très standardisée. Les différences observées pour l'apport en carbohydrates dépendent uniquement de la quantité de pain utilisée. Un kebab couvre 45 et 36% du besoin quotidien en énergie, 95,7 et 82,1% du besoin en protéines et 42,5 et 33,4% du besoin en AGS pour une femme et un homme adulte, respectivement et 85,5% du besoin en sel. Vazgecer *et al*. (2004) ont également analysé la composition chimique de kebabs de poulet commercialisés en Turquie qui contiennent 26% de protéines, 21% de lipides et 12% de collagène.

2.1.3.2. Effets des recettes et procédés

Les recettes et les procédés pour préparer les produits à base de viande de volailles peuvent être très variables. Gokce *et al*. (2016) ont testé l'utilisation de différentes farines de céréales et légumes pour fabriquer des **nuggets** de poulet. Les farines de blé et maïs permettent d'obtenir les meilleurs rendements après cuisson. La farine de seigle diminue leur tendreté. L'incorporation (5 à 15 g) de blanc d'œuf et de graisse diminue la fermeté des nuggets et celle de son de blé produit l'effet inverse (Pathera *et al.*, 2017b). L'utilisation de peau de poulet et de son de blé lors de la fabrication de nuggets permet aussi d'accroître leur rendement en cuisson et leur fermeté (Kim *et al.*, 2015). L'incorporation de protéines végétales (gluten de blé, soja) permet de réduire le coût de production des nuggets. Lorsque ce taux d'incorporation atteint 30% pour les protéines de soja et 40% pour les protéines de blé, la flaveur des nuggets est altérée (Yeater *et al.*, 2017). Il est possible d'incorporer conjointement des farines d'arachide (2,5%) et de niébé (type d'haricot) fermenté (2,5%) dans la préparation de nuggets de poulet sans trop modifier leur qualité sensorielle (Prinyawiwatkul *et al.*, 1997). Par contre, les teneurs en lipides et protéines des nuggets sont diminuées. Lors de la préparation de nuggets, Perlo *et al*. (2006) ont montré qu'il était possible d'incorporer 40% de viande de poulet séparée mécaniquement et lavée avec une solution de NaCl (0,1 M) ce qui permet de retirer une grande partie des pigments héminiques et de la graisse sans modifier notablement la composition chimique et la qualité sensorielle des produits. Tournour *et al*. (2017) recommandent de ne pas dépasser 15% d'incorporation de viande de poulet séparée mécaniquement pour ne pas altérer la qualité des nuggets et de rajouter un extrait de marc de raisin (120 mg/kg) pour limiter leur sensibilité à l'oxydation. Il est possible d'enrichir les nuggets en AG n-3 en incorporant directement dans la préparation de l'huile de poisson micro encapsulée ce qui limite les risques d'oxydation lors de la conservation à +4°C ou -20°C des nuggets précuits (Jimenez-Martin *et al.*, 2016). L'enrichissement préalable de la viande en vitamine E et/ou acide α-lipoique (antioxydants) grâce à l'alimentation du poulet permet de diminuer la sensibilité à l'oxydation de nuggets fabriqués avec des cuisses de poulet, cuits puis conservés à +4°C pendant 45 jours (Arshad *et al.*, 2017). Il est possible également d'ajouter un antioxydant directement dans la préparation de nuggets. Dashti *et al*. (2015) ont ainsi montré l'intérêt d'incorporer de l'huile essentielle de thym dans des nuggets pour stabiliser leur conservation pendant plusieurs mois à -20°C sans effet délétère sur leur qualité sensorielle. Kumar et Tanwar (Kumar et Tanwar; b) ont utilisé de la poudre de clou de girofle et des graines de moutarde broyées pour diminuer la sensibilité à l'oxydation de nuggets de poulet conservés pendant 15 jours à +4°C. L'incorporation de graines de moutarde broyées a permis aussi d'accroître la stabilité de l'émulsion de viande servant à la préparation des nuggets et le rendement après cuisson (Kumar et Tanwar, 2011a).

[13] https://www.topsante.com/nutrition-et-recettes/bien-choisir-ses-aliments/nutrition-zoom-sur-le-jambon-de-poulet-10765

L'addition de transglutaminase et de caséinate de sodium aux fines tranches de viande permet d'accroître leur cohésion dans le montage des broches de **kebabs** (Kilic, 2003). Le conditionnement sous vide permet de limiter la sensibilité à l'oxydation de kebabs produits avec de la viande de poulet et additionnés ou non de viande de dinde séparée mécaniquement et/ou d'acide ascorbique lors de leur conservation à +4°C ou -20°C (Kilic et Richards, 2003). Il est possible de conserver des kebabs de dinde à +4°C pendant 12 jours sans altération notable de leur qualité sensorielle (Kayaardi *et al.*, 2006). Modi *et al*. (2007) ont étudié la possibilité de stocker à température ambiante (27°C) sur une longue période (6 mois) des préparations de poulet déshydratées (2-3 h à 60°C) emballées sous vide dans des sacs en polyester métallisé pour réaliser ensuite des kebabs. Avec la durée de stockage, la quantité d'AG libres et l'indice de peroxydation augmentent mais cela n'a pas d'effet sur les notes d'analyse sensorielle des kebabs préparés avec le mix réhydraté et frit.

Nieto *et al*. (2017) ont montré qu'il était possible de remplacer une partie des graisses animales par de l'huile d'olive ou des noix permettant d'enrichir en AGPI des **saucisses** de poulet en ajoutant également un extrait d'hydroxytyrosol pour limiter les risques d'oxydation lors de la conservation au froid. Bolger *et al*. (2017) ont testé de même un enrichissement avec de l'huile de lin et de la vitamine E. Cependant, l'addition d'huile de lin (2%) a un effet négatif sur la flaveur des saucisses cuites. Dans l'étude de Stajic *et al*. (2018), l'effet délétère de l'huile de lin sur la qualité sensorielle des saucisses cuites était obtenu avec un taux d'incorporation de 4% dans la formule qui différait de celle de l'étude précédente. L'incorporation de l'huile de lin sous forme encapsulée a un effet négatif sur les caractéristiques physiques des saucisses (Bolger *et al.*, 2018). Il est préférable d'utiliser une incorporation directe ou sous une forme pré-émulsifiée. Le remplacement de 20% de viande rouge de poulet et 10% de viande de porc par 30% de viande de poulet séparée mécaniquement, dans la fabrication de saucisses, a pour conséquence une modification de la composition en acides aminés (diminution de l'isoleucine, de la leucine et de la valine et augmentation de la lysine) et une diminution de la digestibilité des protéines estimée par un test in vitro de digestion avec la pepsine (Fursik *et al.*, 2018). Un taux d'incorporation de fibres (son de blé ou pulpe de carottes séchée) limité à 3% a peu d'effet sur la qualité sensorielle et nutritionnelle de saucisses de poulet (Yadav *et al.*, 2018). Le taux de cholestérol est diminué, la stabilité de l'émulsion et le rendement après cuisson, sont améliorés. Golge *et al*. (2018) ont testé l'addition (3,6 et 9%) de fibres issues de pois, d'orange ou d'inuline sur les caractéristiques de **boulettes de viande** préparées à partir de filets de poulets. Les fibres de pois augmentent le pouvoir de rétention en eau et diminuent l'absorption de lipides lors de la cuisson en friture des boulettes.

Samant *et al*. (2016) ont analysé les effets individuels et combinés de la marinade et de la fumaison sur la qualité sensorielle de **filets** de poulets. L'association des deux procédés renforce la perception de la jutosité de la viande.

Kim *et al*. (2012) ont étudié les effets des conditions de malaxage (durée et température) sur la qualité des **blancs** (jambon) de poulet. Un malaxage de 60 min permet d'accroître la capacité de rétention en eau des blancs et améliore leur texture par comparaison avec un malaxage de 10 min. Kim *et al*. (2018) ont testé l'addition d'hydrocolloïdes (alginate, glucomannanes) à des jambons réalisés avec des filets de canards broyés avec la peau. L'addition de 1% d'alginate ou de 0,5% d'alginate avec 0,5% de glucomannanes améliore plusieurs caractéristiques des jambons. Leurs teneurs en eau et en minéraux sont accrues. Les pertes en jus après cuisson sont diminuées et l'appréciation sensorielle est supérieure.

Afin d'améliorer la praticité d'usage des **ailes** de poulet, Nakano et Ozimek (2015) ont proposé une nouvelle technique de désossage. Celle-ci permet de réduire l'espace nécessaire pour le stockage et le transport des ailes de poulet et de diminuer la durée et le volume de marinade si ce type de préparation est envisagé.

2.1.3.3. Effets des modalités de cuisson

Le mode de cuisson, sa durée et sa température peuvent impacter différentes caractéristiques des produits. Ngadi *et al*. (2007) ont étudié l'effet de la durée de cuisson en friture (30 à 300 s) à 190°C dans différents mélanges d'huile de colza hydrogénée ou non (proportion variant de 0 à 100%) sur la qualité de **nuggets** de poulet. Plus la durée de cuisson est longue, plus le produit est foncé, plus les intensités de rouge et jaune sont accentuées, plus la texture est ferme, plus la teneur en huile augmente au détriment de la teneur en eau. L'augmentation du degré d'hydrogénation de l'huile a pour effet d'éclaircir la couleur en surface des nuggets et d'accroître la fermeté de leur texture alors que les teneurs en huile et eau diminuent. Evanuarini et Purnomo (2011) ont testé l'effet de deux températures (160 et 170°C) et trois durées (1, 2 et 3 min) de cuisson en friture de nuggets sur leur texture. La texture optimale est obtenue avec 2 min de cuisson à 170°C. Des nuggets cuits à la vapeur ont un pouvoir de rétention en eau, un rendement après cuisson et une teneur en fibres supérieurs à ceux de nuggets cuits au four classique ou à micro-ondes (Pathera *et al.*, 2017a). Les nuggets cuits au four à micro-ondes ont une texture moins ferme. La cuisson génère la formation de composés volatiles qui impactent le profil aromatique des produits. Ainsi, Silva *et al*. (2017) ont comparé différentes modalités de cuisson (grillé, rôti, frit avec de l'huile d'olive, sous-vide) de filets de poulets conservés salés et séchés et dessalés au préalable à l'eau froide. La cuisson sous vide a surtout généré la formation de

composés volatiles issus de la peroxydation des lipides et peu appréciés des consommateurs. Les autres modes de cuisson ont plutôt généré la production de composés volatiles issus de la réaction de Maillard et plus appréciés des consommateurs.

La cuisson a pour effet de diminuer la teneur en eau des produits et d'augmenter les teneurs en protéines et minéraux (Hussain *et al.*, 2013 ; Krempa *et al.*, 2019). La teneur en lipides dépend du mode de cuisson. Asmaa et Tajul (2017) ont montré que la teneur en lipides de **saucisses** de poulet n'était pas modifiée lors d'une cuisson au four à vapeur et qu'elle augmentait lors d'une cuisson en friture. Cette dernière modifie aussi la composition en acides gras en augmentant les proportions d'AGS et AGPI et le ratio AG n-6/AG n-3. La cuisson au four à micro-ondes entraîne une forte diminution de la teneur en acide linoléique (AG essentiel) de la viande de poulet (13,3% vs. 23,3% des AG totaux dans la viande crue, Hussain *et al*. (2013)). Le mode de cuisson a un effet sur la teneur en lipides des **nuggets** qui peut varier entre 10,9 et 22,7% et sur leur teneur en sel qui peut varier entre 0,87 et 1,63% (Albuquerque *et al.*, 2016). Martelli *et al*. (2008) ont démontré qu'il était possible de limiter la prise d'huile lors de la cuisson en friture des nuggets en les trempant dans une solution d'amidon de manioc ou de méthyl cellulose avant le passage dans la panure. La cuisson d'**aiguillettes de poulet** en friture ou au micro-ondes favorise plus l'oxydation des lipides que la cuisson au four électrique à convection, au bain-marie ou au grill (Arguelo *et al.*, 2016). Les aiguillettes frites présentent des pertes en jus après cuisson les plus importantes par comparaison avec les autres modes de cuisson. Le taux de rétention des différents acides aminés dépend aussi du mode de cuisson. Il est maximal par exemple pour la **cuisse de poulet** cuite dans un four à vapeur (Kim *et al.*, 2017). Le rendement en cuisson du **blanc de dindes** décroit avec l'augmentation de la température de cuisson (92,8 vs. 89,5% pour 71,1 et 79,4°C, Claus et Jeong (2018)). Dans cette étude, il est aussi recommandé d'éviter un stockage préalable de quelques jours à +4°C de la viande de dinde broyée et mixée avec du sel pour limiter la formation ultérieure d'hémochrome de la globine, dénaturé par le nicotinamide et responsable de défaut de couleur du produit cuit.

La cuisson à haute température peut conduire à la formation d'**amines hétérocycliques aromatiques** (AHAs) qui sont des composés mutagènes (Raza *et al.*, 2015). Haskaraca *et al*. (2014 ; 2017) ont mesuré des quantités importantes de AHAs dans les pilons et les ailes frits, les burgers et les nuggets de poulet vendus en restauration rapide. En comparant différents modes de cuisson de filets de canard et de poulet, Liao *et al*. (2010 ; 2012) ont montré que l'utilisation du barbecue au charbon favorisait la formation de AHAs en grande quantité. Pour Liao *et al*. (2010 ; 2012), ce sont les filets d'oie cuits au micro-ondes et les cuisses d'oies bouillies qui présentent les teneurs les plus élevées en AHAs. Pour les filets et les cuisses de dindes, ce sont la friture et la cuisson au four qui génèrent les plus fortes teneurs en AHAs (Oz et Yuzer, 2017).

La formation de AHAs dans des pâtés de poulet est moindre lors d'une cuisson dans un four à vapeur comparée à une cuisson dans un four classique à convection (Isleroglu *et al.*, 2014). Keskekoglu et Uren (2017) ont montré que l'addition d'extraits de pépins de raisin à la viande permettait de réduire la formation de ces composés de 65% lors de la cuisson de boulettes de bœuf avec un barbecue à charbon et de 37% lors de la cuisson au four de boulettes de poulet. Des extraits de grenade, d'aubépine ou d'artichaut et des épices ont également cet effet inhibiteur lors de la cuisson de viande de poulet ou de bœuf à la poêle, au four, au barbecue ou en friture (Keskekoglu et Uren, 2014 ; Lu *et al.*, 2018a; Tengilimoglu-Metin *et al.*, 2017 ; Tengilimoglu-Metin et Kizil, 2017). La cuisson au barbecue à charbon peut induire aussi la formation d'**hydrocarbones aromatiques polycycliques** (HAPs), substances considérées cancérigènes. Des ailes de poulets marinées au préalable avec des extraits de thé contiennent moins de HAPs après cuisson au barbecue à charbon que les ailes non marinées (Wang *et al.*, 2018). La poudre de pépins de raisin diminue la sensibilité à l'oxydation de nuggets de poulets précuits et conservés à -18°C pendant 5 mois (Kumcuoglu et Cagdas, 2015). Lors d'une cuisson en friture dans l'huile de palme, l'addition croissante (0 à 5%) de NaCl à des filets de poulet favorise la formation de 3-monochloropropane-1,2-diol esters suspectés d'être cancérigènes pour l'homme (Wong *et al.*, 2017). Par contre, cela n'a aucun effet sur la formation d'**esters glycidyliques**, molécules considérées génotoxiques et cancérigènes. La cuisson entraîne aussi la formation de **composés issus de l'oxydation du cholestérol**. La quantité de ces derniers est supérieure lors d'une cuisson au four de cuisses de poulet par comparaison avec une cuisson bouillie ou frit à la poêle (Perez *et al.*, 2010). L'enrichissement préalable de la viande en vitamine E grâce à l'alimentation du poulet permet de limiter la formation de ces composés après cuisson ce qui n'est pas le cas avec du sélénium (Perez *et al.*, 2010). Toutefois, la cuisson en friture diminue la teneur en vitamine E des nuggets de poulet (Nurkhuzaiah *et al.*, 2015). Le réchauffage de cuisses de poulet cuites puis conservées 3 à 6 jours à +4°C favorise aussi la formation de produits d'oxydation du cholestérol (Choe *et al.*, 2018). L'addition de bicarbonate de sodium dans la panure recouvrant des filets de poulet frits permet de réduire la teneur en **acrylamide** du produit mais cela accroît son brunissement et sa teneur en 5-hydroxymethylfurfural (marqueur de chauffage important des sucres ; Aykin *et al*. (2016)). L'addition d'extrait de thé vert et une pré-cuisson au micro-ondes permettent de limiter la formation d'acrylamide lors de la cuisson en friture des pilons et des ailes de poulet (Demirok et Kolsarici, 2014) et lors de la cuisson des burgers et des nuggets de poulet (Soncu et Kolsarici, 2017).

2.1.3.4. Répondre aux préoccupations des consommateurs

La transformation de viande fraîche en fin de DLC peut permettre de **limiter le gaspillage alimentaire**. Ainsi, Kawata *et al*. (2018) ont montré que le consentement à payer de la viande de poulet en fin de DLC pour une vente en frais et reconditionnée après une cuisson en friture est supérieur à 90% du prix de la viande fraîche.

Pour répondre à des préoccupations de santé, il est possible de modifier la formulation des produits à base de viande de volailles. Devatkal *et al*. (2011) et Tasbas *et al*. (2016) ont ainsi testé le remplacement de farine de blé par de la farine de sorgho ou du lactosérum en poudre dans la fabrication de nuggets de poulet pour **éviter l'apport de gluten**. Alaie *et al*. (2018) ont montré qu'il était possible de **substituer tout ou partie de la graisse** par de l'inuline (polysaccharide de fructose) dans la fabrication de saucisses de poulet. L'incorporation de 0,5% de carragénine lors de la fabrication de nuggets de poulet permet de réduire presque de moitié leur teneur en lipides (Nayak *et al.*, 2015). Schmidt *et al*. (2017) ont **diminué les teneurs en NaCl et en gras** de saucisses de poulet grâce à l'addition d'un mélange de sels (50% KCl, 25% MgCl2, 25% CaCl2) et de collagène. Campagnol *et al*. (2017) ont montré qu'il était possible de diminuer de moitié les teneurs en graisse et NaCl de saucisses en les substituant avec des fructo-oligosaccharides (6%) et un mélange de transglutaminase (1%), disodium inosinate (0,03%) et disodium guanylate (0,03%). Verma *et al*. (2015) ont diminué la teneur en NaCl et en graisses de nuggets de poulet en substituant une partie du NaCl (0,8%) par un mélange de KCl (0,2%), acides citrique (0,03%) et tartrique (0,03%) et du sucrose (1%) et en ajoutant de la farine de coques de pois (8%). Toutefois, la texture, la couleur et les qualités nutritionnelle et sensorielle de ces produits sont modifiées. Enfin, il reste à démontrer que les produits utilisés en substitution du sel et de la graisse ne sont pas nocifs également pour la santé des consommateurs.

Pour conclure, à l'exception des effets de l'espèce, du type de muscle et de la souche reliée à la vitesse de croissance, au rendement en filet et à l'âge à l'abattage sur la qualité technologique de la viande de volailles et détaillés dans un paragraphe précédent, la qualité des produits transformés dépend surtout des procédés technologiques et des modes de conservation et de cuisson. Toutefois, il faut noter l'étude de Singh *et al*. (2016) qui a comparé l'influence de la souche de poulet (une souche à croissance rapide, Cobb 400 et 3 souches locales indiennes) sur la qualité des nuggets. Les nuggets produits avec la souche Cobb 400 sont les plus riches en eau et en lipides. Ils présentent également l'émulsion la plus stable, le rendement en cuisson le plus important et les notes de couleur, d'apparence et de flaveur les plus élevées. Enfin, Nunes *et al*. (2006) ont fabriqué des nuggets avec de la viande de reproducteurs Gallus et de poules pondeuses de réforme et ils n'ont pas mis en évidence de différence d'appréciation sensorielle par un panel de 400 consommateurs en comparaison avec des nuggets produits à partir de viande de poulet standard.

La littérature scientifique sur les produits transformés à base de viande de volailles provient peu des pays occidentaux, suggérant que pour ces pays la recherche et le développement est surtout le fait des entreprises de l'industrie agro-alimentaire qui publient peu afin de préserver leur secret de fabrication et leur avance technologique sur les entreprises concurrentes.

2.1.4. Impact des pratiques du consommateur

Les pratiques des consommateurs vont concerner essentiellement les modalités de conservation, de préparation et de cuisson des produits déjà abordées dans les paragraphes précédents. Pour la conservation à +4°C, la DLC est indiquée sur le produit. La viande peut être emballée sous vide, sous atmosphère modifiée ou sous film plastique. La viande de volaille se conserve 6 mois à -20°C. Elle se prête à tout type de cuisson (four, sauté, poêle, grill, barbecue) et elle peut être consommée froide ou chaude selon le mode de préparation.

2.1.5. Conclusion

La production de viande de volailles standard est majoritaire. Les productions alternatives se positionnent essentiellement sur le segment de la vente en carcasses entières et découpe et leur taux de pénétration sur le segment des produits transformés est faible (bio et démarche « bleu, blanc, cœur »). Les trois-quarts de la production de volailles en France sont consacrés à la production de découpes vendues en l'état ou destinées à la transformation en produits élaborés. Ce type de produits est en grande partie issu de la production de volailles dites standard, caractérisées par une vitesse de croissance rapide et des rendements en filets élevés, ce muscle étant particulièrement plébiscité par les consommateurs et les industriels des pays occidentaux. La sélection a donc porté ses efforts sur la vitesse de croissance mais aussi sur l'accroissement du rendement en filets avec des progrès spectaculaires obtenus très rapidement et qui continuent actuellement (Petracci *et al.*, 2017). Cela a eu pour effet de diminuer les réserves glycolytiques des muscles et d'augmenter le pHu et donc le rendement technologique des filets. Ces dernières années, de nouvelles pratiques ont été mises en place favorisant un abattage plus

tardif (56 à 63 j. vs. 35 j. environ) en vue d'alourdir les poulets à croissance rapide utilisés pour la production standard. En lien avec ces évolutions, plusieurs défauts de qualité impactant l'intégrité et la composition des muscles, surtout au niveau du filet de poulet sont apparus depuis une dizaine d'années. Ces défauts modifient fortement l'aspect visuel, la texture et les capacités fonctionnelles des muscles pectoraux profonds et/ou superficiels et plusieurs études mettent en évidence une augmentation très rapide de leur fréquence en abattoirs (Petracci *et al.*, 2015). La littérature est unanime pour décrire que les lésions associées à ces défauts s'apparentent à des myopathies sans que l'on connaisse encore leur origine génétique ou biologique (*cf.* revue de Baéza *et al*. (2018)). Les quatre principaux défauts identifiés chez les volailles (poulet en particulier) sont le « white striping », le « wooden breast », les filets « spaghetti » et l'« Oregon disease » (Figure 2.1.4). Plusieurs stratégies ont été testées pour diminuer la fréquence ou la sévérité de ces défauts mais aucune n'est satisfaisante (Baeza *et al.*, 2018). La seule solution efficace serait de revenir sur l'utilisation en élevage de croisements présentant des rendements en viande moins importants.

Les productions alternatives répondent aux attentes des consommateurs sur les aspects organoleptiques (Label Rouge), bien-être animal (densité, accès à un parcours, taille des élevages, enrichissement du milieu, vitesse de croissance), santé (bio, démarche « bleu, blanc, cœur ») et traçabilité de la production (IGP, AOC, circuits courts et vente directe) ce qui a un impact plutôt positif sur le pilier social de la durabilité. Cependant, l'impact des productions alternatives sur le pilier environnement n'est pas forcément positif car la durée d'élevage de ces poulets est plus longue que celle des poulets standards impliquant une quantité d'aliment à produire, une consommation d'eau et une quantité de rejets plus importantes (Benoit et Meda, 2017). De plus, l'accès à des parcours (2 m^2 par poulet Label, 4 m^2 par poulet bio) accroît aussi l'utilisation de surfaces. L'impact sur le pilier économique dépend en grande partie du prix auquel ces produits peuvent être commercialisés. Clairement, ces productions alternatives ne sont pas du tout compétitives par comparaison avec la production standard (durée d'élevage plus longue, restrictions sur la taille des bâtiments et des élevages, densité en élevage plus faible, rendement en viande inférieur) et leur viabilité économique repose donc sur un prix de vente plus élevé (Benoit et Meda, 2017 ; Rocchi *et al.*, 2019).

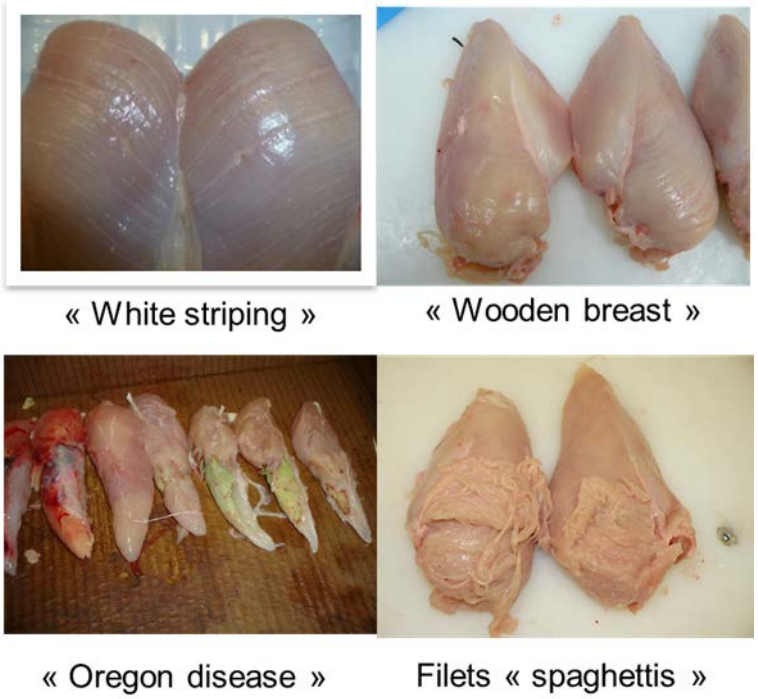


Figure2.1.4. Défauts de qualité de viande de poulets

Effets positifs et négatifs associés à la production de poulet Label Rouge et Bio (vs. avec une production de poulet standard)

Dimensions	Effets positifs	Effets négatifs
Qualités carcasse	Squelette plus ferme Peau plus épaisse et plus résistante à la déchirure lors de la plumaison Carcasse moins grasse	Rendement carcasse et rendement en filet inférieurs
Qualités organoleptiques	Flaveur plus développée Viande plus foncée et plus rouge	Viande moins juteuse et plus ferme Variabilité entre animaux plus importante (surtout en production Bio du fait des contraintes sur les matières premières)
Qualités nutritionnelles	Teneur en protéines supérieure Teneur en lipides inférieure	Teneur en AGPI inférieure
Qualités technologiques		Rendement technologique inférieur
Qualités d'image	Meilleure prise en compte du bien-être animal (densité, accès à un parcours, taille des élevages, enrichissement du milieu, vitesse de croissance moins intense) Traçabilité du système de production et de l'animal plus importante Contrôle annuel du respect du cahier des charges Moins de traces de pesticides et de résidus médicamenteux (production Bio)	Utilisation de surfaces plus importantes, dégradation des sols à proximité des bâtiments Risque d'exposition à des contaminants de l'environnement et des pathologies (influenza aviaire) plus élevé Consommation d'aliment et production de rejets plus importants

Enfin, la viande de volailles est riche en protéines et ses teneurs en lipides et AGS sont faibles. Ses caractéristiques nutritionnelles sont donc plutôt favorables pour la santé des consommateurs (Marangoni *et al.*, 2015). Il est paradoxal que les procédés industriels modifient complètement ces caractéristiques pour fabriquer des produits élaborés riches en carbohydrates, en lipides et en sel.

L'effet des facteurs de variation des différentes dimensions de la qualité et de leur importance sont résumés dans les tableaux de synthèse ci-dessous.

Synthèse des effets des différents facteurs de variation des qualités de la carcasse et de la viande de volailles

Propriété commerciale des carcasses de volailles

Facteurs	Poids vif	Rendement carcasse	Aspect de la carcasse	Rendement en filets
Souche (vitesse de croissance)	+++	+++	-	+++
Age	+++	+++	-	+++
Sexe	+	+	-	+
Conditions d'élevage	++	++	++	++
Conditions de pré-abattage	-	-	++	-
Conditions d'abattage	-	-	++	-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++).
Le sexe a un fort effet sur le poids vif chez les espèces où le dimorphisme sexuel sur ce critère est important (dinde, canard de Barbarie).

Propriété organoleptique de la viande de volailles

Facteurs	Couleur	Jutosité	Tendreté et caractère fibreux	Flaveur et goût
Muscle/morceau	+++	++	++	+++
Souche (vitesse de croissance)	+++	+++	+++	++
Age (pigments héminiques)	+++	+++	+++	++
Sexe	+	+	++	+
Alimentation (pigments caroténoïdes, antioxydants)	++	+	+	+++
Conditions d'élevage	+	+	++	+
Conditions de pré-abattage	++	+	+	-
Conditions d'abattage	+	+	+	-
Traitement post mortem des carcasses	+	+	++	-
Conditions de conservation	+	+	+	++
Conditions de cuisson	+++	+++	+++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
La souche, l'âge, l'alimentation et les conditions de pré-abattage vont impacter les réserves en glycogène du muscle lors de l'abattage et l'évolution post mortem du pH qui a une forte influence sur la couleur, le pouvoir de rétention en eau et la texture de la viande. Parmi les conditions d'élevage, l'accès à un parcours a un effet sur la texture de la viande.

Propriété nutritionnelle de la viande de volailles

Facteurs	Protéines et acides aminés	Lipides	Acides gras	Minéraux, vitamines et oligo-éléments
Muscle/morceau	++	++	+	+
Souche (vitesse de croissance)	++	++	+	-
Age	+++	++	+	+
Sexe	+	+	+	+
Alimentation	+	++	+++	+++
Conditions d'élevage	+	+	+	+
Conditions de conservation	+	+	+	+
Conditions de cuisson	++	++	++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriété technologique de la viande de volailles

Facteurs	Aptitude à la transformation	Aptitude à la conservation
Muscle/morceau	+	+
Souche (vitesse de croissance)	+++	+
Age	++	+
Alimentation	++	+++
Conditions de pré-abattage	+	-
Conditions de conservation	+	++
Conditions de cuisson	++	+

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
L'aptitude à la transformation va être évaluée par la capacité de rétention en eau qui dépend en grande partie du pHu de la viande agissant sur la conformation des protéines musculaires et leur fonctionnalité.
L'aptitude à la conservation va être estimée par la sensibilité à l'oxydation des lipides et des protéines de la viande.

Facteurs majeurs de variation des qualités des carcasses et des viandes de volailles

Facteurs	Qualité commerciale	Qualité organoleptique	Qualité nutritionnelle	Qualité technologique
Souche (vitesse de croissance)	+++	+++	++	+++
Age	+++	+++	++	+++
Sexe	+	+	+	+
Alimentation	++	++	++	+++
Conditions d'élevage	++	+	+	+
Conditions de pré-abattage	+	+	-	+
Conditions d'abattage	+	+	-	+
Traitement post-mortem des carcasses et de la viande	+	+	-	+
Conditions de cuisson	-	+++	++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

2.2. Œufs et ovoproduits

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Œuf et ovoproduits
147 références sont citées dans cette partie, dont 78 % sont **issues d'articles de journaux et de chapitres de livres**. La bibliographie citée est dans l'ensemble **récente** avec 1 référence/2 datant de moins de 10 ans. Les 13 auteurs les plus cités (69 citations sur un total de 559 auteurs différents) sont **européens** (6 français, 1 danois, 3 italiens et 1 tchèque). A noter que les auteurs INRAe représentent 11% des auteurs cités. Pour terminer, on observe que 19% des références proviennent de rapport, de conférences et textes réglementaires. Les citations proviennent de laboratoires européens et internationaux dans le domaine des sciences avicoles. Les journaux les plus représentés sont dans le **domaine des sciences alimentaires et des sciences avicoles** et donc représentatifs du domaine concerné par l'expertise et particulièrement l'œuf et les ovoproduits.

2.2.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation

L'œuf de poule (*Gallus Gallus*), est un produit animal de fort intérêt agronomique, avec une production mondiale de 73,5 millions de tonnes en 2017 (ITAVI, 2018). Le marché est de 16-17 milliards d'œufs produits annuellement en France et plus de 1200 milliards à l'échelle mondiale. La production d'œufs a progressé de 3,9% en 2017 par rapport à 2016, principalement grâce à l'accroissement de la production asiatique qui a augmenté de 42% depuis l'an 2000. L'œuf de poule est largement utilisé soit comme aliment peu onéreux, de haute qualité nutritionnelle (**œuf de consommation**, plus de 100 milliards en Europe dont 14,6 milliards en France en 2014), soit comme chambre embryonnaire (**œuf à couver**, entre 1 et 2 milliards chaque année en France), pour produire les futurs poulets de chair ou les poules pondeuses.

2.2.1.1. Caractéristiques des modes de production des œufs

L'œuf de consommation est un produit de base de l'alimentation humaine dans le monde. C'est une source protéique de référence pour l'homme et la moins chère des protéines animales. Il ne souffre d'aucun interdit religieux et il est donc abondamment consommé aux quatre coins de la planète. L'Asie est le premier producteur mondial (59% de la production mondiale), devant l'Union européenne à 28 (10% de la production mondiale) et les Etats-Unis (8,6%) ((Figure 2.2.1.) (ITAVI (2018) ; FranceAgriMer (2018) ; Magdelaine (2017) ; Nys *et al*. (2018)). La Chine représentait à elle seule 35% de la production mondiale en 2017 (ITAVI, 2018).

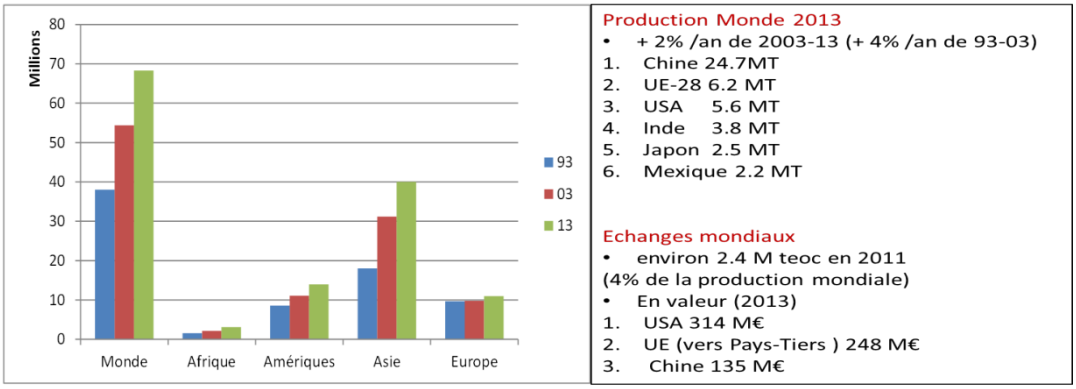


Figure 2.2.1. Production mondiale d'œufs de consommation de 1993 à 2013 (source ITAVI)

Ces œufs sont consommés sous forme d'œufs en coquille ou d'ovoproduits (59 et 41% des volumes respectivement) et utilisés comme ingrédients pour la préparation de plats culinaires. Du fait de son utilisation à l'état cru (œuf entier, mayonnaise…) et au développement préférentiel de *Salmonella enterica serovar Enteritidis* dans l'œuf et les ovoproduits, il est parfois associé à des toxi-infections. Ce risque a été considérablement limité par la surveillance sanitaire des élevages. Toutefois, il reste d'actualité, notamment de par les récents changements dans les systèmes d'élevage au sein des pays de l'Union européenne (Union Européenne, 1999). Seuls sont autorisés les cages aménagées et les systèmes alternatifs (volières, élevage au sol avec ou sans parcours), qui ont pour caractéristique commune le contact possible des œufs avec la litière (RMT bien-être et systèmes d'élevage).

Les différents modes de production ont fortement évolué depuis la seconde guerre mondiale. Avant-guerre, la production était uniquement en basse-cour et correspondait surtout à une production pour l'autoconsommation. Après-guerre, l'agriculture a évolué et a dû faire face à une diminution drastique des personnes travaillant pour le secteur primaire (de 50%

de la population à quelques % de nos jours). Les agriculteurs ne doivent plus produire uniquement pour un nombre restreint, mais en grande quantité tout en étant de moins en moins nombreux. La production a donc évolué pour répondre à la demande (en quantité) et maîtriser le risque sanitaire, ce qui a abouti à un modèle d'élevage de « l'œuf productif » en claustration et en cages. Dans les années 1980 et 1990, ce modèle de production était pratiquement le seul. Depuis la fin des années 1990, de nouvelles demandes du consommateur sont apparues pour prendre en compte le bien-être animal, segmentant ainsi le marché. Au niveau européen, on a assisté à une forte prise de conscience des citoyens sur les systèmes de production agricole en général et animale en particulier, dont les volailles et les œufs. Cette demande des consommateurs s'est traduite par une forte diversification des modes d'élevage. Les modèles de production européens actuels sont le résultat de cette demande sociale. Ils sont réglementés dans le cadre de la directive bien être des poules pondeuses (Union Européenne, 1999). Cette réglementation est aussi le résultat de recherches scientifiques pour satisfaire les 5 libertés du bien-être animal : absence de faim, absence de soif, possibilité de se mouvoir, absence de peur/détresse, tout en permettant l'expression des comportements naturels. Cette directive définit l'élevage des poules en cages aménagées (**code 3**) et l'élevage des poules en systèmes alternatifs. Elle contient des dispositions générales applicables à tous les systèmes d'élevage :

- Les animaux doivent être inspectés au moins 1 fois/jour.
- La présence de perchoirs est obligatoire. Si aucune hauteur minimale n'est spécifiée, les poules doivent cependant pouvoir passer leurs doigts en-dessous.
- La présence d'un nid est requise. Le nid est un espace séparé dont le sol n'est pas constitué de grillage métallique. Ce nid peut être prévu pour une ou plusieurs poules.
- Le nid n'est pas considéré comme une surface utilisable.
- Le programme lumineux doit suivre un rythme de 24 h. Une période d'obscurité ininterrompue d'une durée indicative d'approximativement 8 h, doit être pratiquée afin de permettre aux animaux de se reposer et d'éviter les problèmes oculaires. L'intensité lumineuse doit être suffisante pour permettre aux animaux de voir et d'être vus, notamment par l'éleveur lors de l'inspection quotidienne.

La directive définit des réglementations spécifiques pour :

- L'élevage des poules en cages aménagées (code 3)
- L'élevage des poules en systèmes alternatifs qui comprennent :
  - **Code 0** : Œufs issus de l'agriculture biologique (poule élevée en plein air, alimentation bio)
  - **Code 1** : Poules élevées en plein air avec des particularités françaises : le Label Rouge, les volières avec accès plein air
  - **Code 2** : Poules élevées dans un bâtiment, au sol ou en volières (peu présent en France pour cette dernière modalité)

Les différentes caractéristiques de ces modes d'élevage sont résumées dans le tableau suivant :

	Cage	**Volière ou sol sans parcours**	**Volière ou sol + parcours**	**Label Rouge**	**Bio**
Code	**3**	**2**	**1**	**1**	**0**
Accès au parcours(m^2/poule)	NON	NON	OUI (4)	OUI (5)	OUI (4)
Densité en bâtiment (nb poules/m^2 accessible aux poules)	13,3	9,0	9,0	9,0	6,0
Taille du cheptel	Pas de limite (moyenne 50 000, peut aller jusqu'à 100 000 et plus)	Pas de limite (peut aller jusqu'à 20 000 et plus)	Pas de limite (peut aller jusqu'à 15 000)	6 000 par bâtiment	3 000 par bâtiment
Mortalité (%)	3-4%	6-8%	6-8%	6-8%	8-10%
Taux de poussière dans le bâtiment	Faible	Fort	Fort	Moyen	Moyen

Utilisation vaccins et produits vétos	Similaire (lorsque l'animal est malade)				
Alimentation	Uniquement céréales (type blé, maïs…), protéagineux (soja, pois féveroles, lupin), huiles végétales, minéraux, vitamines, compléments alimentaires (acides aminés ou colorant de synthèse), source de calcium (3,5% au lieu de 1% chez les poulets de chair)				*Idem* **Mais** 95% d'origine Bio, non OGM Pas d'acides aminés ou de colorant de synthèse
Impact environnemental (Bilan carbone)	Faible (IC=2,2)	Moyen (IC=2,4)	Moyen (IC=2,4)	Moyen (IC=2,6)	Moyen (IC=2,6)
Impact environnemental Utilisation des terres	Faible	Moyen	Moyen	Moyen	Fort

Le **code 3** correspond aux poules élevées en cages. Depuis la directive bien être des poules pondeuses (Union Européenne, 1999), l'ensemble de la production européenne en cages est conduit dans des cages aménagées (nouvelles installations depuis 1er janvier 2003 puis tous les bâtiments depuis 2012 ; Figure 2.2.2.). Ces cages ont une surface disponible par poule de 750 cm² et sont logées dans des cages d'au moins 2 000 cm². Ces cages présentent des perchoirs (15 cm/poule), des nids séparés et une aire de grattage et de picorage. Par ailleurs, les poules disposent de 12 cm minimum de mangeoire/poule. Les œufs produits sont emballés dans un centre de conditionnement et commercialisés en Grandes et Moyennes Surfaces (GMS).

Figure 2.2.2. Poules élevées en cages aménagées selon la directive 99/74 (Union Européenne, 1999).

Pour les systèmes alternatifs, la directive européenne indique que les bâtiments doivent être équipés d'un nid (1 au minimum pour 7 poules ou, dans le cas de nids collectifs, 1 m² minimum pour 120 poules), d'une litière devant occuper au moins 1/3 de la surface au sol et constituée de matériel friable (250 cm² /poule) et de perchoirs non situés au-dessus de la litière avec une distance mur - perchoir ≥ 20 cm et une distance entre 2 perchoirs ≥ 30 cm minimum. En cas d'accès à l'extérieur, les bâtiments doivent avoir des trappes d'accès au dehors avec une longueur d'ouverture totale ≥ 2 m / 1 000 poules, répartie sur toute la longueur du bâtiment. La hauteur des trappes ≥ 35 cm et la largeur ≥ 40 cm. La directive mentionne la présence d'abris sur parcours. A ces contraintes, en cas d'élevage biologique ou sous signe de qualité, s'ajoutent les contraintes définies (densité sur parcours, temps d'accès…) dans la réglementation et les cahiers des charges spécifiques à ces systèmes.

Le **code 2** correspond aux poules élevées en volière ou au sol (Figure 2.2.3.). L'élevage de pondeuses consiste en des bandes de 30 000 poules par bâtiment. L'aliment est fourni par un fabricant d'aliments et la vente des œufs est faite à 100% par les GMS.

Figure 2.2.3. Exemple d'élevage de poule en claustration au sol

Le **code 1** correspond aux œufs issus de poules élevées en volière ou au sol avec un parcours en extérieur (plein air, Figure 2.2.4.). Les élevages sont constitués de bâtiments de 30 000 poules avec accès à un parcours extérieur de 4 m^2 par poule (soit 12 ha de parcours pour un bâtiment de 30 000 poules). L'aliment est fourni par un fabricant et la vente est effectuée par la GMS.

Figure 2.2.4. Elevage de poules en plein air

Dans le cas des élevages sous label rouge, s'ajoute un cahier des charges spécifique (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017c). Ce cahier prévoit l'utilisation de souches rustiques avec 6 000 poules par bâtiment et 12 000 par élevage au maximum. L'alimentation doit être constitué de 50% de céréales au minimum (avec un maximum de 15% de sous-produits). Le cahier interdit les colorants de synthèse et la majorité des additifs. Le parcours doit être herbeux et ombragé à 25 semaines d'âge au plus tard. Le parcours est de 5 m^2/poule minimum. L'âge maximum de ponte ne doit pas dépasser 72 semaines et le poids d'œuf est de 48 g minimum, et ne comprend pas les œufs pondus hors du nid. Le ramassage est manuel et doit être effectué au moins 2 fois par jour. L'aliment est fourni par le fabricant et comme pour les autres systèmes, les œufs sont conditionnés dans un centre de conditionnement et vendus en GMS.

Le **code 0** est mentionné sur les œufs issus de l'agriculture biologique (Figure 2.2.5.). Elle fait appel à un cahier des charges spécifique (Chambres d'agriculture de Bretagne, 2018). La souche est choisie en fonction de l'adaptabilité aux conditions du milieu, la vitalité et la résistance aux maladies, et doit privilégier les souches autochtones. L'élevage est constitué de 6 000 poules au maximum avec pas plus de 3 000 poules/bâtiment et une densité maximale de 6 poules/m^2. L'alimentation est constituée de 65% de céréales au minimum et 90% des matières premières utilisées doivent être issues de l'agriculture biologique. Les OGM et les vitamines de synthèse sont interdits. Le parcours extérieur est de 4 m^2/poule minimum, avec accès au plus tard à 26 semaines. Les traitements autorisés concernent préférentiellement l'homéopathie, la phytothérapie et l'oligothérapie. Les vaccins sont autorisés s'il y a une maladie dans la zone d'élevage. Sont également autorisés un traitement

curatif allopathique par an et 2 traitements antiparasitaires allopathiques au maximum par année. La vente a lieu en circuit long (GMS) ou dans les magasins bio.

Figure 2.2.5. Elevage de poules bio en bâtiment et sur parcours extérieur

L'ensemble de ces modes de production respectent la réglementation européenne, mais on assiste toutefois à une défiance grandissante des consommateurs pour les œufs issus de poules en cages. Cette demande des consommateurs s'est traduite par une forte segmentation des marchés (80% des poules pondeuses étaient en cages en 2003, 63% en 2017, ITAVI (2018)). La proportion de poules élevées en systèmes alternatifs est en forte augmentation actuellement (Figure 2.2.6.), même si celle-ci reste très hétérogène en Europe (de moins de 10% en Espagne, Pologne à plus de 90% aux Pays-Bas, en Allemagne et en Autriche (ITAVI, 2018).

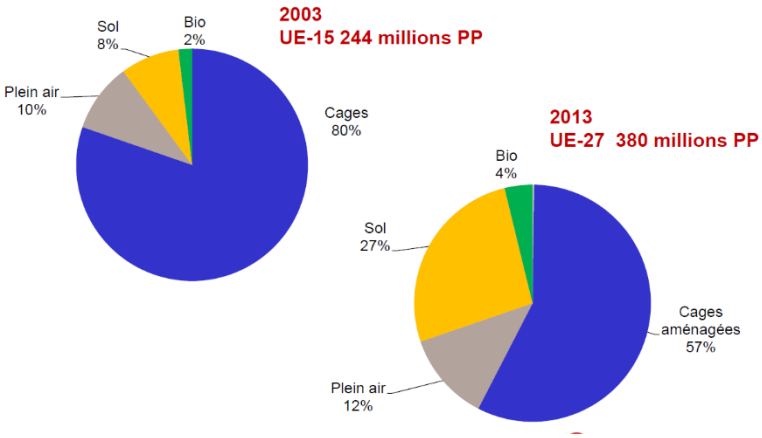


Figure 2.2.6. Evolution des modes de productions en Europe (Sources commission européenne, Centre National de la promotion de l'œuf (CNPO) et Institut technique de l'aviculture (ITAVI))

On peut penser qu'à l'horizon de 5-10 ans, les œufs issus de poules en cages (code 3) ne seront plus commercialisés par les grandes surfaces (Chenut, 2017) et données personnelles issues de discussions avec les acteurs de la filière). Les chaînes de GMS et les Hardiscounter se sont clairement positionnés pour un arrêt de la commercialisation des œufs issus de cages d'ici 2025 engendrant des difficultés importantes pour les producteurs. Pour plus de 2/3 des bâtiments équipés de cages aménagées, l'échéance de remboursement de la mise aux normes de 2012 se situe entre 2022 et 2026 selon les résultats de l'enquête conduite dans le cadre de l'étude « Avenir des élevages de pondeuses » (Filières avicoles, 2019). Malgré cela, la transformation du parc standard est déjà entamée (20% à fin 2019 d'après les premières estimations) et se fait essentiellement vers du code 2. Le coût de conversion varie alors entre 16 et 20 €/place auquel il faut rajouter le coût du foncier pour un élevage plein air (Chenut, 2018).

Une fois pondus, les œufs sont collectés, éventuellement stockés quelques jours avant le tri et le calibrage, pour être conditionnés et envoyés en magasins comme décrits dans le chapitre 1.

Lors du tri, les œufs sont triés en 3 catégories selon leurs défauts et aspects (Direction départementale de la protection des populations, 2015 ; Préfecture de la région Rhône-Alpes, 2012). Les œufs de **Catégorie A** constitueront les œufs de consommation (œuf coquille), la **catégorie B** constitués d'œufs de 2ème qualité ou d'œufs « conservés », qui ne respectent plus les critères de qualité A. Ils peuvent être fêlés ou sales mais ni cassés ni incubés et seront uniquement destinés au circuit

des ovoproduits pasteurisés. Les œufs de **catégorie C ou œufs industriels** sont des œufs déclassés ne respectant pas les critères A ou B. Ils seront valorisés pour l'alimentation des animaux domestiques. Les œufs ne doivent pas être réfrigérés avant leur achat. En effet, une rupture de la chaîne du froid pourrait provoquer la formation de gouttelette en surface, qui altèrerait la cuticule, créant une voie potentielle de pénétration de bactéries.

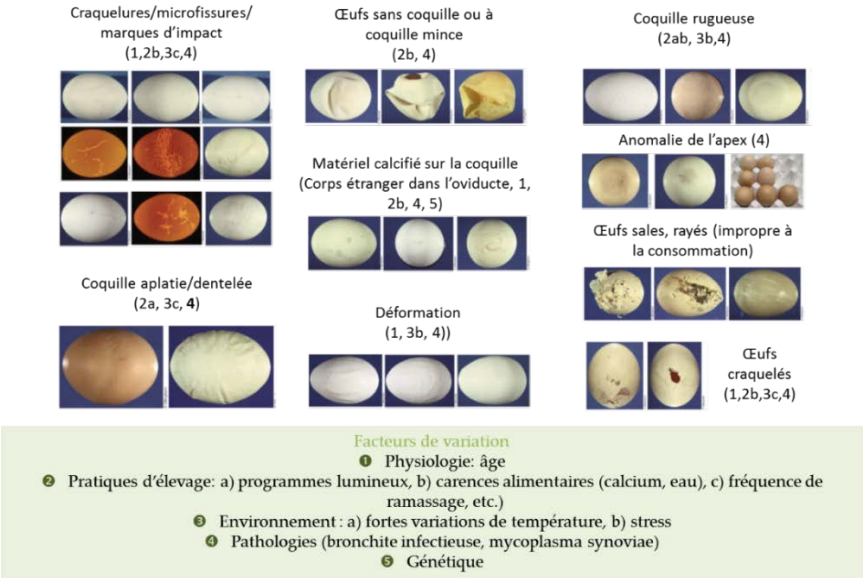


Figure 2.2.7. Principaux défauts des œufs en coquille et facteurs de variation à l'origine de ces défaut (Rehault-Godbert (Rehault-Godbert, 2017), d'après Meijerhoff, 2013).

2.2.1.2. Caractéristiques de la consommation des œufs de table et des ovoproduits

La consommation mondiale annuelle est d'environ 150 œufs par an et par habitant. La consommation européenne est en moyenne de 205 œufs par an et par habitant avec une grande disparité entre pays (de 141 œufs en Grèce à 250 au Danemark). La consommation française annuelle de 219 œufs en 2015, est légèrement supérieure à la consommation européenne correspondant à une consommation journalière moyenne de 30 g/jour (Nys *et al.*, 2018). 42% des œufs consommés sont des œufs achetés par les consommateurs. 6% proviennent de l'autoconsommation et des élevages familiaux et 11% sont des œufs en coquille consommés en restauration hors domicile (Figure 2.2.8.). Les ovoproduits utilisés principalement pour la transformation dans les plats cuisinés ou les produits transformés en industrie agro-alimentaire, représentent 20 à 25% de la consommation globale des œufs en Europe et 41% en France (ITAVI, 2018).

Au sens de la réglementation européenne, le terme d'ovoproduits ne peut être utilisé que pour des denrées destinées à l'alimentation humaine et résultant « de la transformation d'œufs ou de leurs différents composants ou mélanges ou d'une nouvelle transformation de ces produits transformés » (Commission européenne, 2004). La notion de transformation implique une modification substantielle qui ne peut être le simple cassage des œufs ; un traitement thermique (une pasteurisation) est au minimum requis, sans quoi on parlera d'œuf liquide (œuf débarrassé de sa coquille mais sans autre modification ni traitement) et non d'ovoproduits.

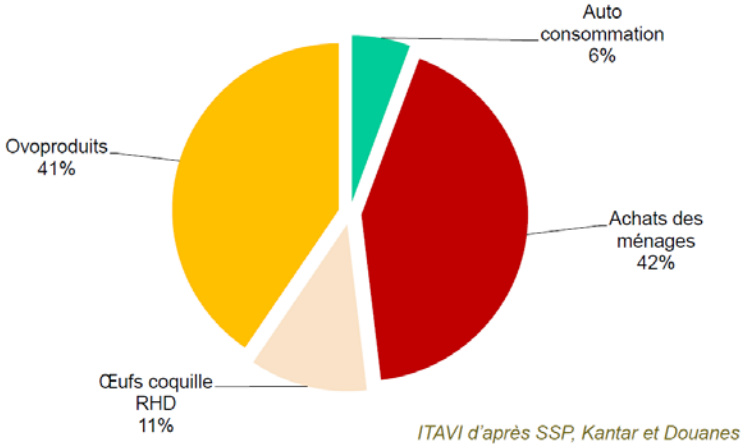


Figure 2.2.8. Répartition de l'origine des œufs consommés en France en 2013

Les ovoproduits sont des solutions pratiques, sûres, techniquement performantes et compatibles avec les contraintes des industries alimentaires et de la restauration hors domicile, ces deux secteurs représentant la quasi-totalité des utilisateurs d'ovoproduits en France. Contrairement au consommateur anglo-saxon par exemple, le consommateur français n'est pas encore prêt à abandonner l'œuf en coquille, même si quelques ovoproduits cuisinés sont aujourd'hui disponibles en supermarché, comme des tortillas par exemple.

La praticité est sans doute le critère le plus évident pour les industries alimentaires. En effet, si l'œuf en coquille est simple à conserver et utiliser au niveau ménager, les choses sont différentes dès lors qu'une fabrication met en œuvre des centaines de litres d'ovoproduits. Le cassage des œufs, éventuellement la séparation du blanc et du jaune, requièrent alors une technicité et des équipements spécifiques qu'il n'est ni simple, ni économiquement efficace d'intégrer au cœur d'une industrie de transformation dont ce n'est pas le métier. Sans compter qu'on peut n'avoir besoin que de jaune ou que de blanc ; les ovoproduits permettent alors d'éviter le gaspillage. En restauration collective, les volumes sont généralement moindres. Les ovoproduits y sont cependant de plus en plus utilisés en raison des gains de main d'œuvre qu'ils permettent.

La sécurité sanitaire offerte par les ovoproduits, traités thermiquement, et dont la qualité est contrôlée, est également un argument majeur en faveur de ces produits transformés, en particulier lorsque le risque microbiologique doit être le plus strictement limité. C'est le cas par exemple dans les cuisines des hôpitaux ou des maisons de retraite qui ont pour la plupart choisi d'exclure les œufs en coquille.

Enfin, les ovoproduits offrent également des solutions techniques performantes, adaptées aux différents usages de l'œuf. L'industrie des ovoproduits a en effet développé des technologies qui lui permettent par exemple de proposer du blanc d'œuf à haut pouvoir moussant, du jaune d'œuf qui autorise la pasteurisation des sauces dans lesquelles il est incorporé, ou plus simplement de permettre une conservation plus longue et à température ambiante comme avec l'œuf entier concentré et sucré ou les ovoproduits en poudre. Les poudres jouent ainsi un rôle particulier de régulation du marché. En effet, les élevages de poules pondeuses, mis en place pour répondre au pic de consommation des œufs de table, produisent à certaines périodes de l'année des excédents que la transformation en poudre permet de stocker pour une consommation différée. Les poudres permettent également de développer des marchés spécifiques comme les œufs enrichis (enrichis en DHA par exemple) ou sous certifications (biologique, plein air, kasher, hallal…) en s'affranchissant des contraintes logistiques liées aux petites productions. Enfin, les poudres d'ovoproduits sont aussi bien plus que cela. La maîtrise des procédés permet d'en faire des produits techniques, aux propriétés originales et complémentaires de celles des ovoproduits liquides.

2.2.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets

2.2.2.1. Propriété commerciale

Seuls les œufs de **Catégorie A** peuvent être commercialisés en tant qu'œuf en coquille. Du jour de ponte jusqu'au jour 9, les œufs sont dits « extra-frais ». Du 10ème jour jusqu'au jour 28, les œufs sont dits « frais ». Après 28 jours, les œufs ne sont plus commercialisables. La coquille et la cuticule doivent être propres, intactes et de forme normale. La chambre à air doit présenter une hauteur ne dépassant pas 6 millimètres. Toutefois, pour les œufs commercialisés sous la mention « extra-frais », elle ne doit pas dépasser 4 millimètres. Le jaune doit être visible au mirage sous forme d'ombre seulement, sans contour apparent.

Le blanc doit être clair et translucide, le développement du germe imperceptible et la présence de substances et odeurs étrangères ne sont pas tolérées. **Il est interdit de laver et de nettoyer les œufs de catégorie A, avant et après le tri.**

Un autre critère de commercialisation est la **couleur de la coquille**. En France, les œufs de consommation sont uniquement des œufs bruns, alors qu'à l'échelle mondiale, les œufs blancs sont également consommés. Cette différence de couleur est uniquement génétique et n'affecte pas le goût et les caractéristiques de œufs, mais elle est un critère essentiel de sa commercialisation. En ce qui concerne les ovoproduits, une partie des œufs utilisés sont des œufs blancs. Une majorité de ces œufs sont issus des productions en cages, mais il existe une demande croissante de la part des industriels pour avoir des produits d'œufs issus de poules élevées en plein air, même si le pourcentage n'est pas connu.

Au niveau du centre de tri, les œufs seront calibrés afin d'orienter leur destination (Figure 2.2.9.). Le **poids d'œufs** varie du fait de l'âge de la poule, de moins de 50 g (très jeunes poules) à plus de 80 g (poules très âgées). Les œufs vendus entiers comme œufs de table sont triés en quatre groupes. Le groupe S concerne les petits œufs de 45 à 53 g, le groupe des œufs moyens (M) comprend les œufs de 53 à 63 g, les gros œufs (L) pèsent de 63 à 73 g et les très gros (XL) sont supérieurs à 73 g. Les groupes M et L sont les 2 groupes majoritairement vendus en œufs coquille car ils correspondent aux besoins du consommateur. Les autres groupes servent majoritairement pour obtenir des ovoproduits. La part d'élevage alternatif a beaucoup augmenté depuis la directive européenne de 2012 (Union Européenne, 1999). Le poids d'œuf est très légèrement diminué (1-2%) en élevage au sol par rapport à l'élevage en cage (Nys *et al.*, 2018).

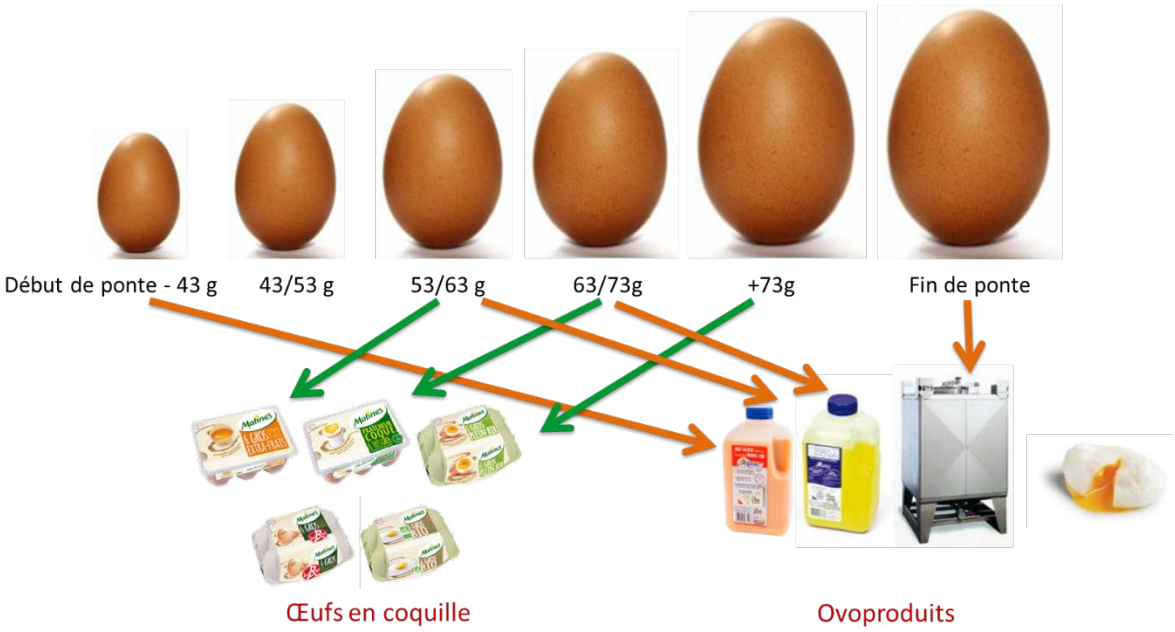


Figure 2.2.9. Quels œufs pour quelles utilisations ? (Nys *et al.*, 2018).

Le temps de stockage de l'œuf est un élément important de la qualité des œufs et de sa commercialisation. La fonction biologique naturelle d'un œuf est d'assurer le développement harmonieux d'un poussin à l'extérieur du corps maternel. Aussi l'œuf possède des systèmes naturels de défenses (défense innée passive), qui sont de 3 types. 1) Les défenses physiques sont assurées principalement par la coquille de l'œuf (résistante aux chocs et impénétrables aux micro-organismes si elle reste intacte), la viscosité du blanc d'œuf qui limite la mobilité des bactéries et la membrane vitelline qui protège le jaune d'œuf. 2) Les défenses moléculaires sont assurées par les très nombreuses molécules antimicrobiennes présentes dans tous les compartiments de l'œuf, mais particulièrement actives dans le blanc d'œuf (Gautron *et al.*, 2011).

L'œuf est un ingrédient qui se conserve naturellement à température ambiante. Les revendeurs doivent maintenir les œufs à température ambiante pour éviter des condensations à la surface de la coquille qui pourraient créer des points de pénétration à l'intérieur de l'œuf. Toutefois, des échanges gazeux se produisant entre l'intérieur de l'œuf et l'atmosphère, vont modifier les défenses naturelles de l'œuf. Ainsi le pH et la viscosité du blanc sont des systèmes de protection agissant directement sur les microorganismes en inhibant par exemple les Salmonelles ou modulant l'activité antimicrobienne du lysozyme ou l'activité chélatrice de l'ovotransferrine du blanc selon le pH et plus généralement en agissant sur la mobilité cellulaire des bactéries pour réduire la virulence bactérienne. La capacité des bactéries de se développer dans le blanc d'œuf peut donc évoluer positivement ou négativement en réponse à ces variations qui sont fonction du pH et aussi de l'âge de la poule. Ainsi,

il a été montré que la croissance des Salmonelles était plus élevée dans du blanc d'œuf frais que dans des blancs stockés quelques jours à 20°°C. A l'opposé une conservation à 37°°C altère rapidement les systèmes de défenses antibactériens du blanc (Rehault-Godbert *et al.*, 2010). Des observations analogues ont été faites avec d'autres bactéries.

Si la coquille n'évolue pas au cours du stockage de l'œuf, la viscosité du blanc, son pH et la solidité de la membrane vitelline vont être grandement modifiés lors de la conservation de l'œuf (Gautron *et al.*, 2019). L'augmentation du pH observé après la ponte a des incidences positives sur certaines propriétés technologiques de l'œuf (capacité moussante du blanc, écalage des œufs durs…), mais fragilisent la solidité de la membrane vitelline qui est un critère technologique crucial de l'industrie des ovoproduits afin d'éviter tout mélange de blanc et de jaune (Guyot *et al.*, 2016). Il n'y a pas d'effet du système de production sur ces facteurs. Les facteurs influençant la qualité de l'œuf après ponte, sont uniquement liés au temps et à la température de stockage des œufs, ainsi qu'à l'âge de la poule. En effet, une poule en fin de production possède des coquilles plus fragiles et poreuses et donc des propriétés physico-chimiques du blanc, affectées.

2.2.2.2.Propriété sanitaire

Le rôle des œufs dans les prévalences de toxi-infections humaines a été très largement exploré et a fait l'objet de nombreuses publications. En France, les œufs représentent 30% des TIAC à **salmonelles** sur la période 2001-2015 alors qu'ils représentaient plus de 60% sur la période 2006-2010. Ces TIACS sont principalement associées à la consommation de produits réalisés à partir d'œufs crus ou peu cuits (Anses, 2018a). Le serovar Enteritidis est un des sérovars de Salmonella les plus concernés par la contamination des œufs (transmission verticale). L'incidence de ces contaminations a diminué jusqu'en 2013, grâce l'élimination systématique des troupeaux contaminés, mais aussi à une meilleure maîtrise de l'hygiène et des contrôles (Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019). Le nombre de cas de salmonellose humaine dans l'Union européenne a tendance à augmenter depuis 2014 (Efsa et Efsa Ctr Dis Prevention Control, 2018). L'une des raisons avancées pourrait être l'augmentation de la prévalence de *Salmonella* Enteritidis chez les poules pondeuses d'environ 17% en 2015 vs. 2014 et de 57% en 2016 vs. 2015 (De Cesare, 2018). La contamination horizontale est possible lorsque l'œuf est pondu et du fait qu'il soit utilisé comme ingrédient cru dans de nombreuses préparations culinaires (type mayonnaise…). Une crainte lors de la directive de 1999 a été qu'il y ait une résurgence de toxi-infections du fait des nouveaux modes d'élevage. Les œufs issus d'élevages au sol et volières présentent en général plus de bactéries aérobies en surface de l'œuf (Englmaierova *et al.*, 2014 ; Samiullah *et al.*, 2014), mais les différences sont faibles et l'effet éleveur semble plus important que le mode de production (Mallet *et al.*, 2010). Un des facteurs déterminants serait la densité qui permettrait la propagation. Il n'est pas démontré actuellement que le risque *Salmonella* soit plus important dans un système (Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019). Ce risque dépend plus de la densité et de la taille des élevages, ainsi que des pratiques d'hygiènes de l'éleveur (Huneau-Salaun *et al.*, 2010). L'EFSA, suite à une analyse détaillée, recommande que les futurs programmes de surveillance enregistrent le type de logement des poules pondeuses afin de permettre l'évaluation de son impact sur la présence de salmonelles (Efsa Panel Biological Hazards *et al.*, 2019).

La prévalence estimée aux **allergies à l'œuf** est de 1,6 à 3,2% et elle est considérée comme la seconde cause d'allergies alimentaires chez les enfants (Sampson, 2004). L'épidémiologie de l'œuf et des constituants responsable dans l'œuf ont été largement décrits dans de nombreuses études. C'est une allergie qui se développe dès les 2 premières années de vie de l'enfant et qui est majoritairement développés avant 5 ans, même si des cas plus tardifs peuvent survenir (Mine et Yang, 2011). Elle se résout la plupart du temps avant l'âge adulte. C'est une allergie importante, car les allergies à l'arachide, au lait et aux œufs représentent plus de 80% des allergies de l'enfant (Mine et Yang, 2011). Les études rapportant le seuil d'allergènes pour avoir une réaction clinique indiquent que 16% des individus allergiques ont un seuil positif pour 65 mg de produit sec d'œuf, et 0,8% pour des seuils inférieurs à 10 mg de matière sèche d'œufs (Morisset *et al.*, 2003 *in* Mine et Yang (2011).

Les travaux ayant caractérisé la contamination des œufs dans la bibliographie portent sur 5 types de système d'élevage :

- « Conventional » (cage mentionnée ou par défaut) ;
- « Barn » (conventionnel au sol) ;
- « Free range » (conventionnel avec accès à un parcours) ;
- « Organic » (bio avec parcours) ;
- et « Home-produced » (variable).

Les travaux les mieux renseignés concernent les polluants organiques persistants avec principalement deux familles : les dioxines furanes (ou PCDD/F) et les polychlorobiphényles (ou PCB). Viennent ensuite les pesticides organochlorés (OCP), des composés bromés (PBDE, HBCD) et fluorés (PFOS PFAS). Pour les éléments traces métalliques (ETM), ce sont principalement As, Cd, Pb et Zn qui sont le plus fréquemment cités, seul le plomb (Pb) ressort comme élément retenu à la fois pour le risque et comme sensible au mode d'élevage.

De manière générale plusieurs voies de contamination de l'œuf coexistent.

Les enjeux sur la sécurité chimique de l'œuf sont devenus prégnants en Europe au début des années 90, lorsque des composés comme les dioxines ont été suivies dans l'alimentation. Les incinérateurs (de déchets ménagers ou industriels) sans traitement des fumées ont alors été identifiés comme une des sources les plus répandues pour la contamination de l'environnement extérieur avec des répercussions sur les œufs de particuliers, la viande et le lait produit à proximité. Au cours des évaluations de risque sanitaire d'origine chimique, le modèle d'autoconsommation chez les riverains de ces structures est celui qui conduit aux expositions les plus fortes et pose des questions de santé publique (InVS-AFSSA, 2003 ; InVS, 2008). C'est ce qui explique l'attention portée par la recherche sur ces systèmes malgré les faibles volumes de production au regard des filières professionnelles.

La science de l'évaluation du risque alimentaire se développant, des normes sont fixées dans les produits, ainsi que des valeurs toxicologiques de référence (VTR), valeurs d'exposition humaine à ne pas dépasser de type Dose Journalière Tolérable (DJT). Au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données toxicologiques nouvelles, ces VTR ont évolué à plusieurs reprises entre 1992 et aujourd'hui, pour les familles des PCDD/F et des PCB (synthèse dans le rapport Anses (2011b)).

Deux phénomènes vont accentuer la pression sur l'œuf. Le premier est dû à la crise belge dite du poulet à la dioxine (appellation impropre car il s'agit majoritairement de PCB). Cette crise montre l'importance de la maîtrise de l'alimentation. En effet la contamination est due à l'utilisation d'huiles recyclées contenant des PCB pour la fabrication d'aliments composés (Bernard *et al.*, 2002). La taille des usines de fabrication d'aliment a généré d'importants volumes ce qui a entraîné la contamination de très nombreux élevages. Les autorités européennes vont alors mettre en place des valeurs limites et instaurer un contrôle régulier, applicable au niveau national. Les données sont ensuite centralisées par l'EFSA, à même de réaliser des synthèses à l'échelle européenne (Efsa (2010 ; ; Efsa Panel Contaminants Food Chain, 2018)). Cette crise, suivie par de plus récentes, montre la première voie de contamination : une contamination de l'aliment formulé.

Le deuxième phénomène provient de l'essor des productions dites alternatives en élevage de ponte, plébiscité par les consommateurs pour l'amélioration du bien-être animal. En effet, ce développement combiné au réseau de surveillance montre rapidement une différence de niveaux de contamination entre les élevages ayant accès à un parcours et ceux en claustration (Lovett *et al.*, 1998). Les chercheurs belges au travers du projet CONTEGG, confirment une contamination accrue dans les systèmes « free range » organic ou non, avec un paroxysme dans les élevages de particuliers (Van Overmeire *et al.*, 2009 ; Windal *et al.*, 2009). Ainsi la plupart des échantillons européens qui dépassent les limites maximales fixées pour les œufs (quand elles existent) sont issus soit d'élevages de particuliers, soit professionnels avec accès à un parcours (tableaux 6a, 6b, 6c). Dans certaines séries de données, c'est jusqu'à 10% de ces œufs qui dépassent les limites.

Il y a donc en Europe, un effet clairement démontré du système d'élevage sur la contamination des œufs pour les contaminants les plus surveillés PCDD/F et PCB. Ceci se traduit par des valeurs moyennes supérieures à celles des systèmes conventionnels, et par une plus forte variabilité (tableaux 6a, 6b). C'est donc une deuxième source de contamination qui est démontrée : la contamination de l'environnement immédiat.

Il faut noter que ces observations ne sont pas vérifiées dans certains travaux au Canada (Rawn *et al.*, 2012), en Irlande (Irish Food Safety Authority, 2004) ou dans les îles Canaries (Luzardo *et al.*, 2013). Le point commun de ces 3 exceptions est l'absence d'industries lourdes anciennes qui fait que le milieu d'élevage en plein air est peu contaminé (Irish Food Safety Authority, 2004). A l'inverse, dans les pays asiatiques et plus particulièrement dans les régions où les activités de recyclage de déchets correspondent à des hot spots de contamination, les teneurs en POP peuvent être très importantes dans les œufs (Hoang *et al.*, 2014 ; Huang *et al.*, 2018a ; Kudryavtseva *et al.*, 2015 ; Labunska *et al.*, 2013 ; Zheng *et al.*, 2012). De même l'activité industrielle et la politique d'incinération des déchets, en Europe de l'Ouest industrialisée explique la contamination des parcours en Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Pologne, Italie ou France (Brambilla *et al.*, 2009 ; Covaci *et al.*, 2009 ; Kijlstra, 2005 ; Lovett *et al.*, 1998 ; Piskorska-Pliszczynska *et al.*, 2014), (Piskorska-Pliszczynska *et al.*, 2016)[14] ; (Pirard *et al.*, 2005 ;

[14] Piskorska-Pliszczynska, J.; Strucinski, P.; Mikolajczyk, S.; Maszewski, S.; Rachubik, J.; Pajurek, M., 2016. Pentachlorophenol from an old henhouse as a dioxin source in eggs and related human exposure. *Environmental Pollution*, 208: 404-412. <Go to ISI>://WOS:000368306500012

Roszko *et al.*, 2014 ; Schoeters et Hoogenboom, 2006 ; Squadrone *et al.*, 2015 ; Van Overmeire *et al.*, 2009 ; Windal *et al.*, 2009). Ce lien entre la contamination des œufs et celle de l'environnement s'explique par le fait que les poules explorent leur parcours et peuvent ingérer diverses matrices environnementales : végétaux, sol, pédofaune ou eau et matières en suspension (De Vries *et al.*, 2006 ; Horsted *et al.*, 2006 ; Jondreville *et al.*, 2011 ; Waegeneers *et al.*, 2009). De manière générale, le sol et les sédiments sont considérés comme un compartiment réservoir pour les POP et les ETM, leur contamination peut ainsi avoir une origine très ancienne (mines de plomb datant de l'époque romaine ou usine fermée quelques décennies auparavant). Les ETM peuvent être transférés du sol aux végétaux, tandis que les POP, peu absorbés, contaminent majoritairement les végétaux par dépôt aérien. Pour les parcours de particuliers, le « fond de jardin » est souvent le lieu de brûlage ou d'entreposage de déchets (Grace et MacFarlane, 2016) ; (Hoogenboom *et al.*, 2016) ; (Sorensen *et al.*, 2014), mais peut aussi être lié à la proximité des sources émettrices extérieures, notamment en milieu périurbain.

Les différences entre systèmes en claustration et sur parcours ne sont pas systématiques. Lorsque l'analyse porte sur la valeur médiane dans l'œuf, les écarts sont réduits voire inexistants (Roszko *et al.*, 2014). Ceci signifie que l'accès à un parcours n'est qu'un facteur de sensibilité. Un lien avec la teneur dans le sol est démontré pour les PCDD/F, PCB, PBDE (Harnly *et al.*, 2000 ; Hoogenboom *et al.*, 2016 ; Pirard *et al.*, 2005 ; Piskorska-Pliszczynska *et al.*, 2014 ; Waegeneers *et al.*, 2009) ou le plomb (Grace et MacFarlane, 2016 ; Spliethoff *et al.*, 2014). Une des préconisations retenues pour la gestion du risque en élevage urbain comme en élevage professionnel, serait de réaliser un diagnostic de l'environnement avant l'installation de l'élevage, incluant activités émettrices à proximité, présentes ou passées.

Enfin, la contamination par l'environnement immédiat peut aussi être avérée sans présence de parcours, du fait de l'environnement intérieur et des matériaux au contact (figure 2.2.10). Ainsi pour des élevages en ponte au sol, la présence de structures en bois traité au pentachlorophénol ou de litières issues de matières recyclées contaminées peut engendrer une contamination des œufs en PCDD/F (Brambilla *et al.*, 2009 ; Harnly *et al.*, 2000). De la même façon pour l'HBCD, une suspicion d'ingestion de matériaux dégradés serait un facteur d'explication des outliers identifiés dans les plans de contrôle et de surveillance nationaux (Jondreville *et al.*, 2017).

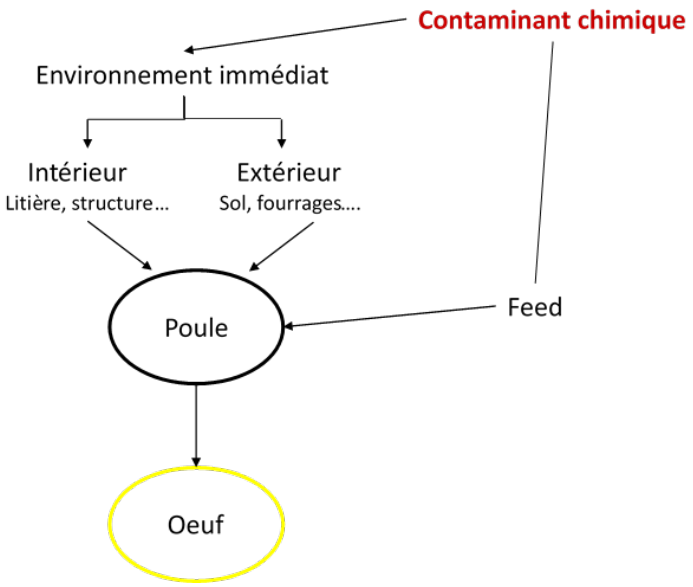


Figure 2.2.10. Voies d'entrée des contaminants chimiques vers l'œuf

Il est difficile de hiérarchiser les facteurs qui amplifient la contamination des œufs lorsque les animaux ont accès à un parcours. En effet il y a de nombreuses interactions entre les facteurs pas toujours intuitives (figure 2.2.11.). Par exemple un troupeau de grande taille induit une exploration du parcours moins importante en moyenne, mais une densité trop forte peut dégrader le couvert végétal, augmenter la part de sol nu et donc l'ingestion de sol (Kijlstra *et al.*, 2007 ; Waegeneers *et al.*, 2009). La nature du couvert (type de végétal) peut influencer l'ingestion de fourrage, mais en interaction avec un déséquilibre alimentaire. Celui-ci augmente également les comportements d'ingestion de sol et probablement de pédofaune (Jondreville *et al.*, 2011).

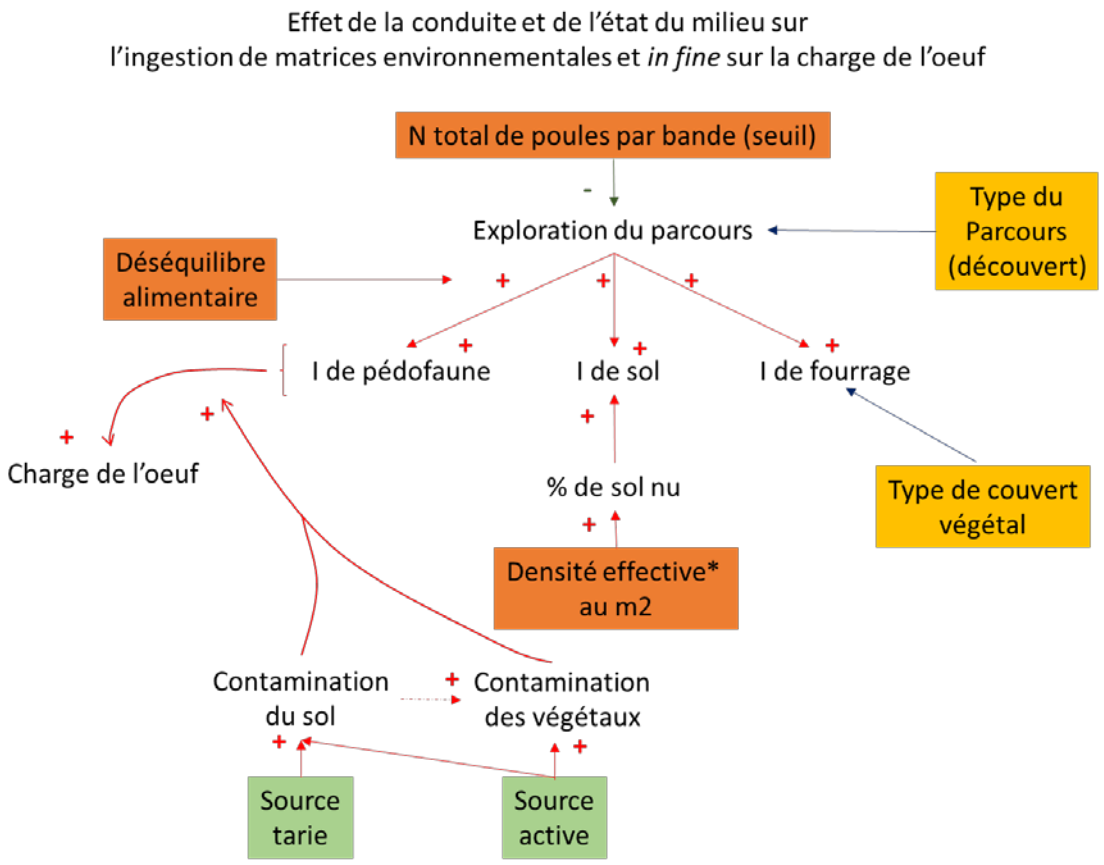


Figure 2.2.11. Effet de la conduite et de l'état du milieu sur l'ingestion de matrices environnementales et *in fine* sur la charge de l'œuf

Un autre paramètre rentre en ligne de compte, c'est la conduite du troupeau qui influence soit le comportement exploratoire, soit l'intensité de ponte.

En effet, la contamination de l'œuf peut, pour une même exposition de l'animal, être modulée par des paramètres zootechniques. Cette influence a été démontrée dans des expérimentations en conditions contrôlées et sont difficilement utilisables pour interpréter les données de contamination terrain compte-tenu des nombreuses interactions ou imprécisions dans la description des conditions tant environnementales que zootechniques (figure 2.2.12.).

Les polluants ciblés sont des polluants bioaccumulables, ce qui signifie que la teneur corporelle augmente avec le temps d'exposition jusqu'à un plateau (appelé steady-state), où la teneur dans tous les tissus est considérée comme à l'équilibre. Cet équilibre est atteint lorsque les entrées (exposition) sont égales aux sorties, c'est-à-dire par biotransformation, élimination, soit excrétion notamment via l'œuf. Plus les sorties sont importantes, moins la teneur au plateau est élevée, et donc l'œuf contaminé. Les polluants d'intérêt sont peu biotransformés, d'où une bioaccumulation et un temps d'arrivée à l'équilibre élevés. Leur accumulation dans les tissus diffèrent, le plomb est accumulé dans le foie et les os, les PCDD/F et PCB dans le foie, les tissus adipeux, et dans une moindre mesure dans les muscles (cette distribution varie avec les congénères). Pour les polluants lipophiles, l'œuf est alimenté par les acides gras, soit alimentaires, soit remobilisés depuis les tissus. La particularité de l'œuf est qu'il capte ces polluants moins que le foie, mais davantage que les muscles ou la graisse corporelle. La physiologie de la poule va jouer sur ces transferts (figure 2.2.12.). Lorsque l'intensité de ponte est élevée, la poule excrète une forte quantité de matière grasse, qui exporte simultanément le polluant lipophile (PCDD/F, PCB). Cette sortie élevée réduit donc le niveau du plateau, et donc le niveau dans l'œuf. Si le contaminant est apporté par l'aliment formulé, un IC élevé pour un niveau de ponte donné induit une entrée supérieure pour une sortie de MG égale, donc un niveau plus élevé à l'équilibre. De même, un âge à la première ponte plus élevé, ou l'arrêt de ponte lors de la mue entraînent une bioaccumulation supérieure des PCDD/F ou PCB. Le génotype et la conduite zootechnique associée influent donc sur le niveau de contamination de l'œuf pour des entrées équivalentes. Schématiquement une poule haute productrice lors d'un seul cycle sans mue, produira un œuf moins contaminé que son homologue ayant démarré sa première ponte 2 à 3 semaines plus tard, et entamant un deuxième cycle de ponte.

Ceci expliquerait la sensibilité plus grande des systèmes extensifs à la contamination du milieu. Néanmoins c'est surtout dans les élevages de particuliers où ces critères zootechniques sont franchement divergents (génotype x conduite) que les conséquences sur la contamination sont unanimement admises. Il n'est pas évident que le delta observé entre les élevages professionnels les plus performants, et les plus extensifs permette d'expliquer la totalité des variations de contamination observées sur le terrain.

D'autres facteurs biotechniques peuvent venir complexifier ce schéma mais ne sont pas représentés ici. Le premier type renvoie à la biodisponibilité des contaminants véhiculés par les différentes matrices ingérées (aliment, sol, végétaux, pédofaune, matériaux). Même si pour les POP plusieurs articles montrent une mobilisation importante (Fournier *et al.*, 2012 ; Jondreville *et al.*, 2013), la matière organique peut moduler leur biodisponibilité. Pour les ETM, l'origine de la contamination peut avoir un effet très significatif, comme démontré chez un autre modèle monogastrique : le porcelet (Denys *et al.*, 2012). Le deuxième type correspond à l'interaction du contaminant avec la physiologie de l'animal (absorption, métabolisme, distribution, excrétion). Elle dépend des propriétés du contaminant, y compris au sein d'une même famille (par exemple les PCB plus ou moins métabolisés suivant leur site d'halogénation). Cette complexité ne permet donc pas de dresser un état des lieux exhaustif et générique.

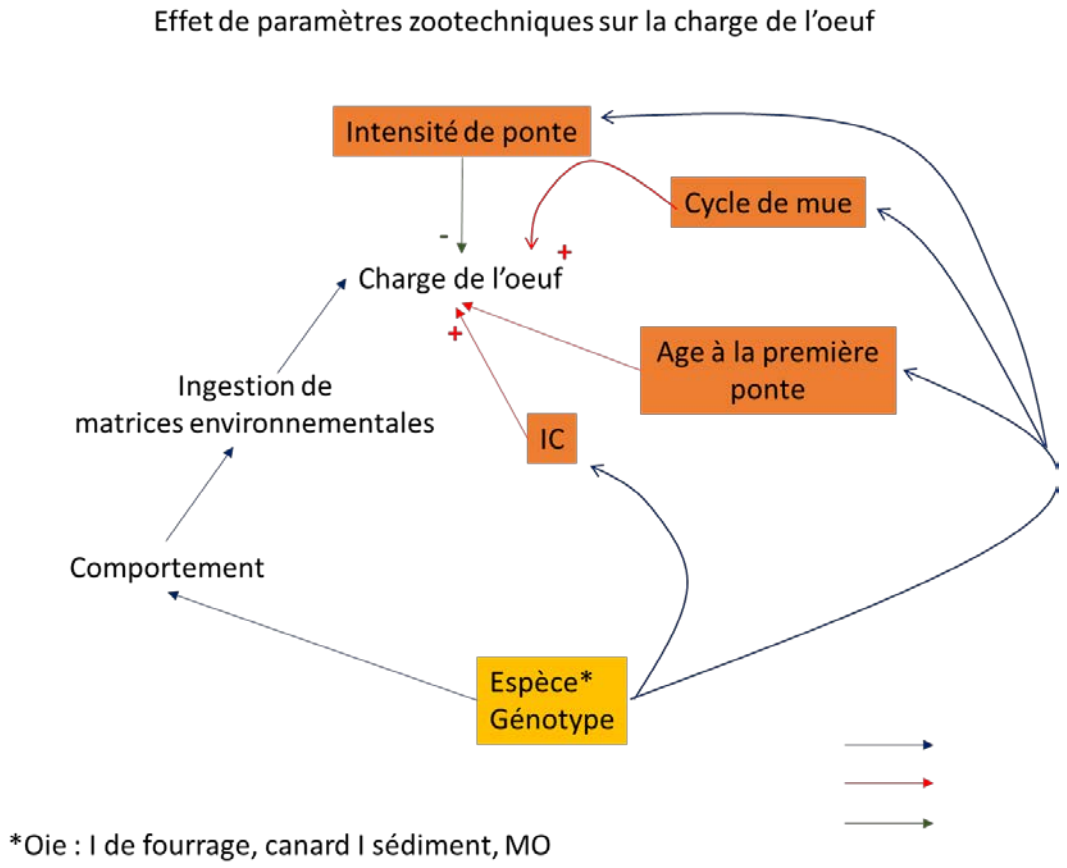


Figure 2.2.12. Effet des paramètres zootechniques sur la charge de l'œuf

L'influence du type de système de production d'œufs sur la contamination des œufs par les POP est démontrée. Les voies d'entrée des POP diffèrent suivant les systèmes, mais demeurent avant tout des voies potentielles d'exposition pour lesquelles il existe un gradient en fonction des systèmes (Figure 2.2.13). Cette sensibilité peut être exacerbée par des facteurs zootechniques, propres à chaque système. C'est ce qui explique des médianes assez proches entre systèmes alors que les moyennes divergent (tableaux 6a, 6d), tirées vers le haut par les percentiles élevés (tableaux 2.2.1a et b). Cela signifie que pour un système donné, il existe des élevages au sein desquels l'ensemble des facteurs converge vers une hausse de l'exposition des poules et du transfert vers l'œuf. C'est parmi ces systèmes que les dépassements sont le plus fréquemment observés (tableau 2.2.1c). De manière générale pour les polluants bioaccumulables étudiés, toute dégradation des performances de ponte accroit la contamination de l'œuf. En effet, paradoxalement celui-ci étant la voie de sortie majeure de l'organisme, plus la ponte est intense moins l'organisme accumule.

Les niveaux de contamination ne sont donc pas intrinsèquement liés aux systèmes mais résultent de 3 niveaux d'interaction : nombres de voies d'exposition, niveau de contamination de chacune d'elles et performances zootechniques du troupeau.

Au-delà des contaminants étudiés, il n'est pas aisé d'attribuer à la production biologique une moindre sensibilité aux contaminants chimiques autorisés (pesticides ou biocides), car si la palette de produits est moins large, les problèmes relevés en production conventionnelle (crise fipronil, antibiotiques…) sont très peu fréquents et liés à des mésusages soit au sein de l'élevage, soit dans la production ou la transformation des matières premières utilisées en alimentation animale.

Tableau2.2.1a. Contamination des œufs en PCDD/F + PCB-DL exprimée en pgTEQ.g^{-1} lipides en fonction des systèmes d'élevage des poules pondeuses (Efsa, 2012)

Type de système*	N	Moyenne (pgTEQ.g^{-1} lipides)	P50	P95	Différence sur la moyenne¤
Batterie	30	0,18	0,04	0,8	a
En liberté	89	0,69	0,23	3,2	b
AB	91	1,68	1,02	5,0	c
Ponte au sol avec jardin d'hiver	61	1,77	0,67	5,1	c

* : battery, free-range, organic, outdoor growing production (wintergarden)
¤ : $p < 0,05$

Tableau 2.2.1b. Contamination des œufs en PCDD/F + PCB-DL exprimée en pgTEQ.g^{-1} lipides en fonction des systèmes d'élevage des poules pondeuses (Efsa Panel Contaminants Food Chain, 2018)

Type de système*	N	Moyenne (pgTEQ.g^{-1} lipides)	P50	P95
Batterie	102	0,2	0,12	0,.50
En liberté	524	0,58	0,16	2,41
AB	419	1,18	0,62	3,68
Ponte au sol avec jardin d'hiver	412	1,58	0,36	5,12
Non AB ¤	*125*	*1,35*	*0,37*	*5,25*
Traditionnel ¤	*37*	*0,57*	*0,18*	-
Domestique ¤	*21*	*0,18*	*0,1*	-
Non renseigné ¤	983	1,39	0,3	4,6
Ensemble	2 338	1,18	-	4,32

* : battery, free-range, organic, outdoor growing production (wintergarden) tel que définis dans le tableau 2.2.1a
¤ : non discuté car mal défini

Tableau 2.2.1c. Contamination des œufs en PCDD/F + PCB-DL exprimée en pgTEQ.g^{-1} lipides en fonction du système d'élevage des poules pondeuses en Pologne (Piskorska-Pliszczynska *et al.*, 2014) ; (Piskorska *et al.*, 2018 https://www.wageningenacademic.com/doi/10.3920/978-90-8686-877-3_17) ;

Type de système*	N	Moyenne (pgTEQ.g^{-1} lipides)	ec	Pourcentage de dépassement de la limite réglementaire
Batterie	83	0,78	0,40	0
En liberté	137	1,60	2,84	7
AB	42	1,57	1,45	10

Tableau 2.2.1d. Contamination des œufs en PCDD/F + PCB-DL et en PCB-NDL en système d'élevage conventionnel ou free-range en Pologne (Roszko *et al.*, 2014)

Contaminant	Type élevage	n	moyenne	médiane	SD
PCB-NDL	Free range	20	3 925	509	10 204
(pg.g^{-1} fat)	Conventional	19	475	469	252
PCDD/Fs & PCB-DL	Free range	20	2,7	0,8	3,9
(pgTEQ.g^{-1} lipides)	Conventional	19	1,0	0,5	1,0

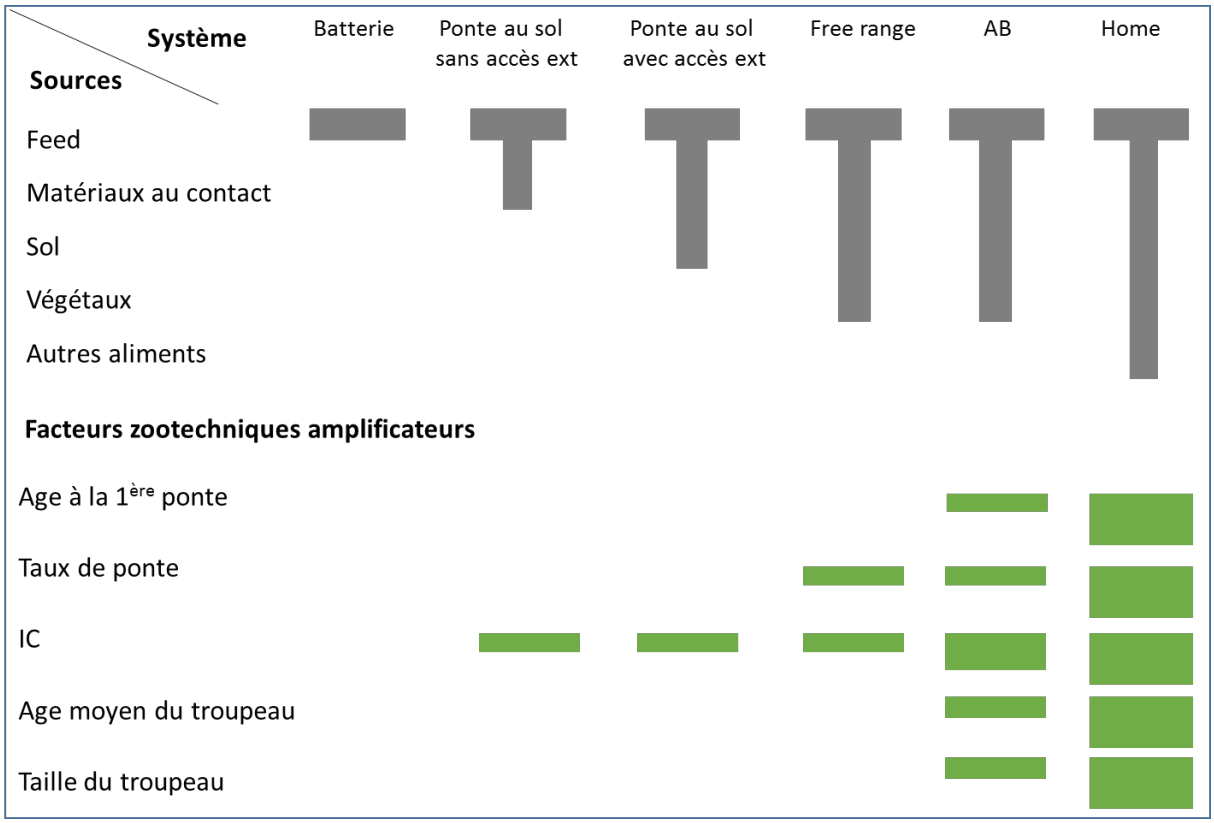


Figure 2.2.13. Synthèse des voies d'exposition aux POP en fonction du système et facteurs zootechniques augmentant la teneur dans l'œuf pour une exposition identique

2.2.2.3. Propriété d'usage

L'utilisation de l'œuf de table en cuisine est facile et très répandue pour réaliser diverses préparations (œufs au plat, mollets, durs, omelettes, pâtisseries, charcuteries, plats cuisinées…). Le blanc est utilisé pour faire des meringues, des mousses etc. Il est utilisé pour ses propriétés foisonnantes. Il peut être cuit (coagulation) ou non. Le jaune est utilisé pour ses propriétés émulsifiantes (mayonnaise, sauces au beurre blanc, crèmes…).

Les propriétés technologiques de l'œuf varient selon l'âge, la température et le stockage de l'œuf (voir qualité commerciale).

Biscuiterie/ pâtisserie/ viennoiserie	Colorant, liant, coagulant, moussant	Moussant, foisonnant, anti-cristallisant	Emulsifiant, colorant, Brillance (dorure)
Confiserie		Anti-cristallisant Foisonnant	Pouvoir aromatique
Glaces	Liant		Emulsifiant
Charcuterie (quenelle)	Liant, émulsifiant		
Pâtes alimentaire	Colorant, liant, pouvoir aromatique		
Mayonnaise/sauces chaudes		Agent de texture	Emulsifiant, agent de texture

Figure 2.2.13. Différentes utilisations en cuisine de l'œuf et des ovoproduits

2.2.2.4.Propriété organoleptique

Les oiseaux ne peuvent pas synthétiser les caroténoïdes qui donnent au jaune sa couleur. Ces pigments présents dans le jaune sont le reflet direct de l'apport alimentaire de la poule. S'ils n'ont pas d'effet sur le goût, ils sont un critère très important de la qualité commerciale d'un œuf, puisque le consommateur veut désormais des jaunes très colorés. Il s'agit donc d'un critère subjectif de l'appétence et de la perception de ce produit. Les poules ne transfèrent pas le bêta-carotène, mais les xanthophylles (caroténoïdes avec un groupement hydrogéné) (Nys, 2000). Leur transfert dans les tissus cibles (graisse, jaunes d'œufs) dépend tout d'abord de la nature du caroténoïde (zéaxanthine, lutéine) et de leur structure (forme cis ou trans ; type d'isomères optiques). Les formes trans mieux utilisées sont dominantes dans les plantes mais la forme cis se développe lors du stockage des matières premières ou des aliments (Nys *et al.*, 2018). Les caroténoïdes sont instables dans le temps, aussi leur stabilité est-il un facteur important de leur utilisation (lors du stockage et du transit dans le tractus digestif antérieur). Les formes de synthèse ou issues d'extraits de plantes sont donc saponifiées puis encapsulées pour les protéger. Le processus technologique de préparation de sources est en permanence adapté pour optimiser l'efficacité des sources de caroténoïdes. Les principales sources naturelles sont le maïs, la luzerne et les extraits de fleurs (soucis, tagètes) pour le jaune, le paprika pour le rouge (Nys *et al.*, 2018). Une coloration jaune-orangée préférée dans de nombreux pays est obtenue par combinaison de 10-15 mg/kg de caroténoïdes jaunes combinés avec 1-3 mg de caroténoïdes rouges (Nys *et al.*, 2018).

Les pigments de l'œuf sont liposolubles et se concentrent dans le jaune d'œuf et sont directement dépendants de l'alimentation de la poule. Le système d'élevage n'affectera ce paramètre que dans la mesure où cet élevage est associé à un apport particulier alimentaire. Par exemple, les poules ayant un accès à un parcours extérieur ingèreront de l'herbe, source de pigments et pouvant être à l'origine d'un changement de coloration (Hammershoj et Johansen, 2016). Toutefois, la lutéine apportée par l'herbe peut tout aussi bien être fournie par du maïs utilisé dans tous les types de productions. C'est pourquoi dans la littérature, les résultats sur l'influence du système d'élevage sur la composition de l'œuf, dont la couleur du jaune, sont inconstants et très variables (Dvorak *et al.*, 2010 ; Nys *et al.*, 2018). Il est aussi à noter que la règlementation liée au cahier des charges d'un système de production peut influencer cette composition. Par exemple, la cantaxanthine (pigment rouge) est interdite en élevage biologique, de ce fait les jaunes issus de ces œufs sont souvent moins orangés que pour les autres systèmes. Ainsi, les œufs issus de l'agriculture biologique sont souvent moins colorés que les œufs issus des autres systèmes.

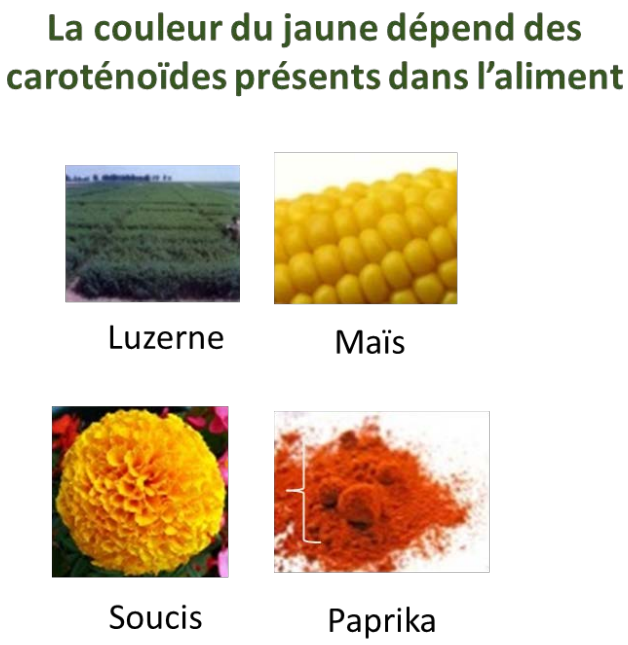


Figure 2.2.14. Principaux ingrédients végétaux responsables de la couleur du jaune d'œuf

La flaveur de l'œuf est un sujet vaste qui a fait l'objet de nombreuses publications par le passé. A titre d'exemple, Maga (1982) explore les différentes sources de variabilités de la flaveur de l'œuf et des produits d'œufs. Il décrit une liste de plus de 50 composés volatiles répertoriés dans l'œuf cuit (Maga, 1982). La flaveur la plus étudiée est celle de poisson dans les œufs associés à une ration contenant des produits de poisson ou du colza. Cette odeur est associée à un taux de triméthylamine (TMA) supérieur à quelques microgrammes dans l'œuf (Honkatukia *et al.*, 2013). Cette odeur est désormais très contrôlée par les nutritionnistes. Toutefois, certaines souches de poules y sont plus sensibles. En effet, cette odeur de poisson est liée à une mutation (A en T en position 1034) du gène FMO3 chez la poule (Wang *et al.*, 2013). D'autre part, l'interaction génotype-nutrition est un facteur important de cette odeur (Wang *et al.*, 2013). Ce risque est bien maitrisé dans les élevages commerciaux et reste encore présent dans les élevages familiaux. Par ailleurs, même si l'effet n'est pas dépendant directement du système d'élevage, les poules qui ont accès à un parcours extérieur peuvent consommer des matières premières pouvant parfois apporter ce type de défaut.

La flaveur peut aussi être liée au taux d'oméga-3 dans le jaune et doit être contrôlée pour les œufs enrichis notamment. Ainsi l'apport d'huile de lin doit être limitée à 10% et à moins de 2% d'huile de poisson pour éviter l'apparition de goût désagréable (Sirri et Meluzzi, 2011).

2.2.2.5.Propriété nutritionnelle

L'œuf est un aliment complet peu calorique et hautement digestible. Un œuf apporte 75 Kcal hautement digestibles et parfaitement équilibrées. La composition globale de l'œuf est décrite dans de nombreuses revues (Nys *et al.*, 2018 ; Nys et Sauveur, 2004 ; Rehault-Godbert *et al.*, 2019; Seuss-Baum *et al.*, 2011). En moyenne, un œuf contient 60% de blanc, 30% de jaune et 10% de coquille.

Ces caractéristiques résumées dans le tableau ci-après sont les suivantes. Elles sont données pour 100 g, soit environ 2 œufs de 55 grammes :

Calories : 154 Kcal (47 pour le blanc, 364 pour le jaune)

Protéines totales : 12,3 g (jaune+ blanc). Leur valeur biologique (94) est élevée, sachant que 100 est la valeur max et que les valeurs du lait maternel et du lait vache sont de 95 et de 90 respectivement.

Lipides totaux : 11,9 g contenus dans le jaune uniquement

- richesse en phospholipides : 31% (soit 3,4 g)

- majorité d'acides gras insaturés

- cholestérol : 0,42 g (1,2 g/100 g de jaune)

- forte digestibilité : 98% Triglycérides, 90% Phospholipides

Vitamines :

- Dans le jaune, présence des vitamines A, D, E, B1, B6, B12 et biotine, soit toutes les vitamines sauf la vitamine C.

- Dans le blanc, présence de biotine, de vitamine B2, d'acide folique et de niacine

Minéraux : phosphore, fer et soufre (0,9 g par œuf)

Richesse en eau (74,4 pour 100 g d'œuf)

Peu de sucres (0,7 g par œuf)

Tableau 2.2.2. Composition du blanc, du jaune et de l'œuf entier (g/100 g)

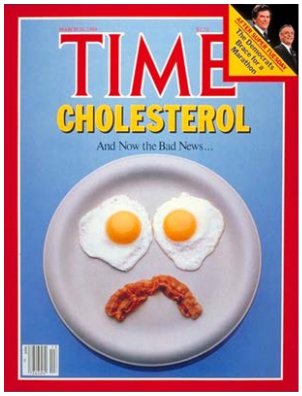
	Blanc	Jaune	Œuf entier
eau	88,6	49	74,4
protéine	10,6	16,1	12,3
sucre	0,8	0,5	0,7
Lipides	0,1	34,5	11,9
Cendres	0,5	1,6	0,9
Calories (Kcal)	47	364	154
Vitamines	B2, Niacin, Folacin	A, D, E, B1, Biotin, B6, 12	

La composition du blanc et du jaune sont très différentes. Le blanc est une solution saline comprenant 11% de protéines, tandis que le jaune contient 50% d'eau, 16% de protéines et 34 % de lipides. Il existe une très grande stabilité des constituants majeurs de l'œuf. La composition de l'œuf est principalement modulée par le rapport blanc/jaune qui dépend de l'origine génétique des animaux et surtout de l'âge de la poule. En effet, en début de cycle de production, un œuf de poule contient 23% de jaune et ce pourcentage augmente à plus de 28% en fin de production.

Une modification de la teneur en protéines et/ou des acides aminés essentiels dans l'alimentation de la poule aura un rôle très modéré et son impact sur la valeur nutritionnelle est faible (Nys *et al.*, 2018). La composition globale en lipides de l'œuf est très stable comme pour ses protéines. Les lipides du jaune représentent 35% du jaune frais et sont associés aux protéines. Ces lipides sont composés de 65% de triglycérides, 31% de phospholipides et 4% de cholestérol. Si la proportion d'acides gras saturés-insaturés est stable dans l'œuf, le profil en acide gras est quant à lui, très variable et dépendant de l'alimentation de la poule quelles que soient les modalités d'élevage des poules pondeuses. La composition en acides gras insaturés du jaune d'œuf est directement dépendante de l'apport en matières premières riches en huiles végétales ou animales. Ainsi, l'huile d'olive majore la teneur en acides gras mono-insaturés alors que l'huile de soja favorise les acides gras insaturés de type n-6 connus pour baisser la cholestérolémie. Ainsi, les teneurs en acide arachidonique et docosahexénoïque peuvent être multipliés par 5 à 10 avec des aliments riches en huile de poisson ou riches en AGPI (tournesol, millet, colza, lin). Cette composition en acides gras n'est pas affectée directement par le système d'élevage quand l'alimentation est identique. Le système d'élevage n'affectera celle-ci que dans la mesure où le système d'élevage est associé à un apport particulier de nutriments. Cela explique les résultats très variables et inconsistants de l'influence du système d'élevage sur la composition de l'œuf, puisque l'alimentation des poules dans ces essais est d'une grande diversité.

Œuf et cholestérol : L'œuf est riche en cholestérol (200 mg par jaune) et ce taux est à l'origine d'une mauvaise réputation de ce produit largement relayé par la presse et le monde médical. En 1984, le time magazine titrait en une : « Cholesterol and now the bad news » avec pour illustration, un smiley qui était triste et dont les yeux étaient des œufs au plat (Figure 2.2.15.).

La bouche avec le sourire triste, était réalisée avec un morceau de bacon, mais ce sont les œufs qui seront mis à l'index. La mauvaise réputation de l'œuf était faite. Malgré la nouvelle une du journal 15 ans plus tard, qui représentait un sourire gai fait d'une tranche de melon et des mêmes œufs au plat pour les yeux (« Cholesterol and now the good news »), la réputation de l'œuf reste toujours mauvaise à ce jour.



26 mars 1984

19 juillet 1999

Figure 2.2.15. Unes de *Time magazine* en dates de 1984 et 1999 traduisant la polémique sur le cholestérol dans l'œuf

Cependant, de nombreuses études ont maintenant établi que ce risque lié à l'ingestion de cholestérol est limité, et ce pour la grande majorité de la population capable de réguler un apport alimentaire (Miranda *et al.*, 2015). Les travaux associant cholestérol et risque d'apparitions de maladies cardiovasculaires indique que le taux plasmatique de cholestérol n'est qu'un facteur secondaire par rapport à la consommation d'acides gras saturés, ou d'autres facteurs tels que l'excès de poids corporel (Griffin, 2011 ; Miranda *et al.*, 2015). Par ailleurs, la présence d'une forte teneur en AG mono et polyinsaturés dans l'œuf tend à réduire ce risque (Griffin, 2011 ; Miranda *et al.*, 2015).

Peut-on manger des œufs tous les jours ? Oui si le niveau de cholestérol est normal, on peut consommer de nombreux œufs par jour sans affecter le niveau de cholestérolémie. Si le niveau de cholestérol est élevé, il faut ramener sa consommation à 4 œufs par semaine en diminuant les autres sources de protéines animales et les matières grasses.

Toutefois, il existe une population de personnes en hypercholestérolémie qui ont une déficience enzymatique et qui doivent réduire tous les apports exogènes de cholestérol y compris les œufs. Cette population représente quelques % des personnes avec un taux de cholestérol élevé.

2.2.2.6. Propriété technologique

Les propriétés fonctionnelles des œufs et leurs performances technologiques, sont influencées par différents facteurs, tels que l'âge de la poule, la souche utilisée et l'alimentation (Hammershoj et Qvist, 2001). Il y a peu d'études sur l'influence des systèmes d'élevage sur la qualité technologique des œufs issus de ces poules. Casiraghi *et al*. (2007) ont étudié les propriétés gélifiantes et moussantes du blanc et de l'œuf entier selon l'âge des poules, le système d'élevage ou une composition altérée du blanc, mais les effets observés sont variables et non corrélés au système d'élevage. Rossi *et al*. (2010) ont étudié la viscosité, les propriétés moussantes et de cuisson des œufs entiers liquides pasteurisés, pour analyser l'influence de la qualité hygiénique des œufs crus sur les propriétés fonctionnelles des produits d'œufs. De bonnes qualités hygiéniques de l'œuf cru sont un prérequis indispensable pour avoir des produits d'œufs aux propriétés fonctionnelles performantes. Alamprese *et al*. (2011) ont étudié les effets des systèmes d'élevage et de l'âge des pondeuses sur la qualité des œufs utilisés pour la préparation des pâtes. Lorsque la poule vieillit, la proportion de jaune et de blanc est modifiée résultant en un réseau protéique moins dense chez les pâtes produites avec des œufs issus de poules plus âgées. Le système d'élevage à un petit effet sur la perte en eau de la matière cuite, mais cet effet est si minime qu'il est imperceptible pour le consommateur. Alamprese *et al*. (2012b) ont étudié l'influence de l'âge de la poule et du système d'élevage sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de pâtes fraîches. Seul l'âge de la poule a un effet sur les propriétés des pâtes fraîches. Dans un autre article, Alamprese *et al*. (2012a) ont aussi étudié les propriétés moussantes, gélifiantes et rhéologiques du blanc d'œuf en fonction à la fois de l'âge de la poule et du système d'élevage. Avec l'augmentation de l'âge de la poule, on observe une perte de la consistance du blanc et de la structure du gel du blanc. Le système d'élevage est à l'origine de très faibles interactions significatives qui sont sans effet sur les propriétés technologiques des produits issus de ces œufs. Filipiak–Florkiewicz *et al*.

(2017) ont comparé les propriétés technologiques des œufs issus de cages, bio et enrichis en n-3 et ils n'ont pas observé de différences entre ces groupes.

2.2.2.7. Propriété d'image

Depuis quelques années maintenant, l'élevage est la cible de nombreuses critiques émanant de différents acteurs sociaux et adressés aux filières, aux éleveurs et à la grande et moyenne distribution. L'œuf n'échappe pas à la règle et le mode d'élevage en cages notamment. Van Tilbeurgh (2017) indique que les réponses proposées par les filières ne sont pas adaptées tant qu'elles restent posées en termes d'acceptabilité. Cet auteur ajoute que l'enjeu à venir sera de contribuer avec les différents acteurs de la société, à l'élaboration de nouveaux consensus partagés. Ces controverses en aviculture ont été le centre de multiples interrogations ces dernières années comme en atteste les nombreuses communications faites aux dernières journées de recherches avicoles (Dockes *et al.*, 2017; Sans *et al.*, 2017 ; Van Tilbeurgh, 2017). Comme mentionné précédemment, Les chaînes de GMS et les Hardiscounter se sont clairement positionnés pour un arrêt de la commercialisation des œufs issus de cages d'ici 2025 engendrant des difficultés importantes d'adaptation pour les différents acteurs de la filière.

Dans ce contexte de forte interpellation sociale, différents projets de recherches (CASDAR ACCEPT, Métaprogramme INRA ECOSERV) se sont donnés pour objectif d'éclairer les éleveurs sur les controverses au sujet de l'élevage et pour appréhender la perception des consommateurs (Dockes *et al.*, 2017; Sans *et al.*, 2017). Sans *et al*. (2017) ont notamment soumis 181 consommateurs à un protocole comprenant des enquêtes et des tests d'analyse sensorielle visant à positionner l'œuf issu d'agroforesterie par rapport à l'œuf standard et bio. Pour l'analyse sensorielle, Il existe peu de différences organoleptiques perçues entre les 3 types de productions si le test sensoriel est fait à l'aveugle, mais par contre l'œuf bio ou issu d'agroforesterie est valorisé par rapport au standard si l'origine des œufs est connue. L'enquête socio-économique confirme également ces résultats et l'importance pour le consommateur de la prise en compte de ces aspects.

2.2.3. Produits transformés

2.2.3.1. Définition réglementaire

Au sens de la réglementation européenne, le terme d'ovoproduits ne peut être utilisé que pour des denrées destinées à l'alimentation humaine et résultant « *de la transformation d'œufs ou de leurs différents composants ou mélanges ou d'une nouvelle transformation de ces produits transformés* » (Commission européenne, 2004). La notion de transformation implique une modification substantielle qui ne peut être le simple cassage des œufs ; un traitement thermique (une pasteurisation) est au minimum requis, sans quoi on parlera d'œuf liquide (œuf débarrassé de sa coquille mais sans autre modification ni traitement) et non d'ovoproduit. Quant à la notion de mélange, elle n'est pas clairement définie par la réglementation : doit-on considérer comme ovoproduit tout produit alimentaire contenant de l'œuf ? La limite est dans les faits définie au cas par cas, en fonction de la proportion d'œuf dans le produit en question. Ainsi, alors que personne ne conteste qu'une omelette soit un ovoproduit, personne ne désigne habituellement sous ce terme une viennoiserie contenant de l'œuf.

2.2.3.2. Pourquoi utilise-t-on des ovoproduits ?

Les ovoproduits sont des solutions pratiques, sûres, techniquement performantes et compatibles avec les contraintes des industries alimentaires et de la restauration hors domicile, ces deux secteurs représentant la quasi-totalité des utilisateurs d'ovoproduits en France. Contrairement au consommateur anglo-saxon par exemple, le consommateur français n'est pas encore prêt à abandonner l'œuf en coquille, même si quelques ovoproduits cuisinés sont aujourd'hui disponibles en supermarché, comme des tortillas par exemple.

La praticité est sans doute le critère le plus évident pour les industries alimentaires. En effet, si l'œuf en coquille est simple à conserver et utiliser au niveau ménager, les choses sont différentes dès lors qu'une fabrication met en œuvre des centaines de litres d'ovoproduits. Le cassage des œufs, éventuellement la séparation du blanc et du jaune, requièrent alors des équipements et une technicité spécifiques, qu'il n'est ni simple, ni économiquement efficace d'intégrer au cœur d'une industrie de transformation dont ce n'est pas le métier. Sans compter qu'on peut n'avoir besoin que de jaune ou que de blanc ; les ovoproduits permettent alors d'éviter le gaspillage. En restauration collective, les volumes sont généralement moindres. Les ovoproduits y sont cependant de plus en plus utilisés en raison des gains de main d'œuvre qu'ils permettent.

La sécurité sanitaire offerte par les ovoproduits, traités thermiquement, et dont la qualité est contrôlée, est également un argument majeur en faveur de ces produits transformés, en particulier lorsque le risque microbiologique doit être le plus strictement limité. C'est le cas par exemple dans les cuisines des hôpitaux ou des maisons de retraite qui ont pour la plupart choisi d'exclure les œufs en coquille.

Enfin, les ovoproduits offrent également des solutions techniques performantes, adaptées aux différents usages de l'œuf. L'industrie des ovoproduits a en effet développé des technologies qui lui permettent par exemple de proposer du blanc d'œuf à haut pouvoir moussant, du jaune d'œuf qui autorise la pasteurisation des sauces dans lesquelles il est incorporé, ou plus simplement de permettre une conservation plus longue et à température ambiante comme avec l'œuf entier concentré et sucré ou les ovoproduits en poudre. Les poudres jouent ainsi un rôle particulier de régulation du marché. En effet, les élevages de poules pondeuses, mis en place pour répondre au pic de consommation des œufs de table, produisent à certaines périodes de l'année des excédents que la transformation en poudre permet de stocker pour une consommation différée. Les poudres permettent également de développer des marchés spécifiques comme les œufs enrichis (enrichis en DHA par exemple) ou sous certifications (biologique, plein air, kasher, hallal…) en s'affranchissant des contraintes logistiques liées aux petites productions. Cependant, les poudres d'ovoproduits sont aussi bien plus que cela. La maîtrise des procédés permet d'en faire des produits techniques, aux propriétés originales et complémentaires de celles des ovoproduits liquides.

2.2.3.3. Diversité des ovoproduits et de leurs usages

En 2016, 304 000 t d'ovoproduits ont été fabriqués en France, ce qui correspond à environ 40% des près de 15 milliards d'œufs produits (FranceAgriMer, 2018). On distingue classiquement 2 grandes catégories d'ovoproduits. Les ovoproduits dits de « 1ère transformation » sont le blanc, le jaune et l'œuf entier, pasteurisés et vendus sous forme liquide, concentrée, congelée ou poudre. Ces produits peuvent aussi être salés ou sucrés selon les besoins des utilisateurs. En France, ces ingrédients exclusivement destinés aux industries alimentaires, à la restauration hors domicile et aux artisans (boulangers, pâtissiers, charcutiers, traiteurs) représentent l'essentiel des volumes fabriqués d'ovoproduits (environ 90%). L'industrie produit également des ovoproduits dits de « 2nde transformation » qui sont soit des œufs cuits, soit des ovoproduits additionnés d'autres ingrédients et/ou cuisinés. Ces produits prêts à l'emploi sont destinés au consommateur, mais ils lui parviennent essentiellement via la restauration collective.

Les ovoproduits de 2nde transformation : l'œuf « comme à la maison »

Selon qu'il s'agisse d'œufs cuits (œufs durs, pochés ou frits) ou d'ovoproduits cuisinés (omelettes, œufs brouillés, blanc en neige…), les contraintes hygiéniques associées à ces productions varient quelque peu. Dans le premier cas, la matière première est un produit agricole brut non transformé (œuf coquille) qui n'exige pas d'être conservé à 4°C, alors que dans le second cas, la matière première a déjà été transformée et a notamment subi une étape de pasteurisation (ovoproduit liquide), ce qui impose de la stocker à 4°C et sur une durée limitée.

Parmi tous ces produits, l'œuf dur écalé représente de très loin les plus gros volumes fabriqués. Si le procédé industriel ne fait que reproduire de manière automatisée et à grande échelle la préparation ménagère des œufs durs, il doit permettre de respecter un certain nombre de critères qualité contraignants. Les principaux critères, au-delà de la sécurité microbiologique, sont : (1) que les œufs n'éclatent pas lorsqu'ils sont plongés dans l'eau chaude ou la vapeur, que le jaune cuit soit bien centré et que la coquille puisse être éliminée sans arrachement du blanc, ce qui passe par la maîtrise de la durée de stockage des œufs avant cuisson ; sans que le phénomène soit totalement expliqué, on constate en effet que l'aptitude à l'écalage est directement liée au pH du blanc qui doit être supérieur à 8,5 pour éviter tout problème à ce stade du procédé (Britton et Fletcher, 1987) ; (2) que le jaune soit complètement coagulé, ce qui implique une température à cœur des œufs autour de 85 C (Buay *et al.*, 2006), tout en limitant l'apparition d'un liseré verdâtre constitué de FeS à l'interface entre le blanc et le jaune cuits, ce qui passe par la maîtrise de la durée de cuisson (qui ne doit pas être excessive) et de la vitesse de refroidissement après cuisson (qui doit être rapide).

Après l'œuf dur écalé, l'omelette représente le plus gros tonnage d'ovoproduits élaborés. Mais derrière ce terme d'omelette, on peut trouver, en absence de définition légale ou normative, une grande variété de recettes dans lesquelles l'œuf entier liquide est toujours l'ingrédient principal, mais peut être additionné de lait, de blanc d'œuf, ou encore de garnitures (fromage, lardons, légumes…). Là aussi, les procédés industriels, variés, tentent de reproduire à grande échelle et de manière automatisée la cuisson ménagère. La parfaite maîtrise du barème de cuisson permet d'obtenir la texture plus ou moins onctueuse visée. L'une des difficultés techniques potentiellement rencontrée est le verdissement du produit lors de sa remise en température avant consommation. De même nature (sulfure de fer) que le liseré vert qui se forme à la surface d'un jaune d'œuf dur trop cuit, ce verdissement peut être évité en ajoutant de l'acide citrique à la préparation pour omelette.

Les ovoproduits de 1ère transformation : l'œuf ingrédient

Ovoproduits liquides

Au-delà de la séparation en blanc, jaune et entier, l'industriel ovoproducteur dispose de plusieurs leviers simples pour diversifier son offre et répondre aux demandes de chacun de ses clients. Des mélanges de jaune et de blanc sont ainsi

couramment préparés sur demande pour une teneur en extrait sec différente de celle correspondant au ratio naturel de ces deux parties de l'œuf (24% d'extrait sec).

L'ajout de sel et/ou de sucre est également une pratique courante qui permet de proposer à l'utilisateur un produit pré-formulé. Cela protège également la couleur et les arômes du jaune d'œuf au cours des traitements thermiques, ainsi que ses propriétés émulsifiantes (Campbell *et al.*, 2005). Lorsque les teneurs en sel et/ou sucre sont importantes, les ovoproduits liquides peuvent même offrir des propriétés de conservation particulières du fait d'une Aw d'environ 0,85. Du jaune salé à 10% ou sucré à 50%, de même que de l'entier concentré (facteur de concentration volumique d'environ 2) salé ou sucré, disponibles sur le marché, sont ainsi des produits qui se conservent plusieurs mois à température ambiante, même si une conservation à -5° C semble optimale en termes de composés volatiles et de propriétés émulsifiantes (Yanagisawa *et al.*, 2009) ; il existe également du blanc concentré salé ou sucré, mais les valeurs d'Aw atteintes (>0,87) ne permettent pas la même aptitude à la conservation. On peut toutefois remarquer que l'ajout de sel aux ovoproduits doit faire l'objet d'une attention particulière car il augmente considérablement la thermo-résistance des bactéries, ce qui implique de revoir à la hausse les barèmes appliqués pour garantir un niveau de décontamination satisfaisant (Denis *et al.*, 1995). D'une manière générale, la thermo-résistance des micro-organismes augmente quand l'Aw diminue (Michalski *et al.*, 2000).

Au-delà de l'intérêt lié à la facilité de conservation de ces ovoproduits concentrés salés/sucrés, ces formulations peuvent dans certains cas présenter également un intérêt fonctionnel. Ainsi, les produits sucrés offrent des propriétés moussantes intéressantes en pâtisserie pour la préparation des pâtes battues (madeleines, génoises…) (Damir *et al.*, 1988). De même, l'ajout de 12% de sucre au blanc d'œuf, combiné à l'augmentation de la température de pasteurisation (de 60 à 64 C, 2 min) augmente sa capacité foisonnante, même si elle diminue légèrement la stabilité de la mousse (Raikos *et al.*, 2007).

Des hydrocolloïdes (guar, xanthane, carraghénannes, pectines...) peuvent également être ajoutés aux ovoproduits, pour par exemple améliorer la stabilité des mousses de blanc d'œuf ou simplement compenser la perte de stabilité résultant de la pasteurisation. L'ajout de texturants diminue cependant la capacité foisonnante du blanc (Ibanoglu et Ercelebi, 2007). Certains acides organiques peuvent être utilisés pour abaisser le pH, ce qui est nécessaire lorsque des sorbates sont ajoutés pour augmenter la durée de vie des ovoproduits liquides ; cette pratique est toutefois peu répandue car faiblement efficace.

Enfin, on peut intervenir en amont de la transformation, via l'alimentation des pondeuses, pour modifier certains critères de composition du jaune et de l'entier. C'est le cas lorsqu'on cherche une couleur de jaune particulière, pour la fabrication de pâtes aux œufs par exemple. En effet, la composition en pigments du jaune reflète directement la composition de l'aliment consommé par la pondeuse (Looten *et al.*, 2003). De même lorsqu'on souhaite enrichir le jaune en acides gras polyinsaturés (AGPI) comme les oméga 3, la composition en acides gras du jaune dépendant de celle de l'aliment ; ce processus, connu depuis longtemps, a fait l'objet de nombreuses revues, dont celles de Nys et Sauveur (2004) et Yannakopoulos (2007). Des enrichissements en vitamines ou minéraux pourraient être réalisés de la même manière (Stadelman et Pratt, 1989), mais il ne semble pas y avoir d'application commerciale en France à ce jour.

Ovoproduits congelés

Le blanc, le jaune et l'entier sont commercialisés sous forme congelée, soit à l'état naturel, soit formulés (ajout de sucre et/ou d'hydrocolloïdes). L'avantage majeur de ces produits est leur durée de conservation (plusieurs mois à -20° C). En revanche, leur mise en œuvre n'est pas toujours aisée, avec une durée de décongélation qui peut être très longue si elle est réalisée dans de bonnes conditions (à 4° C) et ce d'autant plus que le volume est important ; ces produits ne sont d'ailleurs jamais conditionnés au-delà de 20 kg. Par ailleurs, l'entier et le jaune peuvent présenter un déphasage après décongélation qui déprécie généralement le produit aux yeux de l'utilisateur, même si les propriétés organoleptiques, fonctionnelles et nutritionnelles ne sont pas modifiées. L'ampleur de la gélification du jaune d'œuf lors d'un cycle de congélation-décongélation est d'autant plus grande que la température finale est basse, que les vitesses de congélation et de décongélation sont lentes, et que la durée du stockage à l'état congelé est longue (Kiosseoglou, 1989). La viscosité initiale du jaune d'œuf peut être récupérée après un chauffage d'une heure à 45-55°C. Le sucre étant un agent cryoprotecteur efficace permettant de limiter la dénaturation du jaune nature après congélation (Telis et Kieckbusch, 1998), du jaune sucré à 10% est parfois proposé sous forme congelée. Cependant, les ovoproduits congelés ne représentent plus aujourd'hui qu'une part très mineure des tonnages commercialisés en France. Ils sont destinés essentiellement aux artisans des métiers de bouche.

Ovoproduits en poudre

Le séchage des ovoproduits répond à des objectifs variés : régulation des marchés par le dégagement de volumes de surproductions d'œufs coquille, possibilité de réaliser des analyses complexes et longues incompatibles avec la durée de vie des produits frais, découplage entre les contraintes d'élevage et celles du client lorsque des caractéristiques spécifiques sont visées (ovoproduits enrichis en certains nutriments, productions alternatives ou sous certifications). Les progrès

technologiques réalisés font aussi des poudres d'œuf, des ovoproduits offrant des spécificités techniques à même de répondre à certaines attentes des utilisateurs, difficiles voire impossibles à satisfaire avec les ovoproduits liquides.

Entier, blanc et jaune ne sont pas concernés au même niveau par le séchage. Ainsi, le jaune est majoritairement utilisé en liquide et à proximité de son lieu de production pour des applications en sauces, gâteaux ou desserts. Le fait que cet ovoproduit voyage beaucoup moins que le blanc et l'entier d'une part, et qu'il soit naturellement riche en extrait sec (44% environ pour du jaune issu de cassage industriel) d'autre part, explique qu'il soit finalement rarement séché. Cependant, des poudres de jaune sont disponibles sur le marché. Lorsque les secteurs d'application visés sont la pâtisserie ou les desserts et entremets, il s'agit souvent de poudre de jaune sucré à hauteur de 10 à 20% (5 à 10% sur le liquide reconstitué). L'ajout de sucre à 20% permet de restaurer les propriétés moussantes dégradées lors du séchage (Schultz *et al.*, 1968), même si ces propriétés ne sont pas forcément les plus recherchées dans ce type d'applications. Pour les applications en sauces et plats cuisinés, les poudres de jaune salé à hauteur de 5 à 10% (2,5 à 5% sur le liquide reconstitué) sont fréquentes. Le jaune peut dans certains cas être additionné de maltodextrines avant séchage. Un traitement préalable par la phospholipase A2 peut également être appliqué pour accroître la stabilité aux traitements thermiques ultérieurs des sauces froides acides (type mayonnaise) dans lesquelles le jaune est mis en œuvre (Dutilh et Groger, 1981).

Le séchage de l'œuf entier nature dégrade très fortement, voire annule complètement les propriétés moussantes du produit. Pour contrer cet effet néfaste du séchage, du sucre ou des maltodextrines peuvent être ajoutées au produit avant séchage, à hauteur d'environ 40% de glucides sur poudre. Le niveau de restauration des propriétés moussantes est quasiment proportionnel au taux de sucre ou de maltodextrine ajouté (Kline *et al.*, 1964). Cependant, au-delà de 20% de glucides sur poudre, des dégradations organoleptiques (produits de Maillard) apparaissent au cours du stockage du produit ; elles sont moins marquées avec les maltodextrines à longues chaînes. Les poudres d'entier couramment disponibles sur le marché présentent des teneurs comprises entre 10 et 40% sur poudre de sucre ou de maltodextrines de différents DE (dextrose équivalent). Les poudres d'entier sont rarement utilisées en applications salées. On trouve cependant des poudres d'entier salé à hauteur de 5% sur poudre maximum. L'ajout de maltodextrines ou de sirop de glucose dans ces poudres permet d'améliorer leurs qualités d'écoulement (Lai *et al.*, 1985).

Quant au blanc, plusieurs facteurs expliquent qu'il soit pour une part importante séché et que les poudres de blanc fassent l'objet d'échanges internationaux intenses. Tout d'abord, même avant pasteurisation, le blanc est un milieu peu propice au développement microbien ce qui permet aisément de le faire voyager pour rassembler sur un même site de séchage des volumes importants, la pasteurisation étant dans ce cas réalisée après le séchage, par étuvage de la poudre. D'autre part, il est économiquement avantageux de faire voyager à l'international le blanc en poudre plutôt que le blanc liquide du fait de la faible teneur en extrait sec de ce dernier (environ 10%). Enfin, quasiment dépourvu de lipides, le blanc se conserve aisément et sur de longues durées à l'état déshydraté. Le séchage est également systématique pour le blanc d'œuf utilisé pour l'extraction du lysozyme. Du fait de sa faible teneur en extrait sec, le blanc liquide est systématiquement concentré avant séchage. Lorsque la concentration est réalisée par ultrafiltration (et non par osmose inverse), une partie des minéraux est éliminée avec l'eau, ce qui permet d'augmenter le rapport protéines sur extrait sec de la poudre finale, alors même que le blanc d'œuf offre déjà un ratio très élevé (plus de 80% de protéines sur sec dans le blanc liquide). En règle générale, cette perte de minéraux est compensée par un apport de NaCl avant séchage de manière à retrouver le ratio protéines sur cendres du blanc liquide. En plus des hydrocolloïdes autorisés dans les ovoproduits, le tri-éthyl citrate (E1505) peut être ajouté pour la fabrication de poudre de blanc ; cet additif améliore la stabilité des mousses. Une des particularités du procédé de fabrication des poudres de blanc réside dans le déport en fin de procédé (post-séchage) de l'étape de pasteurisation : c'est donc du blanc liquide cru qui est séché, par atomisation. La pasteurisation est ensuite réalisée par étuvage de la poudre en chambre chaude, à l'aide de barèmes temps-température également originaux, de l'ordre de 65° C pendant 5 jours environ. De tels barèmes permettent de garantir la sécurité microbiologique du produit (Baron *et al.*, 2003). Toutefois, des barèmes plus intenses (80°C pendant 5 à 10 jours en étuvage statique en chambre ; 90°C pendant une vingtaine d'heures en étuvage dynamique en mélangeur conique agité) permettent en plus d'améliorer considérablement les propriétés moussantes, émulsifiantes et/ou gélifiantes du blanc d'œuf une fois reconstitué (Hammershoj *et al.*, 2006a ; Hammershoj *et al.*, 2006b; Kato *et al.*, 1989 ; Mine, 1996 ; 1997) ; (Hammershoj *et al.*, 2004). Cette « astuce » technologique est aujourd'hui largement utilisée par tous les fabricants de poudres de blanc d'œuf pour proposer une offre ciblée et adaptée à différentes applications (blanc « high gel » pour les applications surimi par exemple, blanc « high foam » pour les applications en pâtisserie et desserts). Par ailleurs, de nombreuses publications scientifiques ont démontré la possibilité de produire, par co-séchage de blanc et de polysaccharides (guar notamment) suivi d'un étuvage, des complexes protéines-polysaccharides aux propriétés émulsifiantes et gélifiantes exceptionnelles (Kato *et al.*, 1993 ; Matsudomi *et al.*, 2002 ; Nakamura *et al.*, 1998). Cependant, il n'existe pas, à ce jour, d'application industrielle de ce procédé par ailleurs très simple. Enfin, bien que les volumes produits

soient relativement confidentiels, on peut signaler qu'il existe une tout autre technique de séchage du blanc d'œuf que le classique procédé d'atomisation : le séchage sur plateaux ou « pan-drying ». Consistant en une évaporation lente à une température inférieure à la température de coagulation du blanc (T°<54°C), il conduit à un produit appelé « blanc cristal » qui a l'aspect de l'ambre et qui est utilisé dans certaines confiseries foisonnées (nougat par exemple) (Bergquist, 1995).

Tableau 2.2.3. Composition type des ovoproduits non formulés disponibles sur le marché

	Œuf entier		Jaune d'œuf		Blanc d'œuf	
	Liquide	**Poudre**	**Liquide**	**Poudre**	**Liquide**	**Poudre**
pH	7,5 ± 0,3		6,5 ± 0,3		9,0 ± 0,3	
Extrait sec (%)	23,0 ± 0,5	≥ 95	43,0	≥ 95	11,0	≥ 92
Matière grasse (%)	10	43,1	26	60,8	-	-
Protéines (%)	11	47,4	15	32,9	9,3	79,1
Glucides (%)	1,06	4,8	1	3,6	1,23	4,47
Sodium (%)	0,12	0,48	0,07	0,16	0,15	1,12

2.2.3.4. Propriétés technologiques

Propriétés technologiques (techno-fonctionnelles) des fractions de l'œuf et applications alimentaires

Il est habituel de dire que l'œuf a cette particularité d'être un ingrédient polyfonctionnel en ce sens qu'il peut remplir simultanément plusieurs fonctions technologiques au sein d'un même produit alimentaire formulé. Ses propriétés en font encore aujourd'hui un ingrédient de base, si ce n'est de référence dans de très nombreuses recettes, tant à l'échelle domestique qu'industrielle. Selon les propriétés recherchées, et donc selon les applications, certaines fractions peuvent être privilégiées. Ainsi, le jaune est avant tout utilisé pour ses propriétés émulsifiantes liées à la lécithine et aux protéines qu'il contient, mais aussi pour ses propriétés colorantes et gustatives. Le blanc d'œuf est quant à lui utilisé, selon les applications, soit pour ses propriétés moussantes exceptionnelles (surtout en produits sucrés), soit pour ses propriétés gélifiantes (surtout en produits salés). L'œuf entier, combinant les propriétés de ces deux fractions sans toutefois les égaler, est utilisé aussi bien dans les produits salés que sucrés, pour toutes ces propriétés à la fois. Ingrédient polyvalent, souvent utilisé en substitution des œufs coquille des recettes traditionnelles, avec une attente fonctionnelle proche de celle des œufs crus, l'œuf entier représente l'essentiel (2/3) des ovoproduits liquides pasteurisés mis en œuvre en agroalimentaire, dans quasiment l'ensemble des secteurs d'applications.

Un très grand nombre d'études ont été conduites depuis plusieurs dizaines d'années pour comprendre les mécanismes physicochimiques en jeu, identifier les constituants de l'œuf impliqués, et évaluer l'effet des paramètres environnementaux (pH, ajout de sel, sucre, hydrocolloïdes…) sur ces propriétés. Un grand nombre de réponses ont pu être apportées lorsque l'œuf ou ses fractions sont mis en œuvre en solution simple. En revanche, beaucoup reste à comprendre dès lors qu'on se place en formules complexes comme peuvent l'être la plupart des aliments formulés « vrais ».

Tableau 2.2.4. Propriétés techno-fonctionnelles et principales applications alimentaires des ovoproduits

	Œuf entier	Jaune d'œuf	Blanc d'œuf
Pâtisserie, biscuiterie	Foisonnant Gélifiant Liant Colorant	Emulsifiant Colorant	Foisonnant
Confiseries			Foisonnant
Glaces	Liant	Emulsifiant	
Plats cuisinés	Liant Emulsifiant Colorant		Gélifiant

Charcuterie, terrine de légumes, de poisson	Liant Emulsifiant		Gélifiant
Pâtes alimentaires	Colorant Liant Elasticité		
Soufflés, quiches, tartes	Liant Emulsifiant Elasticité Colorant		
Sauces	Liant Emulsifiant Colorant	Emulsifiant Epaississant	Epaississant

Conséquences des procédés de transformation en ovoproduits

Le traitement thermique à l'état liquide (pasteurisation) a un effet majeur sur les propriétés fonctionnelles des ovoproduits. Cela a été montré par exemple dans le cas de l'entier, avec un impact de la durée de chambrage sur la hauteur de gâteaux de type cake. L'effet est surtout bien connu dans le cas du blanc d'œuf, avec un impact fort sur ses propriétés moussantes. Un traitement de pasteurisation standard se traduit par une perte de l'ordre de 10% de la capacité foisonnante et de la stabilité de la mousse (Kline *et al.*, 1966 ; Lechevalier *et al.*, 2005). La perte de solubilité des protéines due à leur dénaturation et leur agrégation serait à l'origine de ce phénomène (Lechevalier *et al.*, 2005). Cet effet délétère de la pasteurisation peut être limité en modifiant le pH ou en ajoutant certains ions (Hatta *et al.*, 1997), mais ces pratiques ne sont généralement pas compatibles avec les usages attendus. Seuls les ajouts de sel et/ou de sucre, permettant dans une certaine mesure de protéger le blanc d'œuf des conséquences néfastes d'un traitement thermique modéré (Raikos *et al.*, 2007), sont réellement envisageables et d'ailleurs pratiqués. A l'inverse, des traitements thermiques intenses appliqués au blanc d'œuf à l'état déshydraté (poudre) permettent d'améliorer considérablement ses propriétés moussantes et gélifiantes (Berardinelli *et al.*, 2006; Kato *et al.*, 1994), la durée et la température d'étuvage, mais aussi la teneur en eau de la poudre, étant des paramètres déterminants (Baron *et al.*, 2003 ; Kato *et al.*, 1989 ; Talansier *et al.*, 2009 ; Van der Plancken *et al.*, 2007). En revanche, le simple séchage du blanc (sans étuvage ultérieur) détériore de manière drastique ces propriétés (Hill *et al.*, 1965 ; Lechevalier *et al.*, 2005). Quelques études ont également montré l'impact des traitements de cisaillement (homogénéisation), avec toutefois des conséquences opposées selon le niveau de cisaillement : alors que des cisaillements faibles à moyens ($< 1\,000\ s^{-1}$) amélioreraient les propriétés moussantes du blanc, des cisaillements intenses seraient eux néfastes.

Dans le cas du jaune et de l'entier, l'étape de séchage s'avère également un point clé à maîtriser pour les propriétés fonctionnelles des poudres en résultant. La couleur est ainsi très sensible à la température et au temps de séjour de la poudre dans la chambre de séchage avant extraction. Selon les conditions de séchage, il est également possible d'orienter les fonctionnalités d'une poudre d'entier : une diminution de la température favorise les propriétés gélifiantes et moussantes, alors qu'une augmentation de la température favorise les propriétés émulsifiantes (Franke et Kiessling, 2002). Par ailleurs, et quelle que soit la température d'air entrant (entre 130 et 190°C), les propriétés gélifiantes d'une poudre d'entier augmentent avec la pression d'atomisation (entre 125 et 195 bar). Un traitement peu dénaturant (125 bar, air entrant à 130°C) favorise les propriétés moussantes d'une poudre d'entier, alors qu'un traitement plus dénaturant (195 bar, air entrant à 190°C) favorise les propriétés émulsifiantes (Franke et Kiessling, 2002). Il existe ainsi de très nombreuses combinaisons favorables ou défavorables à tel type de propriétés fonctionnelles. Là est une partie du savoir-faire de l'industriel.

Quel que soit le type d'ovoproduit, les conditions de séchage sont également déterminantes pour les qualités physiques des poudres (densité apparente, écoulement, réhydratation) qui sont elles-mêmes des critères majeurs de qualité puisqu'elles conditionnent largement la mise en œuvre finale de l'ovoproduit en poudre (Schuck *et al.*, 2012).

2.2.3.5.Fractions à haute valeur ajoutée

A l'instar de ce qui a été fait dans d'autres secteurs comme le secteur laitier, de nombreux travaux de recherche ont été consacrés à ce qu'il est convenu d'appeler le « cracking de l'œuf », c'est-à-dire son fractionnement pour en extraire des parties ou molécules à haute valeur ajoutée.

Concernant le jaune, un brevet décrit la séparation à l'échelle industrielle des fractions « granules » et « plasma » (Corlay *et al.*, 1993). L'objectif de cette séparation réside dans les propriétés fonctionnelles différenciées de ces deux fractions : le plasma offre des propriétés émulsifiantes proches de celles du jaune (Anton et Gandemer, 1997; Dyer-Hurdon et Nnanna, 1993) et les LDL qu'il contient sont également à l'origine des propriétés gélifiantes du jaune (Kojima et Nakamura, 1985 ; Le Denmat *et al.*, 1999 ; Sirvente, 2007; Tsutsui, 1988), alors que les granules sont très résistants aux traitements thermiques, du moins dans les conditions physicochimiques naturelles du jaune (Le Denmat *et al.*, 1999). A notre connaissance, ce brevet ne fait pas l'objet d'application industrielle. A l'échelle laboratoire, des procédés ont également été développés pour l'extraction de la phosvitine (antioxydant), mais sans application industrielle à grande échelle (Castellani *et al.*, 2003). Les seuls fractionnements pratiqués industriellement concernent à notre connaissance d'une part la lécithine (émulsifiant, réservé à des applications très spécifiques du fait de son coût peu compétitif face à la lécithine de soja ; (Juneja *et al.*, 1994), et d'autre part les immunoglobulines Y (ou livetines ; (Fichtali *et al.*, 1994) qui sont utilisés en médecine vétérinaire, dans un but de prévention voire de traitement de certaines pathologies d'origine bactérienne. On oriente dans ce cas la production des IgY vers les pathogènes cibles en inoculant ces pathogènes à des poules qui produisent alors les IgY spécifiques de ces pathogènes. De telles unités de production existent en Amérique du Nord et en Asie, mais pas en Europe à notre connaissance. Les résultats régulièrement présentés dans la littérature scientifique sont pourtant convaincants !

Concernant le blanc, le seul fractionnement réalisé à grande échelle est l'extraction du lysozyme. De nombreuses méthodes ont été proposées, mais la seule aujourd'hui mise en œuvre à l'échelle industrielle est extraction à l'aide de résines échangeuses de cations, mettant à profit le pI très basique de cette protéine ; il existe de nombreuses variantes de ce type de méthode, dont certaines ont été brevetées comme par exemple celle proposée par Ghielmetti et Trinchera (1975). Tout le lysozyme commercialisé dans le monde, que ce soit pour des applications alimentaires (conservateur naturel) ou pharmaceutiques (pathologies de la sphère buccale essentiellement) est extrait du blanc d'œuf de poule. Il existe également des installations industrielles d'extraction de l'ovotransferrine, également par échange d'ions (échange de cations ou d'anions sont envisageables), mais les volumes produits sont beaucoup plus faibles. Il semble que le marché soit celui de la parapharmacie en raison des propriétés antibactériennes de cette protéine. D'autres protéines très minoritaires du blanc d'œuf, comme l'avidine, sont également produites par des acteurs économiques industriels, mais à des tonnages là aussi très faibles (marché du diagnostic et des analyses biochimiques) ; on peut citer le brevet déposé par Rao *et al*. (2004). En revanche, à l'échelle laboratoire, plusieurs équipes dans le monde ont développé au cours des dernières décennies plusieurs procédés de fractionnement (*cf.* pour revue, Guérin-Dubiard et Anton (2010)) permettant parfois de séparer en cascade plusieurs des protéines du blanc (Guerin-Dubiard *et al.*, 2005).

2.2.4. Conclusions

L'effet des systèmes d'élevages sur la qualité des œufs a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années. Rakonjac *et al*. (2017), ont fait une revue des résultats obtenus par différents auteurs sur les effets des systèmes d'élevage sur les caractéristiques de l'œuf en terme de production (nombre d'œufs produits, mortalité des poules, poids d'œufs, proportion des constituants, couleur du jaune et hauteur de blanc). Les conclusions de cette étude sont que la performance des pondeuses est moindre en système alternatif par rapport au système intensif, avec des résultats sur les qualités nutritionnelles variables et légèrement en faveur des systèmes extensifs. Hidalgo *et al*. (2008) ont étudié les caractéristiques des œufs issus de différents systèmes d'élevage et provenant du marché Italien. Au total 41 paramètres physiques et chimiques ont été mesurés. Les œufs bio présentaient les meilleures fonctionnalités moussantes, mais les moins bonnes qualités de fraîcheur (qualité du blanc). Les œufs issus de cages présentant de moins bonnes propriétés moussantes, mais des qualités de coquille augmentées. Au cours des deux dernières années, plusieurs études ont comparé les caractéristiques des œufs en fonction des systèmes d'élevage. Kucukkoyuncu *et al.* (2017) et Sokolowicz *et al*. (2018), ont étudié l'effet de l'âge des poules et des systèmes d'élevage sur la qualité des œufs. L'effet de l'âge est le facteur le plus important de ces études. Dans leur étude, Sokolowicz *et al*. (2018) mentionnent un poids d'œuf plus élevé pour les systèmes « outdoor » et une absence d'effet sur les paramètres du blanc. Enfin, une dernière étude importante à mentionner est celle de Vlckova *et al*. (Vlckova *et al.*, 2018) qui ont comparé les différents systèmes d'élevage et les contaminations microbiennes à différents âges. La contamination et la pénétration microbienne sont surtout détériorées par le système d'élevage et la durée de stockage des œufs avec un effet défavorable des systèmes avec parcours extérieurs.

En résumé, les systèmes d'élevage alternatifs par rapport aux systèmes d'élevage en cages enrichis ont des effets limités sur les caractéristiques de l'œuf. L'âge de la poule, la température et le temps stockage des œufs sont de très loin les facteurs les plus importants et donc à maîtriser pour la filière. Les systèmes alternatifs ont un effet positif sur le bien-être de l'animal, mais qui ne se traduit pas ou peu en terme de qualité du produit œuf. Le choix de ces systèmes en fort développement répond donc aux besoins du consommateur en termes d'éthique, mais n'apporte pas de valeur ajouté en termes de qualité des œufs.

Propriété commerciale des œufs

Facteurs	Poids	Couleur de la coquille	Couleur du jaune	Fraicheur	Propriétés fonctionnelles
Génétique	++	+++	-	-	-
Age	+++	-	-	+	++
Alimentation	+	-	+++	-	-
Système d'élevage	+	-	+	-	?
Durée de stockage	-	-	-	+++	+++
Température de stockage	-	-	-	+++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriété sanitaire des œufs

Facteurs	Œuf entier	Jaune cru	Ovoproduits
Génétique	++	-	-
Age	++	++	-
Alimentation	+	-	-
Système d'élevage	+	-	-
Durée de stockage	+++	+	+
Température de stockage	+++	++	++
Pasteurisation	-	-	+++
Manipulation-Séparation	++	+++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriété organoleptique des œufs entiers

Facteurs	Couleur du jaune	Couleur de coquille	Flaveur et goût
Génétique	-	+++	-
Age	-	+	+
Alimentation	+++	-	++
Système d'élevage	+	-	-
Durée de stockage	-	-	++
Température de stockage	-	-	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriété nutritionnelle des œufs

Facteurs	Protéines et acides aminés	Lipides	Acides gras	Cholestérol	Minéraux, vitamines et oligo-éléments
Génétique	+	+	+	+	-
Age	-	-	-	-	-
Alimentation	-	++	+++	-	+++
système d'élevage	-	-	-	-	-
Durée de stockage	-	+	+	-	-
Température de stockage	+	+	+	-	-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriété technologique (propriétés fonctionnelles) des œufs

Facteurs	Foisonnement	Emulsifiant	Colorant	Liant
Blanc	+++	-	-	-
Jaune	-	+++	+++	+
Œuf entier	+	+++	+++	++
Génétique	-	-	-	-
Alimentation de la poule	-	-	++	-
Système d'élevage	-	-	-	-
Age	++	-	-	-
Conditions de conservation	+++	-	-	+
Durée et température de stockage	+++	-	-	-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Facteurs majeurs de variation des qualités des œufs

Facteurs	Qualité commerciale	Qualité sanitaire	Qualité organoleptique	Qualité nutritionnelle	Qualité technologique
Génétique	-	+	+	-	+
Age	++	+	-	-	+++
Alimentation	+	+	+	++	-
Système d'élevage	-	+	-	-	-
Durée de stockage	++	++	-	-	+++
Température de stockage	+	+	-	+	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Effets positifs et négatifs associés à la production d'œufs en parcours extérieurs (vs. avec une production en cages enrichies)

Dimensions	Effets positifs	Effets négatifs
Qualité commerciale des œufs	Jaune légèrement plus pigmenté selon le couvert végétal présent	Moins d'œufs produits Mortalité plus élevée
Qualité sanitaire des œufs	Variable selon la densité de l'élevage	Moins bonne maîtrise des pathologies
Qualités nutritionnelles	Aucun	Aucun
Qualités technologiques	Variable selon le temps de stockage et l'âge des poules	Plus forte variabilité
Qualités d'image	Meilleure prise en compte du bien-être animal (densité, accès à un parcours, taille des élevages, enrichissement du milieu) Contrôle annuel du respect du cahier des charges Moins de traces de pesticides et de résidus médicamenteux (production Bio)	Utilisation de surfaces plus importantes, dégradation des sols à proximité des bâtiments Risque d'exposition à des contaminants de l'environnement et des pathologies (influenza aviaire) plus élevé Consommation d'aliment et production de rejets plus importants

2.3. Viande ovine

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Viande ovine
202 références ont été utilisées pour couvrir **la qualité de la viande ovine** consommée en Europe. Ces références sont pour 87% d'entre elles des articles scientifiques, dont 92% sont référencés dans le Web of Science, pour 5% des chapitres d'ouvrages et pour 4% des conférences. **Un peu plus de la moitié des références (107) datent de moins de 10 ans.** Les 10 auteurs les plus cités (plus de 10 fois) sont français (2), australiens (2), néo-zélandais (2), britanniques (2), italien (1), espagnol (1), la **couverture est donc européenne et internationale**. Il était important de couvrir la littérature néo-zélandaise et australienne, car ces pays sont de grands producteurs de viande ovine, et l'essentiel des importations européennes en proviennent. Le **taux d'autocitations est correct** (9%). Il y a **8 revues principales, la plus fréquemment citée étant de loin Meat Science,** revue de bonne notoriété **généraliste en sciences des aliments.**

2.3.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation

La consommation de viande ovine est de 1,9 kg/habitant en moyenne en Europe (à peu près le niveau mondial), avec de grandes variations entre pays (5 kg en Grèce vs. 0,8 kg en Allemagne, Tableau 2.3.1.).

Tableau 2.3.1. Cheptel, production et consommation de viande ovine dans l'UE et dans les principaux pays producteurs d'ovins (10 pays représentant 94% de la production européenne) en 2017

Pays	Cheptel reproducteur (1 000 têtes)	Part des brebis laitières dans le cheptel (%)	Abattages (1 000 tec)	Poids moyen de la carcasse (kg)	Consommation (1 000 tec)	Auto-suffisance (%)	Consommation annuelle (kg/hab)
Royaume Uni	14 680	0	298	19,4	289	103	4,4
Espagne	11 496	21	115	10,9	86	133	1,8
Roumanie	8 388	90	84	11	77	110	3,9
Grèce	6 662	95	51	10	53	96	5
Italie	6 315	82	48	9	68	70	1,1
France	5 355	29	81	18,1	164	50	2,4
Irlande	2 405	0	67	20,4	10	656	2,1
Portugal	1 606	19	10	11	15	62	1,5
Bulgarie	1 173	91	8	8	7	110	1
Allemagne	1 102	1	32	17	69	46	0,8
Total UE 28	62 770	40	842	15	965		1,9

Source : Bellet *et al.* (2018)

La viande ovine présente en effet des particularités régionales de production et de consommation. Le Nord de l'Europe produit et consomme des agneaux lourds issus de cheptels 'viande' (auxquels il faut ajouter la viande ovine importée d'Océanie également issue de cheptels 'viande'), alors que le Sud de l'Europe (bassin méditerranéen) produit et consomme majoritairement des agneaux légers issus de troupeaux laitiers, la viande y étant un sous-produit du lait (Zervas et Tsiplakou, 2011). Si le poids de la carcasse de l'agneau est en moyenne de 15 kg en Europe, il présente donc une grande variabilité, de 5 à 11 kg dans le Sud de l'Europe à plus de 20 kg dans le Nord (Sanudo *et al.*, 1998 ; Zygoyiannis, 2006). Il y a également de grandes variations dans les systèmes d'élevage entre pays européens (et dans un même pays), en lien avec des conditions pédoclimatiques et des pratiques agricoles différentes, depuis des systèmes très extensifs (herbagers à pastoraux) jusqu'à des systèmes très intensifs (Sanudo *et al.*, 2007).

La réglementation communautaire distingue deux catégories d'animaux pour le classement des carcasses selon qu'ils sont âgés de moins (agneaux) ou plus (moutons) de 12 mois. Il existe cependant d'autres dénominations en usage en Europe, qui font référence à des caractéristiques plus précises des types d'agneaux consommés, en lien avec la nature de l'alimentation, ainsi que l'âge et le poids à l'abattage.

Agneaux de lait. Ce sont des agneaux nourris exclusivement de lait maternel (ils sont donc pré-ruminants) et issus de cheptels à dominance laitière. Les agneaux sont sevrés et abattus jeunes pour préserver la production laitière (Boutonnet, 2006), à l'âge de 4-6 semaines (maxi 45 jours) à un poids vif de 9-13 kg. Ce type d'agneaux est majoritairement consommé dans le Sud de l'Europe (Grèce, Espagne, Portugal, Italie, Roumanie), pays où la part des brebis laitières est importante, et qui

représentent 23% de la consommation de l'UE (Bellet *et al.*, 2018). Les consommateurs de ces pays ont ainsi développé une préférence marquée pour une viande de couleur pâle, tendre et présentant peu de flaveur (Zervas et Tsiplakou, 2011). Il s'agit souvent d'une consommation festive (Noël, Pâques) qui est fortement ancrée dans les habitudes culturelles, notamment en Espagne et au Portugal. La carcasse est très légère (de 4,5 à 11 kg), la viande crue est très claire (blanche ou à peine rosée), la texture juteuse, le goût d'agneau peu prononcé. La France produit ce type d'agneau localement dans les bassins laitiers des Pyrénées-Atlantiques et de Corse, mais le consomme très peu (exportation majoritairement vers l'Espagne). Comme l'animal est un pré-ruminant, il est beaucoup plus facile d'agir sur la composition de ses tissus via son alimentation que pour les ovins ruminants.

Agneaux légers. Ces agneaux sont traditionnellement produits en Espagne (38% des agneaux abattus) (Lobon *et al.*, 2019). Les brebis sont habituellement alimentées avec du foin ou de la paille et du concentré ; les agneaux sont sevrés à l'âge de 45-50 jours et reçoivent ensuite une ration riche en concentrés jusqu'à un poids vif de 20-25 kg (poids de carcasse 10-13 kg, âge à l'abattage : 70-90 jours). Ce système de production traditionnellement en bâtiments vise à obtenir des carcasses homogènes avec un gras blanc, une viande pâle et de flaveur peu prononcée (Carrasco *et al.*, 2009).

Agneaux lourds. Ces agneaux sont abattus entre 3 et 12 mois d'âge (le plus souvent entre 3 et 8 mois). Il s'agit du type d'agneau produit majoritairement dans le Nord de l'Europe (Royaume-Uni, Irlande, Allemagne, France). Ces agneaux peuvent être produits à l'herbe ('**agneaux d'herbe'**), notamment au Royaume Uni, en Irlande où le climat est favorable, avec des races herbagères, l'âge à l'abattage variant de 4 à 8 mois. Dans les zones moins favorables à la pousse de l'herbe (zones défavorisées et de montagne du Sud de l'Europe), les agneaux sont quasi systématiquement engraissés en bergerie ('**agneaux de bergerie'**), l'âge à la vente variant de 100 à 150 jours. Le poids de carcasse se situe dans la gamme de 17 à 20 kg. En France, une partie des agneaux de bergerie lourds provient des élevages laitiers du rayon de Roquefort, car la race Lacaune est apte à l'engraissement : les agneaux quittent l'exploitation d'élevage au sevrage à 4 semaines pour être engraissés en ateliers spécialisés.

Moutons (ovins adultes), dont « hoggets » (animaux abattus entre 12 et 24 mois d'âge, consommés essentiellement dans les pays anglo-saxons). Leur part est élevée dans le marché halal. Une AOP en Europe (Mouton de Barèges-Gavarnie) concerne des ovins adultes : les mâles doivent être âgés d'au moins 18 mois (23 kg de carcasse) et les jeunes brebis doivent avoir entre 2 et 6 ans (22 kg de carcasse). La couleur de la viande est rouge vif et la flaveur est prononcée.

Les importations européennes (153 000 tec) proviennent majoritairement de Nouvelle Zélande (Tableau 2.3.1.). Cette précision est importante, car les systèmes d'élevage y sont très herbagers (agneaux d'herbe) et la viande doit être conservée longtemps pendant le transport. Les viandes importées de Nouvelle Zélande sont '*chilled*' pour 35% d'entre elles (Bellet *et al.*, 2018), c'est-à-dire réfrigérées sur une longue durée (16 semaines).

Tableau 2.3.2. Importations européennes (UE) de viande ovine en 2017 (1 000 tec)

Provenance	Poids moyen de la carcasse (kg)	Viande congelée	Viande fraîche et réfrigérée	Total
NZ	18,7	80,1	46,9	127
Australie	22,7	11,8	5	17
Amérique du Sud	nd	4	0	4

Source : Bellet *et al.* (2018)

L'UE est riche de 48 signes de qualité AOP ou IGP qui concernent tous les types d'agneaux mentionnés ci-dessus (Erasmus *et al.*, 2017). La part du cheptel certifié bio y est de 7,1% (Agence Bio, 2017b). On estime qu'en France 16.5% des agneaux sont produits sous signe officiel de qualité (Prache *et al.*, 2018). Par ailleurs, la vente directe y représente 20% du volume d'agneaux bio et concerne 40% des élevages bio (Experton *et al.*, 2018). Le marché de la viande dite 'rituelle' (halal ou casher) est difficile à évaluer quantitativement, mais il est en développement (Montossi *et al.*, 2013) ; on estime sa part à 15% dans la consommation de viande ovine française (Prache *et al.*, 2018). Ce segment est surtout constitué d'ovins adultes importés et distribués en grande majorité dans les boucheries spécialisées (Montossi *et al.*, 2013).

2.3.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets

Les systèmes d'élevage ovin varient considérablement en Europe et ils reflètent les conditions de milieu ainsi que l'orientation productive principale (lait ou viande). La viande ovine en Europe est ainsi issue de systèmes d'élevage très divers, depuis des systèmes très extensifs dans des milieux naturels contraignants offrant peu d'alternatives agricoles (systèmes pastoraux en haute montagne par exemple) jusqu'à des situations très intensives hors-sol. Ces contextes très divers

conditionnent fortement les races et les pratiques d'élevage (Montossi *et al.*, 2013) qui elles-mêmes influencent la qualité du produit (Sepulveda *et al.*, 2011). La viande d'agneau présente donc des propriétés qui diffèrent selon son origine et c'est un produit fortement pays-dépendant. De même, de par des habitudes alimentaires et culturelles très pays-dépendant, les propriétés recherchées par les consommateurs diffèrent entre pays, et ce qui est un atout pour les consommateurs du Nord de l'Europe peut au contraire être un défaut pour les consommateurs du Sud (Sanudo *et al.*, 1998). Ainsi, dans cette dernière étude, si un jury espagnol et un jury anglais s'accordaient pour reconnaître une intensité de la flaveur et de l'odeur plus élevée pour des agneaux produits à l'herbe que pour des agneaux produits avec une ration à base de concentrés, le jury espagnol préférait les agneaux de bergerie, alors que le jury anglais préférait les agneaux d'herbe.

Il faut en outre signaler que beaucoup d'études de la littérature comparent des situations extrêmes (systèmes extensifs basés sur le pâturage vs. systèmes intensifs en bâtiment), alors qu'il existe aussi beaucoup de situations intermédiaires, avec l'apport de concentrés au pâturage et des alternances de phases de pâturage et d'alimentation en bâtiments (Zervas et Tsiplakou, 2011).

2.3.2.1. Propriétés commerciales

Le prix d'une carcasse ovine est fondé sur 3 critères : le poids (qui dépend du poids vif de l'animal et du rendement et est fonction des habitudes culturelles et commerciales), la conformation (codifiée par la grille communautaire EUROP qui rend compte du développement musculaire) et l'état d'engraissement (qui est un élément majeur de la fixation du prix et dépend de la composition de la carcasse). L'état d'engraissement se définit à partir de l'importance et de la répartition des tissus adipeux. Le marché français demande des carcasses cirées et couvertes (notes de 2 et 3 sur une échelle de 5). A noter que les carcasses des ovins ne sont pas parées (contrairement à celles des bovins) et que les morceaux commercialisés sont parfois composés de plusieurs muscles (ils peuvent donc contenir du gras intermusculaire), d'où l'importance particulière des gras de couverture et intermusculaires dans cette espèce. Deux autres critères spécifiques de la carcasse sont ainsi pris en compte chez les ovins : la fermeté et la couleur du gras de couverture.

Les facteurs de variation **du rendement en carcasse** (poids de la carcasse/poids vif de l'animal) sont importants à connaître si l'on a un objectif de gamme de poids de carcasse associée à un prix de vente. Le rendement est généralement compris entre 40% et 52% ; il augmente avec le **poids vif** de l'animal et **l'état d'engraissement** (Schreurs et Kenyon, 2017b). Il dépend aussi de la **race**, et est d'autant plus élevé que la race est caractérisée, à poids vif donné par i) un état d'engraissement plus important (Purchas, 2012), ii) un développement musculaire ou un rapport muscle/os plus élevé (Hegarty *et al.*, 2006a) ou iii) un poids de la tête+toison+peau plus faible. L'effet du **sexe** dépend de l'âge. Lorsque l'animal est pubère, les mâles entiers ont un rendement inférieur d'environ 1% par rapport aux femelles de même poids, à cause des testicules (non conservés sur la carcasse) et d'un état d'engraissement inférieur. Avant la puberté, les mâles ont souvent un rendement supérieur à cause d'un développement musculaire plus important (Hegarty *et al.*, 2006a). La **quantité et la qualité de l'alimentation** avant l'abattage influencent le rendement via un effet direct sur le poids du contenu digestif (Litherland *et al.*, 2010) et un effet indirect sur l'état d'engraissement. L'effet du poids du contenu digestif explique pourquoi i) les agneaux de lait ont des rendements généralement supérieurs de 2-4% à celui des agneaux sevrés (Litherland *et al.*, 2010) et ii) le rendement est d'autant plus important que la digestibilité du régime est élevée (Somasiri *et al.*, 2015).

Composition et état d'engraissement de la carcasse

La carcasse ovine contient 80% de viande nette commercialisable (le gigot, la selle, le filet, le carré couvert, le carré découvert, la poitrine, l'épaule et le collier représentant respectivement 25%, 9% 10%, 11%, 6%, 13%, 19% et 7%), 10% d'os et 10% de déchets.

Le tissu musculaire se développe après la naissance au même rythme que le corps dont il constitue d'ailleurs la part la plus importante. Les dépôts de gras, eux, sont tardifs. Pour chaque tissu, on observe également un ordre de développement. Par exemple, pour les dépôts adipeux, l'ordre de précocité est le suivant : gras interne de la cavité abdominale, intermusculaire, sous cutané et intramusculaire (Berthelot et Domange, 2018). Conséquence importante de ces croissances à rythme varié, la composition de la carcasse évolue au fur et à mesure qu'augmente **le degré de maturité (rapport poids d'abattage/poids potentiel adulte)**, avec une augmentation de la part du gras et du rapport muscle/os (Anderson *et al.*, 2015 ; Hopkins *et al.*, 2007). Pour un degré de maturité de 25% vs. 60%, les dépôts adipeux représentent ainsi 7,2% vs. 11,8% du poids vif vide (PVV), alors que le tissu musculaire représente 34,1% vs. 33,0% du PVV. La proportion de muscle dans la carcasse diminue ainsi avec l'augmentation du poids (Schreurs et Kenyon, 2017b), bien que ceci ne soit pas toujours observé pour des faibles poids de carcasse ou pour les animaux ayant une faible propension à déposer du gras (Ponnampalam *et al.*, 2008; Ponnampalam *et al.*, 2007). La composition chimique des tissus évolue également : lorsque le degré de maturité augmente, le muscle s'enrichit en lipides et s'appauvrit en eau. Il en résulte une évolution de la composition du gain et un changement

progressif de la composition de l'animal : ainsi, à 10 kg de poids vif, le gain de poids est constitué de 11,1% de lipides et 15,9% de protéines, alors qu'à 40 kg, il est composé de 43,8% de lipides et 13,8% de protéines.

L'état d'engraissement d'une carcasse augmente donc avec le degré de maturité de l'animal. Celui-ci dépend du **poids potentiel adulte** qui varie avec la **race**, le **type sexuel** et le **poids à la naissance**. Pour un poids vif donné, les animaux de races lourdes ou tardives sont ainsi moins gras, ainsi que les mâles entiers relativement aux femelles, les mâles castrés étant intermédiaires (Schreurs et Kenyon, 2017b). Par ailleurs, plus l'agneau est léger à la naissance (en lien avec une portée multiple ou l'alimentation de la mère en fin de gestation), plus il est gras à un poids donné (Villette et Theriez, 1981). A chaque type d'animal correspond donc un **poids optimum d'abattage** (qui conditionnera **le poids de la carcasse)** au-delà duquel les animaux présenteront un engraissement excessif.

La **restriction alimentaire des brebis au cours de la gestation** peut affecter le développement de l'agneau et la qualité de sa carcasse et de sa viande (**programmation fœtale**). Comme la gestation est une période clé pour le développement du tissu osseux et la formation des fibres musculaires, les hypothèses sont qu'une sous-alimentation à cette période pourrait réduire le nombre de fibres musculaires, affecter le développement du tissu osseux et la masse musculaire, ainsi que la conformation de la carcasse et, au-delà, les performances des jeunes. Dans l'étude de Piaggio *et al*. (2018), une restriction alimentaire des brebis (60 à 70% des besoins énergétiques) entre le 45ème et le 115ème jour de gestation suivie d'une réalimentation à volonté en fin de gestation n'a pas eu d'effet délétère sur le poids des agneaux (à la naissance et ultérieurement) ni sur l'état d'engraissement de la carcasse, mais a réduit le poids de certaines pièces nobles (carré de côtes et gigot), même lorsque celui-ci est corrigé du poids à l'abattage. Une étude de programmation fœtale, imposant une restriction alimentaire des brebis entre le 30ème jour et la fin de la gestation, suivie d'une réalimentation à volonté semble indiquer une réponse variable selon le sexe de l'agneau (Ithurralde *et al.*, 2019). Les agneaux mâles nés de brebis restreintes ont présenté le même poids à la naissance que ceux issus de brebis non restreintes, mais ils ont eu une plus faible croissance (même avec une alimentation à volonté jusqu'à leur abattage à 200 jours) avant et après sevrage, et ils ont présenté une carcasse de moindre qualité (plus étroite et moins compacte, périmètre de croupe inférieur, réduction de la surface de la noix de côtelette, réduction du poids des muscles Gluteobiceps, Semitendinosus et Supraspinatus, même lorsque celui-ci est corrigé du poids de la carcasse). Ces effets n'ont pas été observés chez les agneaux femelles, les auteurs expliquant ces différences par une stratégie évolutionniste de protection des agneaux femelles en conditions de restrictions alimentaires. Une étude imposant une restriction alimentaire au cours des 6 dernières semaines de gestation (60% des besoins énergétiques), suivie d'une réalimentation des animaux à volonté montre un effet délétère sur le poids des agneaux à la naissance et le poids de leur carcasse, ainsi que sur leur croissance jusqu'au sevrage (suivi d'une croissance compensatrice ensuite). Leur croissance osseuse est également réduite (réduction du poids et de la longueur du fémur), ce qui peut affecter la robustesse ultérieure des animaux (Tygesen *et al.*, 2007). En revanche, il n'y avait pas d'effet de la restriction sur la tendreté de la viande. Ces études de programmation fœtale sont cependant encore rares et leurs résultats ne sont pas toujours concordants. Certains auteurs observent une augmentation de l'état d'engraissement de la carcasse et une baisse du rapport muscle/gras (Greenwood *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2006) chez les agneaux nés de mères restreintes, d'autres non (Piaggio *et al.*, 2018). Certains auteurs observent une réduction du poids de l'agneau à la naissance (Tygesen *et al.*, 2007) et du poids de sa carcasse (Sen *et al.*, 2016; Tygesen *et al.*, 2007), d'autres non (Ithurralde *et al.*, 2019; Piaggio *et al.*, 2018). Ces incertitudes sont probablement liées au fait que i) certaines études sont fondées sur de faibles effectifs, ii) les restrictions alimentaires ne sont pas appliquées au même stade de gestation et ne sont pas de même amplitude, iii) les variables mesurées (qualité de la carcasse et de la viande) sont parfois différentes, ainsi que les méthodologies utilisées (mesures directes vs. indirectes), iv) les analyses statistiques ne considèrent pas toujours l'interaction possible entre le traitement (restriction) et le sexe de l'agneau.

La **sélection** pour augmenter la vitesse de croissance et réduire la quantité de gras permet d'augmenter les dépôts musculaires. Des races telles que la Texel, qui ont été sélectionnées pour leur développement musculaire présentent une surface de la noix de côtelette et des dépôts musculaires plus importants. La sélection effectuée ces 10 dernières années a ainsi conduit à augmenter les dépôts musculaires, le poids de la carcasse et le rendement et à réduire les dépôts adipeux. Par ailleurs, les génotypes porteurs des mutations Callipyge et Carwell, gènes responsables d'hypertrophie musculaire, présentent un rapport muscle/os et une surface de la noix de côtelette plus élevés et de moindres dépôts adipeux (Schreurs et Kenyon, 2017b).

Chez les agneaux de lait (non sevrés), l'augmentation des apports alimentaires accroit la vitesse de croissance et l'adiposité. Pour les agneaux sevrés, il n'y a pas d'effet de la nature des aliments ou de leur mode de distribution, les données de la littérature concernant l'effet du **niveau d'alimentation** étant contradictoires : Thériez (1985) considère qu'il ne peut pas permettre de moduler de manière significative l'état d'engraissement (sauf pour des réductions drastiques réduisant

fortement la vitesse de croissance), alors que d'autres auteurs observent une tendance à un état d'engraissement légèrement inférieur avec une restriction alimentaire (Hegarty *et al.*, 2006b; Hopkins *et al.*, 2007). Ces incertitudes sont liées au fait que les animaux recevant le niveau alimentaire plus élevé sont souvent abattus plus lourds et que les différences dans l'alimentation peuvent être quantitatives, mais également qualitatives. Un **apport insuffisant en azote** par rapport aux besoins des animaux, notamment, conduit à une augmentation de l'état d'engraissement (Hegarty *et al.*, 1999; Thériez, 1985). La **nature des protéines** est importante, les protéines *by-pass* échappant aux dégradations ruminales étant les plus efficaces pour réduire l'état d'engraissement (Ponnampalam *et al.*, 2004). Enfin, l'effet d'une **croissance compensatrice** est discuté, certains auteurs indiquant que la composition du gain est similaire à celle observée lors d'une croissance 'normale' (Oldham *et al.*, 1999 cités par Schreurs et Kenyon (2017b)), d'autres auteurs observant que la proportion de gras est un peu inférieure et la proportion de muscle et d'os supérieure lors d'une croissance compensatrice (Atti et Ben Salem, 2008).

Concernant le mode d'élevage, les **agneaux alimentés en bergerie** avec des rations riches en concentré tendent à être plus gras à poids vif donné que les **agneaux d'herbe**, cet effet étant attribué à un niveau alimentaire plus élevé et des dépenses énergétiques plus faibles (Priolo *et al.*, 2002), ainsi qu'à un rapport acide propionique/acide acétique plus élevé dans le rumen (Ponnampalam *et al.*, 2004). Par ailleurs, **le sevrage** peut induire une réduction de l'état d'engraissement : des agneaux sevrés à 4-6 semaines présentent une moindre épaisseur de gras dorsal que des agneaux allaités jusqu'à l'abattage, alors qu'un sevrage tardif (2 à 3 semaines avant l'abattage) n'a pas d'effet (Thériez, 1985) ; (Schreurs et Kenyon, 2017b).

Distribution des tissus dans la carcasse

On observe une forte variation de la teneur en lipides selon les **morceaux de viande** : 5% pour le gigot vs. 14% dans le collier, ces différences étant liées surtout à la présence de gras intermusculaire (Berthelot et Domange, 2018). La répartition du gras dans les différents sites de dépôts varie avec la **race** et le **sexe (Schreurs et Kenyon, 2017b)**. De même, les races sélectionnées pour le développement musculaire, comme la Texel, ont une proportion un peu plus élevée de tissu musculaire dans le gigot (Schreurs et Kenyon, 2017b). L'héritabilité de la proportion de muscle dans les morceaux nobles (épaule, filet, gigot) est suffisante pour envisager de sélectionner sur l'orientation de la distribution du tissu musculaire dans des sites particuliers de la carcasse (Anderson *et al.*, 2016 ; Tellam *et al.*, 2012). Par exemple, Campbell et McLaren (2007) ont montré que la sélection pour accroitre le développement musculaire du filet a augmenté le poids de ce muscle sans affecter les proportions de muscle dans les autres sites de la carcasse.

Conformation

Le facteur le plus important de la conformation de la carcasse est l'**âge**, la carcasse devenant plus épaisse et plus compacte avec le développement de l'animal. L'effet de la **race** est bien connu, les races bouchères, sélectionnées pour le développement musculaire étant généralement plus compactes et de profil plus convexes (Navajas *et al.*, 2008). Cependant, une étude incluant différentes races a montré que la note de conformation était assez peu reliée avec la quantité de muscle dans la carcasse, contrairement à ce qui est observé chez les bovins (Kempster, 1981).

Fermeté et couleur du gras de couverture

Après ressuyage, le tissu adipeux de couverture peut présenter deux types de défauts : un manque de fermeté (gras mous voire huileux, alors que l'on recherche un gras ferme) et une couleur indésirable (brun-rouge, jaune, alors que l'on cherche un gras blanc) (Prache et Bauchart, 2015). Ces défauts, souvent associés, peuvent entraîner une dépréciation commerciale et l'exclusion des démarches qualité.

Le manque de fermeté est surtout observé chez les **agneaux engraissés en bergerie**, dont le gras de couverture est plus riche en eau et en AG à faible point de fusion (moins d'AG saturés (AGS) pairs et plus d'AGS impairs, d'AG insaturés et d'AG ramifiés, tous à point de fusion inférieur à celui des AGS pairs). Avec des rations riches en concentrés en effet, la sécrétion salivaire est réduite et la vitesse de fermentation accélérée, ce qui conduit à une baisse de pH ruminal et à une augmentation de la production de propioniate, lequel a un rôle prépondérant pour la synthèse des AGS impairs et ramifiés (Berthelot *et al.*, 2001). Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse de transit diminue la biohydrogénation des lipides insaturés des aliments (Berthelot et Gruffat, 2018). Le **type sexuel** a un effet important, la fréquence des défauts étant dans l'ordre décroissant mâles entiers > mâles castrés > femelles (Normand *et al.*, 1997). La limitation des apports d'aliment concentré en fin d'engraissement au profit du fourrage, la distribution de céréales entières et la castration permettent de diminuer ces défauts, mais la nature des aliments concentrés a peu d'effet (Theriez *et al.*, 1997). L'utilisation de graines de lin pour enrichir la viande en AGPI n-3 ne dégrade pas la qualité du gras de couverture (Berthelot *et al.*, 2012).

Le **niveau et la durée d'allaitement** ont un effet favorable, les lipides du lait étant riches en AGS pairs. Chez les agneaux d'herbe, la **nature de la prairie** peut influencer la fermeté du gras de couverture : une prairie riche en légumineuses

comparativement à du Ray-grass accroît le rapport AGPI/AGS, pouvant ainsi altérer la fermeté du gras (Lourenco *et al.*, 2007). Le pâturage de prairies riches en légumineuses peut ainsi conduire à un gras moins ferme, point à souligner pour l'élevage biologique où les légumineuses sont recherchées (Prache *et al.*, 2011).

Les défauts de couleur du gras ont surtout une origine alimentaire (conduite alimentaire, niveau et nature des apports, forme de présentation de l'aliment), plus rarement pathologique (Prache et Galtier, 1990). Les **agneaux élevés à l'herbe** présentent un gras de couverture plus lumineux et plus jaune que les agneaux élevés en bergerie (Carrasco *et al.*, 2009; Priolo *et al.*, 2002), à cause du dépôt de pigments caroténoïdes ingérés, car les fourrages verts en sont riches (Prache *et al.*, 2003b) ; (Prache *et al.*, 2003a). Des **différences entre races** ont été démontrées pour un même niveau de caroténoïdes ingérés (Macari *et al.*, 2017). Il arrive (rarement) que ces pigments s'accumulent de façon excessive, mais sans que tous les mécanismes sous-jacents aient été clairement identifiés. Certaines races sont considérées comme plus sujettes que d'autres à des gras jaunes, mais cet effet est beaucoup plus documenté chez les bovins (Schreurs et Kenyon, 2017a). Le gène impliqué dans la synthèse de l'enzyme bêta-carotène oxygénase 2, qui participe à la conversion des caroténoïdes en vitamine A a été associé avec des gras excessivement jaunes chez les ovins (Vage et Boman, 2010), mais sans expliquer toute la variabilité observée. La teneur en caroténoïdes du tissu gras augmente aussi avec **l'âge** de l'animal, probablement en lien avec l'accumulation des pigments ingérés, mais ce phénomène dépend évidemment de la nature de la ration (Vage et Boman, 2010). Une restriction alimentaire avant abattage augmente l'incidence de défauts de gras jaune (Boom et Sheath, 1997). Enfin, une **finition en bergerie d'agneaux préalablement au pâturage** diminue la teneur du tissu gras en pigments caroténoïdes, par un phénomène de dilution (Prache *et al.*, 2003a). La réduction de la teneur en pigments ne dépend pas de la durée de la finition en tant que telle (Prache *et al.*, 2003a), mais du gain de poids vif durant cette période, selon un modèle d'exponentielle décroissante (Huang *et al.*, 2015). Ces auteurs ont ainsi calculé qu'il fallait une prise de poids vif de 10,4 kg en finition pour que la teneur en caroténoïdes du gras de couverture d'agneaux d'herbe atteigne celle d'agneaux engraissés exclusivement en bergerie. En revanche, la **complémentation au pâturage avec des céréales** n'a pas d'effet sur la teneur du tissu gras en caroténoïdes (Devincenzi *et al.*, 2019). L'accumulation de bilirubine dans les tissus gras (ictère) peut être liée à une hémolyse et/ou des problèmes hépatiques. Elle peut survenir lors d'infestation du foie par la douve, ou avec le pâturage de crucifères qui peut provoquer des troubles à la fois hémolytiques et hépatiques lorsqu'il est prolongé (Theriez *et al.*, 1997). Le défaut de gras brun-rouge est surtout observé chez les **agneaux de bergerie** et les **agneaux mâles** y sont plus sujets (Normand *et al.*, 1997). Il peut être attribué à l'accumulation excessive de pigments héminiques et aux produits de la peroxydation des AGPI (Prache et Galtier, 1990). Certaines races telles que l'Ile de France ou la Suffolk y sont moins sensibles, bien qu'il soit difficile de distinguer l'effet de la race de celui de l'effet du système d'élevage (Berthelot et Domange, 2018). La **limitation des apports d'aliment concentré** en fin d'engraissement au profit du fourrage et la distribution de **céréales entières** et la **castration** permettent de diminuer ces défauts (Theriez *et al.*, 1997).

2.3.2.2.Propriétés organoleptiques de la viande

La couleur de la viande joue un rôle essentiel au moment de l'achat, à la fois par son intensité et son éventuelle instabilité/altération. La qualité en bouche est jugée au moment de la consommation, le critère le plus important pour la viande ovine étant la flaveur, puis la tendreté et la jutosité, à la différence de la viande bovine pour laquelle c'est la tendreté qui importe le plus (Watkins *et al.*, 2013).

Couleur de la viande fraîche

La couleur recherchée est rouge clair, sauf pour les consommateurs du Sud de l'Europe (traditionnellement consommateurs d'agneaux jeunes) qui préfèrent une couleur rosée. La couleur de la viande fraîche est déterminée par sa **teneur en myoglobine** et son **pH**. Pour un morceau de viande, elle est fonction des **différentes proportions de fibres à contraction lente ou rapide** et de leur **métabolisme**, ainsi que de la **teneur en lipides** (Berthelot et Domange, 2018). **L'âge** des animaux, leurs **conditions d'élevage** (notamment l'**alimentation**), ainsi que les **conditions pré-abattage** (stress notamment) sont également des facteurs de variation importants.

Les agneaux dont la viande est la plus claire sont les agneaux de lait : leur viande est pâle, avec une teneur faible en myoglobine (Sanudo *et al.*, 1998). Pour les agneaux vendus plus lourds, la teneur du muscle en myoglobine et en conséquence son indice de rouge augmentent avec **l'âge** de l'animal, mais l'effet n'est pas linéaire : important durant les 120 premiers jours de vie, moins entre 120 et 270 jours d'âge, puis nul ensuite (Calnan *et al.*, 2016). Il n'y a généralement pas d'effet du **sexe** si les animaux sont abattus au même âge et au même état d'engraissement (Calnan *et al.*, 2016). L'effet de **la race** est controversé. Certains auteurs observent que les béliers de race Mérinos produisent des agneaux dont la viande est plus sombre que ceux issus de béliers de race Hampshire Down, Ile de France, Poll Dorset, Southdown, Suffolk et Texel à

cause d'une teneur plus élevée en myoglobine, mais ceci n'est pas confirmé dans d'autres études (Cloete *et al.*, 2012 ; Jacob et Pethick, 2014 ; Monaco *et al.*, 2015)).

La **durée et les conditions de transport** entre la ferme et l'abattoir sont importantes, car l'augmentation du stress et l'utilisation des réserves en glycogène musculaire ante mortem conduisent à un pH élevé de la viande, responsable d'une couleur sombre (Miranda-de la Lama *et al.*, 2012).

Pour les agneaux lourds, les agneaux de bergerie présentent généralement peu de défauts, car ayant de fortes vitesses de croissance, ils sont abattus jeunes. C'est la viande des agneaux finis à l'herbe qui présente le plus fort risque de défauts de couleur de la viande. En effet, l**a viande des animaux qui ont pâturé est plus sombre que celle des animaux qui ont été alimentés avec un régime à base de concentré** (Priolo *et al.*, 2002). Cet effet du mode d'élevage est multifactoriel, avec des facteurs directs liés à la nature de l'alimentation et à l'activité physique, mais aussi des facteurs indirects, qui tous s'additionnent. L'activité physique conduit à une évolution des fibres musculaires vers un métabolisme plus oxydatif, avec une augmentation de la teneur en myoglobine (Hopkins et Nicholson, 1999 ; Jurie *et al.*, 2006). Les viandes issues d'animaux à l'herbe sont également plus enclines à un pH ultime élevé (> 5,8-6,0), ce qui concourt aussi à assombrir la viande ; ceci est dû à de moindres réserves en glycogène avant abattage et/ou à une sensibilité plus forte aux stress de manipulation pré-abattage qui contribuent à la diminution des réserves en glycogène (Sheath *et al.*, 2001). On recommande ainsi d'assurer un certain niveau de croissance pendant quelques semaines avant abattage pour les animaux finis à l'herbe, les recommandations étant plus élevées pour les **races** plus sujettes aux défauts de viandes sombres (Pannier *et al.*, 2018). Ces différences entre modes d'élevage peuvent aussi être accentuées par des différences **d'âge de l'animal à l'abattage** et **de teneur en gras intramusculaire**. L'âge à l'abattage est en effet généralement plus élevé chez les agneaux d'herbe, ce qui diminue l'indice de luminosité et augmente l'indice de rouge de la viande en lien avec une teneur en myoglobine plus élevée. La teneur en gras intramusculaire est également souvent plus faible chez les agneaux d'herbe, ce qui diminue l'indice de luminosité de la viande (Warner *et al.*, 2010). L'effet de la nature du fourrage vert offert est controversée : certaines études ne montrent pas d'influence (Calnan *et al.*, 2016), alors que d'autres observent une viande moins colorée quand les agneaux pâturent des prairies riches en tannins (Vasta *et al.*, 2008).

Il est important de préciser qu'il peut y avoir des conditions de pâturage et de vitesse de croissance des animaux au pâturage très variables ainsi qu'une forte variabilité entre animaux, ce qui peut **accroitre la variabilité de la couleur de la viande** chez les animaux issus des systèmes herbagers. La production d'agneaux à l'herbe est ainsi plus sujette à des **risques de couleur plus sombre de la viande, et à une plus grande variabilité de cette couleur**. La période juste avant **abattage** joue également fortement : les **dépenses** physiques et les **stress émotionnels** (manipulations, transport, mélanges d'animaux) ainsi que le **jeûne prolongé** prédisposent à des risques de pH ultime élevé. A signaler que des méthodes optiques rapides sont en développement pour la mesure du pH de la viande (Yao *et al.*, 2019).

Qualité en bouche

Les préférences des consommateurs sont liées aux habitudes culturelles et alimentaires.

Un programme européen a montré qu'une grande part de la variabilité de l'appréciation de la viande d'agneau par des consommateurs non entraînés de 6 pays (Grèce, Italie, Espagne, France, Royaume Uni et Islande) est expliquée par le **système de production** et qu'il y a deux grands types de consommateurs de viande ovine en Europe : **ceux des pays méditerranéens** qui préfèrent les agneaux nourris avec des rations à base de concentrés ou les agneaux de lait, avec une flaveur peu intense, et **ceux des pays du Nord de l'Europe** qui préfèrent les agneaux nourris à l'herbe (ou avec une ration à base d'herbe), avec une flaveur plus intense (Sanudo *et al.*, 2007). Ces préférences sont fortement liées aux systèmes et pratiques d'élevage traditionnels de ces pays et en conséquence aux habitudes culinaires, sensorielles et culturelles, comme cela avait déjà été constaté avec des jurys entraînés (Fisher *et al.*, 2000; Sanudo *et al.*, 1998). Ceci explique pourquoi certains consommateurs ne sont pas habitués à la flaveur 'pastorale' spécifique des agneaux d'herbe et préfèrent la viande d'agneaux nourris avec des concentrés et que l'inverse est également constaté (Font-i-Furnols *et al.*, 2006). Ce projet a aussi montré que des agneaux âgés de 1 an (conduits dans un système transhumant) sont clairement séparés des autres, car c'est un type d'agneau local auquel la plupart des consommateurs européens ne sont pas habitués. Il y a donc un lien fort entre l'intensité d'appréciation d'un type d'agneau et les habitudes culinaires et sensorielles (Fisher *et al.*, 2000 ; Sanudo *et al.*, 1998). Dans cette étude européenne, la France était classée avec le Royaume Uni et l'Islande, mais elle était le pays le plus proche de l'autre groupe, constitué de la Grèce, l'Italie et l'Espagne. De même, lorsque l'on compare l'appréciation par des consommateurs d'une région donnée différents produits nationaux, ceux qui sont les mieux connus localement sont les plus appréciés (Martinez-Cerezo *et al.*, 2005). Une étude plus récente (Font-i-Furnols *et al.*, 2009) apporte des nuances. Elle a été conduite avec des consommateurs de 4 pays européens (Espagne, Allemagne, Royaume Uni et France) auxquels on a fait

déguster de la viande issue d'agneaux provenant d'Uruguay, élevés en bergerie, à l'herbe, ou à l'herbe avec 2 niveaux d'apport de complément en concentré (0,6% ou 1,2% du poids vif). Les côtelettes ont été soumises à une cuisson de type grill jusqu'à une température interne de 72°C (65°C pour les consommateurs français). Les résultats montrent que i) les consommateurs espagnols, allemands et français préfèrent la viande issue d'agneaux de bergerie, ii) les consommateurs allemands apprécient la viande d'agneau, même s'ils ne la consomment pas fréquemment et iii) les consommateurs britanniques préfèrent la viande issue de systèmes associant pâturage et concentré, iv) il y a des 'clusters' de consommateurs qui montrent des préférences spécifiques, mais aucun ne préfère la viande produite exclusivement à l'herbe.

Effet des caractéristiques animales sur la qualité en bouche

Les données de la littérature sont contradictoires pour ce qui concerne l'effet du **génotype** sur les qualités en bouche (appréciation de la flaveur, tendreté, jutosité et appréciation globale) (Pannier *et al.*, 2018). Pour ces auteurs, ces contradictions sont liées au fait que i) les études sont souvent fondées sur de faibles effectifs, ii) certaines études utilisent des jurys experts entraînés et d'autres des consommateurs non entraînés, iii) les études utilisent une combinaison de facteurs de production, ce qui rend les comparaisons difficiles. Plusieurs études ont conclu à peu (ou pas d'effet) de la race sur la qualité en bouche (Arsenos *et al.*, 2002 ; Esenbuga *et al.*, 2001). En revanche, au Royaume Uni, la viande d'agneaux de race Scottish Blackface a été jugée plus tendre et a été plus appréciée que la viande d'agneaux Texel (Navajas *et al.*, 2008) ou d'agneaux Texel x Scottish Blackface (Gkarane *et al.*, 2017). Par ailleurs, les génotypes porteurs des mutations Callipyge et Carwell, gènes responsables d'hypertrophie musculaire, présentent une tendreté et une teneur en gras intramusculaire moindres (Duckett *et al.*, 2000 ; Warner *et al.*, 2010). Cependant, même lorsque les études observent des différences entre races, ce facteur est jugé comme mineur par rapport à d'autres (alimentation, par exemple) (Arsenos *et al.*, 2002). Par ailleurs, la variation intra-race étant élevée (Pannier *et al.*, 2018), il serait important de constituer des bases de données importantes (analyses sensorielles sur un grand nombre d'animaux issus d'un nombre important de béliers d'une race donnée et de différentes races) pour pouvoir conclure de manière robuste. Etonnamment d'ailleurs, on peut constater que, si certains composés impliqués dans les défauts de flaveur présentent une variabilité interindividuelle importante chez des animaux de mêmes caractéristiques (race, âge, poids, type sexuel) et de mêmes conditions d'élevage (Devincenzi *et al.*, 2019), il n'y a pas d'information sur l'héritabilité de la flaveur et de l'odeur de la viande d'agneau et de la teneur en composés impliqués dans ces caractéristiques (Watkins *et al.*, 2013) ni d'études faisant état de sélection sur ce critère.

Le **type sexuel** a un effet (faible) sur la qualité en bouche avec en général dans l'ordre femelles > mâles castrés > mâles (Arsenos *et al.*, 2002 ; Gkarane *et al.*, 2017 ; Gravador *et al.*, 2018; Navajas *et al.*, 2008 ; Pannier *et al.*, 2014). Ces différences sont souvent attribuées à la teneur en gras intramusculaire (Craigie *et al.*, 2012), mais pas toujours (Pannier *et al.*, 2014). Certaines études n'ont pas montré d'effet du type sexuel (Teixeira *et al.*, 2005 ; Tejeda *et al.*, 2008), mais elles étaient réalisées avec des agneaux abattus légers, donc moins enclins à des défauts. Dans leur synthèse, Pannier *et al*. (2018) considèrent que cet effet est mineur par rapport à d'autres (niveau de gras intramusculaire, alimentation). Par ailleurs, en Irlande, les mâles entiers sont appréciés, même s'ils le sont un peu moins que les mâles castrés (Gravador *et al.*, 2018). Pour ce qui concerne spécifiquement la tendreté, la synthèse de Sales (2014) réalisée à partir de 55 études montre que la tendreté est généralement supérieure pour les mâles castrés que les mâles entiers. Cependant, d'autres auteurs n'observent pas d'effet du sexe ou de la castration sur la tendreté de la viande ovine (Craigie *et al.*, 2012; Schreurs, 2013). Quant à la flaveur/odeur de la viande, il y a peu de différences entre femelles, mâles castrés ou entiers (Schreurs, 2013; Teixeira *et al.*, 2005 ; Young *et al.*, 2006).

Les animaux **âgés** ont une qualité en bouche inférieure aux animaux jeunes pour tous les critères (tendreté, jutosité, flaveur, appréciation globale) (Hopkins *et al.*, 2006). Les résultats de l'évaluation de la tendreté par des consommateurs sont confirmés par des mesures instrumentales. Cet effet de l'âge sur la tendreté dépend du muscle, l'âge impactant moins la tendreté des muscles moins riches en collagène (Hopkins *et al.*, 2013 ; Pannier *et al.*, 2018; Pethick *et al.*, 2005). Des flaveurs plus intenses et des défauts de flaveur plus prononcés sont observés chez des animaux plus âgés (Gravador *et al.*, 2018; Rousset-Akrim *et al.*, 1997). La flaveur de 'mouton' augmente en effet avec l'âge (Channon *et al.*, 1997), ceci étant attribué à une augmentation de la teneur du tissu gras en acides gras (AG) à chaîne courte et ramifiée (AGCR, dont les plus importants sont 4-methyloctanoique –MOA-, 4-ethyloctanoique –EOA-et 4-methylnonanoique –MNA-, Watkins *et al*. (2013)). Cependant, cet effet de l'âge apparaîtrait probablement après 1 an, car Watkins *et al*. (2014) n'ont pas observé de relation entre l'intensité d'appréciation de la flaveur et la teneur du tissu gras en **acides gras à chaine courte et ramifiée (AGCR)** chez des agneaux. Il faut signaler que la gamme d'âge étudiée dans les études précédentes ne recouvre pas toute la gamme d'âge à l'abattage des agneaux produits et consommés dans les pays du Sud de l'Europe (agneaux jeunes voire très jeunes).

Le **niveau de lipides intramusculaire** (LIM) de la viande est un facteur important de la qualité en bouche. Des développements méthodologiques sont en cours pour le mesurer en ligne à l'abattoir par spectroscopie dans le proche infra-

rouge –SPIR- (Craigie *et al.*, 2014; Guy *et al.*, 2011). Il est positivement lié à la tendreté, la jutosité, la flaveur et l'appréciation globale (Hopkins *et al.*, 2006 ; Pannier *et al.*, 2018; Pannier *et al.*, 2014 ; Young *et al.*, 2005b), même si les relations entre LIM et les différents critères de qualité en bouche peuvent varier entre pays (Pannier *et al.*, 2018). C'est la raison pour laquelle la qualité en bouche augmente aussi avec l'état d'engraissement de la carcasse ; (Pannier *et al.*, 2018; Pannier *et al.*, 2014). Quand les animaux deviennent plus âgés, la proportion de gras dans la carcasse augmente, et donc aussi le niveau de LIM. Ceci peut impacter plus la tendreté que la réduction concomitante de solubilité du collagène (Hopkins *et al.*, 2006).

Il faut en fait trouver un compromis entre les qualités organoleptiques, diététiques et commerciales, donc entre un niveau de LIM suffisant pour garantir la qualité en bouche, mais pas trop pour ne pas pénaliser l'acceptabilité commerciale de la carcasse ni les aspects diététiques. Ainsi, si des études australiennes recommandent un niveau de LIM > 5% dans le *longissimus lumborum* pour le classer dans la catégorie 'better than every day' (Hopkins *et al.*, 2006 ; Pannier *et al.*, 2018), un niveau <= 3-5% étant considéré comme affectant négativement la qualité en bouche (Watkins *et al.*, 2013), un niveau d'IMF <= 3% est recommandé pour une allégation de faible taux de gras (Pannier *et al.*, 2018). A signaler l'effet négatif pour les qualités en bouche de la sélection pour le développement musculaire et l'épaisseur de la noix de côtelette et contre le gras de couverture (Pannier *et al.*, 2014). Là aussi, il faut trouver un compromis pour une sélection équilibrée combinant ces deux caractéristiques antagonistes (Pannier *et al.*, 2018). Des méthodes sont actuellement en développement en Australie pour objectiver la qualité en bouche (pour chaque combinaison de muscle *x* méthode de cuisson) à partir de mesures réalisées à l'abattoir, comme celles utilisées actuellement en viande bovine (Pannier *et al.*, 2018).

Enfin, les **gras de couverture ou intermusculaires** jouent un rôle d'isolant thermique lors de la réfrigération des carcasses. Quand ils sont suffisamment développés, ils limitent les risques de contracture au froid liés à une réfrigération trop rapide et intense, qui provoquent une altération de la tendreté (Berthelot et Domange, 2018). La stimulation électrique des carcasses juste après abattage permet d'épuiser les réserves du muscle en glycogène et de refroidir rapidement la carcasse en évitant ce risque.

Un point particulier sur la flaveur, caractéristique la plus importante pour la qualité en bouche de la viande ovine

A l'état cru, la viande a peu de flaveur, c'est lors de la cuisson que celle-ci se développe. Parmi les facteurs de variation de la flaveur, on distingue les facteurs de production ante-mortem qui comprennent la race, l'âge, le type sexuel, l'alimentation, l'état d'engraissement, et les facteurs post-mortem qui comprennent le pH du muscle, les conditions de stockage, la durée de réfrigération et la cuisson.

La viande ovine a une flaveur (combinaison de l'odeur/arôme et du goût) unique, distincte de celle des autres viandes rouges, qui est recherchée par les amateurs, mais qui peut, à l'inverse, être un frein pour d'autres. Les études scientifiques observent une grande variation dans l'appréciation et la sensibilité aux flaveurs entre groupes de consommateurs et entre jurys d'un même panel de dégustateurs évaluant les mêmes échantillons de viande (Farouk *et al.*, 2007; Prescott *et al.*, 2001). C'est une des raisons pour laquelle les travaux ayant étudié l'impact de la **nature de l'alimentation** sur la flaveur de la viande ovine ont produit des réponses variables. La synthèse de Watkins *et al*. (2013) montre de plus que cet **effet est complexe et pas encore complètement compris**. Il n'y a d'ailleurs **pas encore de consensus sur les composés volatils permettant d'obtenir une flaveur 'souhaitable' de la viande ovine, ni même sur ceux impliqués dans les différences de flaveur** comparativement aux autres viandes rouges, par exemple la viande bovine (Watkins *et al.*, 2013). Les recherches sur les composés impliqués dans la flaveur de la viande ovine et ses sources de variation sont très évolutives, ainsi la méta-analyse réalisée par Watkins *et al*. (2013) indique que 28 composés volatils ont été identifiés dans la viande ovine, dont 15 sont considérés comme contribuant significativement à la flaveur, alors que la récente étude de Gkarane *et al*. (2019) détecte 64 composés aromatiques désorbés du muscle *longissimus thoracis et lumborum*. Watkins *et al*. (2013) soulignent par ailleurs que i) au-delà des composés volatils, peu de travaux se sont intéressés aux composants non volatils impliqués dans le goût de la viande et leur rôle dans la flaveur, ii) il manque encore une approche intégrée englobant les caractéristiques animales, les pratiques d'élevage et de consommation pour expliquer et prédire plus complètement les caractéristiques de flaveur.

Historiquement, on s'est beaucoup intéressé à la flaveur **'mouton'** et à la flaveur **'pastorale'**. La première augmente avec l'**âge** de l'animal et se développe surtout lors de la cuisson de la viande issue d'animaux âgés (Watkins *et al.*, 2010) ; elle est au moins en partie due aux AGCR (Watkins *et al.*, 2013 ; Watkins *et al.*, 2014). Ces composés sont plutôt considérés comme associés aux régimes à base de concentrés (Young *et al.*, 2003), mais Young et Braggins (1998) soulignent que les céréales peuvent différer dans leur propension à les générer et des niveaux plus élevés ont parfois été observés chez des agneaux finis à l'herbe (Watkins *et al.*, 2010). La flaveur **'pastorale'** est liée à l'alimentation à l'herbe (Young *et al.*, 1997). Les composés principaux identifiés comme y contribuant sont i) le 3-methylindole (ou **scatol**, contributeur principal, qui est issu de la dégradation ruminale de l'acide aminé tryptophane) ; l'herbe de printemps notamment, riche en protéines et qui présente

un rapport protéines/carbohydrates rapidement fermentescibles élevé conduit à une production de scatol importante (Young *et al.*, 2003) et ii) les **produits d'oxydation de l'acide alpha-linolénique (ALA)** formés lors de la cuisson (Schreurs *et al.*, 2008; Young et Baumeister, 1999). Ce ne sont cependant pas les seules flaveurs caractéristiques qui ont été rapportées avec la viande ovine : par exemple, les **crucifères**, comme le colza et les choux contiennent des composés tels que les glucosinolates qui peuvent donner une flaveur mal acceptée par les consommateurs (Hopkins *et al.*, 1995) et il est recommandé de ne plus les faire pâturer pendant 3 à 7 semaines avant abattage (Watkins *et al.*, 2013).

Effet de l'alimentation et plus largement du mode d'élevage sur la qualité en bouche

L'alimentation et plus largement le mode d'élevage influencent fortement la qualité en bouche à travers i) des effets directs, notamment sur les **composantes de la flaveur** (Watkins *et al.*, 2013), et ii) des effets indirects, en particulier le **niveau de LIM** (en général plus faible chez les agneaux au pâturage ; (Diaz *et al.*, 2002 ; Pannier *et al.*, 2017; Priolo *et al.*, 2002) et l'**âge** à l'abattage (en général plus élevé chez les agneaux d'herbe).

La viande des agneaux sevrés est généralement moins juteuse que celle des agneaux non sevrés, ce qui a été attribué à **l'effet du sevrage** sur la mobilisation du tissu gras (Sanudo *et al.*, 1998).

La viande **d'agneaux finis à l'herbe (pâturée ou conservée) présente une flaveur différente de celle d'agneaux finis avec des rations à base de concentrés**, différence perceptible par des jurys entraînés, mais pas toujours par des jurys non entraînés (Devincenzi *et al.*, 2019 ; Priolo *et al.*, 2009 ; Resconi *et al.*, 2009 ; Rivaroli *et al.*, 2019; Schreurs et Kenyon, 2017a ; Watkins *et al.*, 2013). Ces différences sensorielles sont dues à des composés présents dans la viande fraîche ou générées pendant la cuisson. La viande des agneaux d'herbe présente aussi souvent une tendreté inférieure (Priolo *et al.*, 2002 ; Resconi *et al.*, 2009).

Par ailleurs, l'élevage à l'herbe pouvant accroitre la variabilité de l'âge à l'abattage, en raison de la variabilité des conditions de pâturage et de croissance des animaux, on observe **une variabilité plus importante** de la flaveur, de l'odeur et de la tendreté de la viande issue d'agneaux d'herbe comparativement à la viande issue d'agneaux de bergerie. Ainsi, Rousset-Akrim *et al*. (1997) ont montré que la flaveur et l'odeur étaient peu augmentées chez des agneaux d'herbe abattus à 100 jours, alors qu'elles étaient fortement augmentées chez des agneaux d'herbe abattus âgés à 220 jours. Comme les composés responsables de la flaveur pastorale varient avec la composition de l'herbe, il est également probable qu'il puisse y avoir des **variations saisonnières** de la flaveur chez les agneaux finis à l'herbe, avec notamment des intensités de flaveur 'pastorale' plus élevées lorsque l'herbe est plus jeune, donc plus riche en azote et en ALA (Watkins *et al.*, 2013).

En général, les agneaux d'herbe ont des teneurs plus élevées en **scatol** et **plus de défauts de flaveur** (Resconi *et al.*, 2009 ; Young *et al.*, 2003), une odeur et une flaveur de 'mouton' plus intense (Sanudo *et al.*, 1998 ; Wood et Fisher, 1990) et une flaveur plus rance, acide ou de foie (Priolo *et al.*, 2002 ; Resconi *et al.*, 2009) que les agneaux de bergerie. La viande d'agneaux d'herbe présente également une **teneur plus élevée en ALA** (Aurousseau *et al.*, 2004 ; Enser *et al.*, 1998) dont les produits d'oxydation lors de la cuisson sont en partie responsables de la flaveur pastorale (Young et Baumeister, 1999).

L'effet de la **nature de la prairie** sur la flaveur de la viande est important. Dans des essais comparant différents types de prairies, des défauts de flaveur ont été relevés par des jurys entraînés pour le trèfle blanc, la luzerne et le phalaris, ainsi que le colza (Schreurs et Kenyon, 2017a). Les légumineuses telles que le trèfle blanc et la luzerne présentent en effet des teneurs élevées en protéines rapidement dégradables, ce qui augmente la synthèse ruminale de scatol et d'indole (Schreurs *et al.*, 2007a; Schreurs *et al.*, 2007c), et en conséquence la concentration de ces composés odorants dans le tissu gras (Devincenzi *et al.*, 2014; Schreurs *et al.*, 2007b). A signaler donc un risque accru de défauts de flaveur pour la viande produite en **élevage biologique** où les légumineuses sont recherchées dans les prairies, comme l'ont confirmé Prache *et al*. (2011) et Kocak *et al*. (2016). D'autres études n'ont cependant pas observé de telles différences (synthèse de Watkins *et al*. (2013). Par exemple, Angood *et al*. (2008) ont comparé la qualité en bouche de côtelettes d'agneaux bio vs. conventionnels achetées en supermarché : la jutosité et l'intensité de la flaveur 'agneau' ont été jugées plus élevées pour les agneaux bio, lesquels ont été plus appréciés. Ces différences de conclusions entre études peuvent être liées à des différences d'habitudes alimentaires entre panels, comme évoqué précédemment, mais aussi à des différences méthodologiques dans les critères utilisés et/ou dans la signification d'un critère donné. Certains auteurs considèrent par exemple que l'odeur et le goût sont des attributs de la flaveur (Watkins *et al.*, 2013), d'autres les traitent séparément (Girard *et al.*, 2016a). Certains auteurs soulignent ainsi l'utilité d'homogénéiser les méthodologies utilisées dans l'évaluation sensorielle de la viande (Watkins *et al.*, 2013). Par ailleurs, concernant la comparaison entre élevage biologique et conventionnel, il faut souligner la grande diversité de pratiques d'élevage dans chaque mode de production, ce qui peut rendre les comparaisons peu robustes, voire biaisées si

les pratiques d'élevage ne sont pas précisées (Prache *et al.*, 2009). Contrairement à ce qui est observé pour la flaveur, la nature de la prairie a peu d'effet sur la tendreté (De Brito *et al.*, 2016).

Des **stratégies nutritionnelles** ont été testées **pour moduler la flaveur** (notamment la réduire). Par exemple, les concentrations en scatol et indole du tissu gras peuvent être réduites par l'utilisation de **tannins condensés** (TC), une famille de polyphénols présents naturellement dans certains légumineuses (sainfoin, lotier corniculé, sulla, par exemple) ou d'autres plantes qui peuvent être offertes sous forme de poudres ou d'extraits (quebracho, extraits de pépins de raisin). Les TC forment des complexes avec les protéines, inhibant ainsi la formation ruminale de scatol et d'indole (Tavendale *et al.*, 2005). Plusieurs études ont montré une diminution de la teneur en scatol et indole du tissu gras (ainsi qu'une diminution de la variabilité de cette teneur) avec l'incorporation dans la ration de plantes contenant des TC (Girard *et al.*, 2016a ; Priolo *et al.*, 2009 ; Rivaroli *et al.*, 2019; Schreurs *et al.*, 2007c). Cependant, l'évaluation sensorielle a été parfois décevante, sans effet (Rivaroli *et al.*, 2019; Schreurs *et al.*, 2007c) ou peu (Girard *et al.*, 2016a) sur la flaveur. Ces auteurs concluent que les réductions dans les teneurs en scatol et indole n'ont peut-être pas été suffisantes pour induire des différences de flaveur et il est probable en effet que l'efficacité des TC pour réduire les défauts de flaveur soit liée à la teneur de la ration en TC. Par ailleurs, certains auteurs n'observent pas de corrélation entre la teneur en scatol du tissu gras et l'intensité de la flaveur (Priolo *et al.*, 2009) et ils suggèrent que les TC n'agissent pas seulement sur la flaveur *via* la réduction de la production ruminale de scatol, mais également via la réduction de la production de propionate, à l'origine des AGCR responsables de la flaveur 'mouton'.

L'**apport de céréales** à des agneaux pâturant de la luzerne a été testé par Devincenzi *et al*. (2019) avec l'hypothèse de rééquilibrer le rapport protéines/carbohydrates rapidement fermentescibles dans le rumen, mais cette pratique n'a pas été concluante, ni sur la réduction de la concentration en scatol et indole, ni sur les critères d'intensité de la flaveur. Cependant, Resconi *et al*. (2009) ont observé une diminution de l'intensité des odeurs inhabituelles et des flaveurs rance et acide en augmentant la proportion de concentré chez des agneaux au pâturage. Par ailleurs, Gkarane *et al*. (2019) ont testé **l'effet de la finition d'agneaux d'herbe** pendant des durées variant de 36 à 72 jours avec des rations différentes (ensilage d'herbe, concentré, ou un mélange pour moitié de ces deux aliments). La finition des agneaux d'herbe avec un régime à base de concentrés a permis de réduire la concentration en scatol et indole de la viande dès la finition la plus courte, mais sans effet sur l'intensité des différents critères de flaveur associés (fécal, animal, bergerie) ni sur l'intensité du critère 'défauts de flaveur'. Au final, les auteurs considèrent que les différences de profils en composés volatils étaient insuffisants pour impacter fortement la qualité sensorielle de la viande.

L'utilisation de compléments du type **huile de poisson** ou **algues** enrichies en EPA et DHA, si elle améliore favorablement la qualité nutritionnelle en augmentant leurs teneurs dans la viande (voir synthèse de Chikwanha *et al*. (2018), détériore en général la qualité sensorielle en produisant des défauts d'odeur et/ou de flaveur (odeur de poisson pour l'huile de poisson, flaveur anormale et rance pour les algues) (Elmore *et al.*, 2005).

Enfin, il faut signaler une grande **variabilité interindividuelle** dans la concentration en scatol et indole du tissu gras d'animaux de caractéristiques par ailleurs identiques (âge, sexe, race) conduits dans des conditions similaires (Devincenzi *et al.*, 2019).

Effet de la durée et des conditions de transport pré-abattage

Le stress pendant la période pré-abattage conduit à une viande plus sombre, moins tendre et à moindre durée de conservation (Sheath *et al.*, 2001). Plusieurs auteurs rapportent une relation curvilinéaire entre le pH ultime de la viande et sa tendreté (Purchas, 2012 ; Thompson, 2002), avec des valeurs de force de cisaillement les plus élevées pour des valeurs de pH comprises entre 5,8 et 6,2. Dans une étude sur l'effet des conditions de transport des agneaux entre la ferme et l'abattoir, Miranda de la Lama *et al*. (2012) ont montré que les transports de longue durée et effectués dans des conditions climatiques difficiles (hiver) induisaient une mobilisation importante du glycogène musculaire conduisant à des viandes à pH élevé, plus sombres et moins tendres. De même, dans l'étude de Dalmau *et al*. (2014), des agneaux subissant un transport de 24 h avant abattage produisaient une viande moins tendre que ceux subissant un transport de seulement 1 h. Il faut signaler que la sensibilité au stress est moins élevée chez les animaux élevés en bâtiments, qui sont plus habitués à la proximité des congénères et ont souvent des contacts plus fréquents avec l'homme que ceux qui sont élevés en plein air (Sheath *et al.*, 2001).

Effet de la durée de maturation

La maturation améliore la tendreté de la viande (Jaborek *et al.*, 2018 ; Pannier *et al.*, 2018), la durée minimale recommandée pour la viande ovine étant de 5 jours (Pannier *et al.*, 2018).

2.3.2.3.Propriétés nutritionnelles

La viande d'agneau lourd recouvre un ensemble de morceaux de composition variable en nutriments (Tableau 2.3.2, Gandemer *et al*. (2008)). Elle constitue une source alimentaire de protéines riches en acides aminés essentiels, hautement digestibles (autour de 20 g/100 g de muscle) et dont l'équilibre est proche du besoin de l'homme. De plus, c'est une source de micronutriments d'intérêt nutritionnel, tels que le fer héminique, le zinc et le sélénium et des vitamines de type B3, B6, et surtout B12. Les dépôts de fer héminique et de vitamines B varient avec le type métabolique des fibres musculaires, alors que celui des lipides (notamment de triglycérides) varie avec la localisation anatomique des muscles (Tableau 2.3.2). Les données concernant les teneurs en minéraux et vitamines ont cependant été obtenues sur un faible nombre d'animaux de bergerie (8), et les facteurs de variation potentiels liés au mode de production (phase d'élevage) ou aux procédés technologiques appliqués à la viande n'ont pas été considérés. Ils sont également absents de la littérature scientifique, alors que chez les bovins, Duckett *et al*. (2009) ont montré que la viande d'animaux au pâturage (vs. recevant une part importante de concentré en finition) était plus riche en vitamines B1 et B2.

La teneur en protéines varie peu d'une race ou d'un morceau à l'autre et l'alimentation de l'animal ne constitue pas un levier de modulation de la composition en acides aminés de sa viande (Berthelot et Domange, 2018). La viande d'agneau de lait contient moins de fer que la viande d'agneau sevré et est considérée comme une viande blanche (Berthelot et Domange, 2018).

Tableau 2.3.2. Teneurs (pour 100 g de muscle frais) en matière sèche, protéines et lipides totaux, minéraux majeurs et vitamines du groupe B de cinq morceaux de viande d'agneau (Gandemer *et al.*, 2008).

	Côte première	Côte filet	Selle	Collier	Gigot
Nutriments majeurs					
Matière sèche (g)	28,4	26,2	25,0	31,9	26,5
Protéines (g)	20,1	20,8	20,3	18,3	19,8
Lipides (g)	7,6	4,6	4,3	13,2	6,3
Minéraux majeurs					
Fer total (mg)	1,31	1,36	1,31	1,27	1,45
Fer héminique (mg)	0,61	0,67	0,66	0,66	0,70
Zinc (mg)	2,6	2,7	3,0	3,8	2,9
Sélénium (µg)	4,6	4,8	4,8	4,6	4,7
Vitamines groupe B					
Vit. B_3 (mg)	6,7	6,9	6,7	4,3	6,4
Vit. B_6 (mg)	0,28	0,31	0,28	0,15	0,26
Vit. B_{12} (µg)	1,49	1,21	1,68	2,06	1,88

Cent grammes de viande d'agneau (sevré) couvrent 10 à 20% des besoins journaliers en fer, zinc, sélénium et vitamine B6, 40% des besoins en vitamine B3 et 100 à 200% des besoins en vitamine B12 (Gandemer *et al.*, 2008 ; Montossi *et al.*, 2013). Cependant, comme pour la viande bovine, le comportement d'achat des consommateurs est influencé par les allégations de valeur santé émises par le corps médical concernant leurs acides gras (AG). Présents notamment dans les triglycérides (graisses), ils sont jugés généralement *i)* trop riches en AG pro-athérogènes (notamment le C16:0) et *ii)* pauvres en AG polyinsaturés de la série n-3 (AGPI n-3) essentiels dans la protection vis-à-vis des maladies cardiovasculaires. Par ailleurs, leurs AG insaturés (notamment ceux des phospholipides) sont sensibles aux phénomènes de peroxydation, qui peuvent générer le dépôt de composés oxydés toxiques pour la santé des consommateurs. Cependant, les lipides de la viande de ruminants ne contribuent qu'à environ 5% des lipides consommés par l'homme (Berthelot et Domange, 2018).

La viande ovine contient essentiellement des AG à chaîne moyenne à longue (12-22 atomes de carbone), ainsi que des teneurs plus faibles d'AG volatils à chaîne courte, impaire et ramifiée (4-11 atomes de carbone) surtout présents dans le tissu adipeux (Wood *et al.*, 2008). Par rapport à la viande de bovins, la viande d'agneau contient une plus forte proportion d'AGPI n-3 (Berthelot et Gruffat, 2018) et d'AGPI intermédiaires de la biohydrogénation, dont les acides linoléiques conjugués (CLA), avec l'isomère cis9, trans11 (acide ruménique) qui présente des propriétés potentielles de prévention contre certaines pathologies ((Chikwanha *et al.*, 2018), Tableau 2.3.4.). Ceci est dû à une moindre biohydrogénation ruminale, du fait d'un rumen plus petit relativement aux besoins, d'un temps de séjour des aliments plus court dans le rumen (Nudda *et al.*, 2014), ainsi qu'à un comportement plus sélectif au pâturage (Manso *et al.*, 2016). La viande ovine est aussi caractérisée par une

teneur plus forte en AG à chaîne ramifiée (AGCR) dont les effets bénéfiques pour la santé ont été récemment montrés sur des modèles animaux (Ran-Ressler *et al.*, 2014). A signaler cependant i) qu'il y a encore peu de données évaluant le mode d'action des AGCR et leurs effets santé pour faire des recommandations en termes de consommation (Chikwanha *et al.*, 2018) et ii) que les AGCR sont associées à la flaveur 'mouton' (Watkins *et al.*, 2010) laquelle peut être un frein à la consommation lorsqu'elle est trop prononcée (Watkins *et al.*, 2014; Watkins *et al.*, 2010). D'un point de vue santé, certains AGS (notamment l'acide palmitique, C16:0) et monoinsaturés *trans* sont considérés comme associés à des risques accrus de maladies cardio-vasculaires (MCV) (Chikwanha *et al.*, 2018), bien que l'implication des AG monoinsaturés *trans* d'origine naturelle dans les MCV soit débattue (Ferlay *et al.*, 2017). A l'inverse, les AGPI n-3, les AGCR et certains AGPI intermédiaires de la biohydrogénation montrent de nombreux effets bénéfiques potentiels pour la santé de l'homme. En particulier, l'acide vaccénique, l'acide ruménique et les AGCR pourraient avoir des effets bénéfiques de protection contre les cancers et l'inflammation (Chikwanha *et al.*, 2018). Ces effets ont été démontrés chez le modèle animal, mais doivent encore être mis en évidence chez l'homme.

Les facteurs de variation de la composition en AG de la viande d'agneau sont la **race** de l'animal (Willems *et al.*, 2014), **l'état d'engraissement**, le type de **muscle** et sa **teneur en lipides (Berthelot et Gruffat, 2018)**, mais surtout **l'alimentation** (voir les synthèses de Chikwanha *et al*. (2018) ; Berthelot et Domange (2018) et Berthelot et Gruffat (2018)). Lorsque l'état d'engraissement diminue, la teneur en triglycérides (lipides de stockage) diminue, alors que la teneur en phospholipides (lipides membranaires) reste relativement stable ; compte tenu des différences de composition en AG des deux fractions, les animaux maigres présentent ainsi des proportions d'AGPI plus élevées, notamment en AGPI n-6 (Berthelot et Domange, 2018). Compte tenu de l'importance de l'alimentation pour moduler la composition en AG de la viande, ce sont surtout les stratégies alimentaires qui ont été testées dans la littérature pour potentiellement enrichir la viande ovine en AG d'intérêt pour l'homme.

Les agneaux de lait sont considérés comme des monogastriques sur le plan fonctionnel digestif : le lait ingéré passe directement dans la caillette grâce au réflexe de fermeture de la gouttière œsophagienne. Ainsi, le profil en AG de leurs dépôts adipeux reflète celui du lait, même si l'on ne retrouve pas ou peu les AG à chaîne courte du lait (C6:0 à C10:0) (Berthelot et Gruffat, 2018). Chez les agneaux nourris avec du lait maternel ou artificiel, les différences de composition en AG de la viande reflètent celle du lait consommé (Lanza *et al.*, 2006). L'enrichissement du lait de la mère via une alimentation enrichie en C18:3n-3 (pâturage ou graines oléo-protéagineuses) peut constituer une voie d'amélioration de la teneur en AGPI n-3 (Delmotte *et al.*, 2007). L'utilisation de graines de lin extrudées dans l'alimentation des brebis a ainsi permis d'améliorer la valeur nutritionnelle de la viande de leurs agneaux, avec une augmentation des teneurs en C18:3n-3, C20:5n-3 et C22:5n-3, mais pas celle du C22:6 n-3 ((Nudda *et al.*, 2015), Tableau 2.3.5). Un apport de graines de lin extrudées dans l'alimentation des mères pendant la fin de la gestation semble plus efficace que pendant la lactation pour augmenter les proportions d'AGPI n-3 dans les muscles de leurs agneaux (Nudda *et al.*, 2015), mais ceci se fait au détriment de la vitesse de croissance et du poids de la carcasse. On observe également un transfert des C18:1 t11 et C18:2 c9t11 du lait aux tissus, ce qui participe à l'amélioration de la qualité nutritionnelle de la viande (Nudda *et al.*, 2015).

Tableau 2.3.4. Profil en acides gras du tissu adipeux intramusculaire et sous-cutané chez les ovins et les bovins (% des acides gras) (Chikwanha *et al.*, 2018)

Fatty acid	Lamb		Beef	
	Muscle	Adipose[f]	Muscle	Adipose
22:6*n* − 3	0.15 ± 0.05	0.046 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.02[d]
22:5*n* − 3	0.52 ± 0.14	0.14 ± 0.01	0.45 ± 0.14	0.04 ± 0.01[d]
20:5*n* − 3	0.45 ± 0.13	0.036 ± 0.03	0.28 ± 0.11	0.02[d]
18:3*n* − 3	1.37 ± 0.48	0.695 ± 0.07	0.70 ± 0.18	0.21 ± 0.01[d]
Σ *n* − 3 PUFA	2.49 ± 0.99	0.92 ± 0.08	1.48 ± 0.02	0.29
*c*9,*t*11,*c*15-18:3	0.37 ± 0.06[b]	0.11 ± 0.01	0.049 ± 0.02[e]	0.11[g]
20:4*n* − 6	0.64 ± 0.23	0.1 ± 0.01	0.63 ± 0.21	0.06 ± 0.01[d]
18:2*n* − 6	2.70 ± 0.86	1.85 ± 0.13	2.42 ± 0.63	1.55 ± 0.02[d]
Σ *n* − 6 PUFA	3.34 ± 1.28	1.95 ± 0.14	3.05 ± 0.06	1.61 ± 0.05
*c*9,*t*11-18:2	1.03 ± 0.46[a]	0.65 ± 0.20	0.36 ± 0.02	0.36 ± 0.04[d]
Σ CLA	10.3 ± 5.2[c]	1.44 ± 0.14	4.9 ± 1.8[c]	0.57 ± 0.04[d]
*t*11-18:1	1.05 ± 0.17[b]	2.39 ± 0.3	0.73 ± 0.03[d]	0.73 ± 0.03[d]
Σ *trans* 18	4.67 ± 1.67	6.18 ± 2.38	2.75 ± 1.28	3.31 ± 1.63
Σ *trans* MUFA	6.2 ± 1.79[a]	4.81 ± 0.39	3.8 ± 0.23[d]	3.79 ± 0.23[d]
*c*9-18:1	32.5 ± 3.25	31.7 ± 1.13	36.1 ± 2.87	39.2 ± 2.33[d]
*c*9-16:1	2.20 ± 0.26	2.12 ± 0.09	4.54 ± 0.81	4.49 ± 0.62[d]
Σ *cis* MUFA	32.5 ± 4.83[a]	35.0 ± 1.17	49.9 ± 1.7[d]	49.9 ± 1.84[d]
Σ BCFA	1.9 ± 0.4[a]	3.52 ± 0.11	1.79 ± 0.05[d]	1.79 ± 0.05[d]
18:0	18.1 ± 2.80	14.5 ± 1.01	13.4 ± 1.84	11.5 ± 0.64[d]
16:0	22.2 ± 1.56	24.3 ± 0.66	25.0 ± 1.77	24.4 ± 1.98[d]
14:0	3.30 ± 1.07	8.51 ± 0.49	2.66 ± 0.54	3.10 ± 0.57[d]
12:0	0.31 ± 0.18	0.11 ± 0.11	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.02[d]
Σ SFA	48.3 ± 2.09[a]	42.9 ± 1.04	43 ± 1.70[d]	43 ± 1.7[d]
Σ Fat (g/100 g of muscle)	4.9	70.57	3.8	69.9

Adapted from Enser et al. (1996), unless stated otherwise; [a]- (Aurousseau, Bauchart, Calichon, Micol, & Priolo, 2004); [b]- (Andrés et al., 2014); [c]- (Schmid, Collomb, Sieber, & Bee, 2006); [d]- (Aldai, Dugan, Rolland, & Kramer, 2009); [e]- (Vahmani et al., 2015); [f]- (Bravo-Lamas et al., 2016); [g]- (Mapiye et al., 2014).

Chez les agneaux sevrés, en raison des faibles teneurs en lipides des régimes et de la biohydrogénation ruminale, la composition en AG du régime influence moins la composition en AG des muscles et des tissus adipeux que chez les monogastriques. Cependant, lorsque la quantité de C18:3 n-3 ingérée augmente, celle qui est déposée dans le muscle augmente aussi ((Berthelot et Gruffat, 2018), Figure 2.3.1.). L'utilisation d'aliments riches en AGPI n-3 permet ainsi d'augmenter fortement la teneur de la viande en AGPI n-3, jusqu'à passer de 1% des AG totaux à 3,5% (Figure 2.3.1.). Cependant, la consommation de 100 g d'une telle viande ne permet de couvrir que jusqu'à 5% des besoins en ALA.

Tableau 2.3.5. Composition en acides gras de muscles du gigot d'agneaux de lait abattus à 9-10 kg de poids vif selon le régime alimentaire de la brebis (concentré classique riche en C18:2 n-6 ou 15% de graines de lin extrudées riches en C18:3 n-3) (adapté de Nudda *et al.* (2015))

	Concentré		**Graine de lin**		**Effet**	
	Lait	**Muscle**	**Lait**	**Muscle**	**Lait**	**Muscle**
TB (%)	5,6	-	4,1	-	P < 0,05	-
Lipides IM (%)	-	1,6	-	1,6	-	NS
Composition en AG (% des AG totaux)						
C4 :0-C12 :0	13,6	-	10,8	-	P < 0,05	-
C14:0	7,0	2,7	6,5	2,4	NS	NS
C16:0	27,4	18,9	20,7	15,8	P < 0,01	NS
C18:0	14,3	13,4	14,7	13,6	NS	NS
C18:1 c9	22,8	29,3	24,5	28,3	NS	NS
C18:1 t11	1,4	0,9	3,6	2,8	P < 0,01	P < 0,01
C18:1 *trans*	2,4	1,5	5,7	4,3	P < 0,01	P < 0,01
C18:2 n-6	2,7	11,9	3,8	12,6	NS	NS
C18:2 c9t11	0,7	0,7	1,5	1,5	P < 0,01	P < 0,05

AGPI n-6	3,9	20,5	5,3	19,7	NS	NS
C18:3 n-3	0,5	0,8	1,2	1,8	P < 0,01	P < 0,01
C20:5 n-3	0,05	0,6	0,08	0,9	P < 0,01	P < 0,05
C22:6 n-3	0,04	0,9	0,05	0,8	NS	NS
AGPI n-3	0,7	3,9	1,5	5,1	P < 0,01	P < 0,01
n-6/n-3	6,3	5,3	3,5	3,9	P < 0,01	P < 0,01

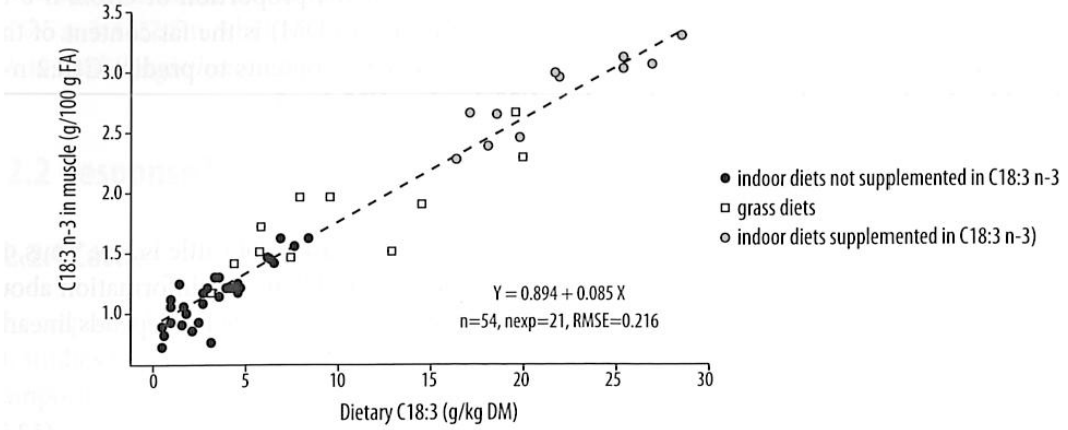


Figure 2.3.1. Relation entre la quantité de C18:3 n-3 dans le régime et la proportion de C18:3 n-3 dans le muscle *longissimus* d'agneaux (d'après Berthelot et Gruffat (2018)).

La synthèse de Berthelot et Domange (Berthelot et Domange, 2018) a regroupé 25 études ayant évalué l'effet du type de régime alimentaire sur la composition en AG des lipides de la viande; elle a classé les différents traitements en 5 groupes : pâturage seul, pâturage associé au lait maternel, pâturage complémenté en concentré ou régime classique d'agneaux de bergerie avec une ration à base de concentrés et de fourrage sec (C + F, 79% de concentrés dans la ration en moyenne) (Tableau 2.3.6.).

Tableau 2.3.6. Effet du système d'alimentation des agneaux (pâturage seul, pâturage associé au lait maternel, pâturage supplémenté en concentré ou régime classique d'agneaux de bergerie) sur la composition en AG des muscles *longissimus* d'agneaux

Système de production	**Pâturage**			**Bergerie**	**ETR**	**Effet**
	+ Lait maternel	**+ Concentrés**	**Seul**	**Fourrage sec + concentrés**		
	g/100 g muscle frais					
Teneur en AG du muscle *Longissimus*	1,8	2,8	2,3	2,1	1,1	NS
Composition en AG (% des AG totaux)						
AGS	44,8 [ab]	48,2 [a]	44,4 [b]	45,3 [ab]	4,3	P < 0,05
C16:0	22,0 [ab]	23,4 [a]	20,1 [b]	24,3 [a]	2,8	P < 0,001
C18:0	15,2 [ab]	18,8 [a]	18,4 [a]	15,4 [b]	3,2	P < 0,01
AGMI	36,5	38,2	37,2	40,8	4,8	NS
C18:1 c9	32,1 [ab]	32,2 [ab]	28,8 [b]	34,7 [a]	3,7	P < 0,01
AGPI n-6	9,0	9,6	10,6	10,4	4,6	NS
C18:2 n-6	5,6	7,3	6,5	7,0	2,2	NS
C20:4 n-6	2,5	3,6	3,9	2,3	2,1	NS
AGPI n-3	4,8 [a]	2,4 [b]	5,0 [a]	1,7 [b]	1,4	P < 0,001

C18:3 n-3	2,4 [a]	1,5 [b]	2,3 [a]	0,8 [c]	0,7	P < 0,001
C20:5 n-3	1,4 [a]	0,5 [b]	1,3 [a]	0,4 [b]	0,5	P < 0,001
C22:5 n-3	1,4	1,6	1,4	0,7	0,6	P < 0,10
C22:6 n-3	0,6 [ab]	0,3 [ab]	0,7 [a]	0,2 [b]	0,3	P < 0,001
ΣCLA	1,7 [a]	0,8 [b]	1,2 [ab]	0,6 [b]	0,4	P < 0,001
n-6/n-3	1,8 [b]	5,6 [ab]	2,1 [c]	7,1 [a]	3,6	P < 0,001

[a,b] : test de Bonferroni à 5%.
ETR : écart-type résiduel.

Pour les agneaux allaités, peu de différences sont observées entre agneaux L + C et agneaux L + P, mais les auteurs soulignent le peu d'études, notamment pour le régime L + C.

Pour les agneaux sevrés, les régimes à base de fourrages favorisent les dépôts d'AGPI n-3 dans le muscle (C18:3 n-3, C20:5 n-3, C22:5 n-3, et également C22:6 n-3, mais de manière plus variable selon les études pour ce dernier AG). La proportion d'AGPI n-3 dans le muscle est principalement modulée par la proportion du C18:3 n-3 dans le régime (Berthelot et Gruffat, 2018). En général, la viande des agneaux engraissés au pâturage est moins grasse et présente un profil en AG plus favorable que la viande d'agneaux engraissés en bergerie : teneurs plus faibles en C16:0 et en AG monoinsaturés et plus élevée en AGPI n-3, en CLA et en C18:0, ainsi qu'un rapport AGPI n-6/AGPI n-3 plus faible (Tableau 12). La teneur en AGPI n-3 est presque triplée et le rapport AGPI n-6/AGPI n-3 est divisé par plus de 3 (2,1 vs. 7,1) lors d'un engraissement à l'herbe plutôt qu'avec des concentrés. L'herbe est en effet riche en ALA (1-3% d'AG dont 50-75% d'ALA, Ferlay *et al*. (2017)), AG essentiel et précurseur des AG n-3 à longue chaîne (EPA, DPA, DHA). La viande d'agneau d'herbe est ainsi plus riche en ALA, et les proportions des AGPI n-3 à plus longue chaîne peuvent également être augmentées, notamment celles d'EPA et de DHA, indiquant une augmentation de la synthèse en AGPI n-3 à longue chaîne avec les régimes à base d'herbe (Berthelot et Gruffat, 2018). En comparaison, les céréales sont riches en acide linoléique, précurseur de la famille des AG n-6, qui sont plutôt considérés comme indésirables, car contrecarrant l'effet positif des AGPI n-3 lorsque le rapport n-6 AGPI/n-3 AGPI est élevé (McAfee *et al.*, 2011).

L'intérêt de la pâture dépend des conditions de pâturage. En effet, la teneur de l'herbe en ALA varie avec le stade de maturité de l'herbe et la gestion du pâturage. La teneur de l'herbe en ALA est plus élevée pour les stades jeunes de développement (herbe de printemps et de repousse). De plus, un niveau élevé d'herbe offerte améliore la valeur santé des AG de la viande d'agneau à travers une augmentation des proportions en AGPI n-3 et en CLA au détriment des AGS par rapport à un niveau faible d'herbe offerte (Bauchart *et al.*, 2012). Le type de fourrage ou la nature de la prairie sont importants. Willems *et al*. (2014) ont montré que des agneaux qui pâturent des prairies riches en diversité végétale et qui contiennent des plantes riches en composés phénoliques (dont les tannins) présentent une viande plus riche en AGPI (+18 à 42%), en ALA (+20 à 87%) et LA (+26 à 58%) que celle d'agneaux qui pâturent des prairies de plaine, la teneur de ces AG dans la viande étant linéairement reliée à la teneur en composés phénoliques de la prairie. Cet effet est dû à l'inhibition partielle de la biohydrogénation par les composés phénoliques, qui explique aussi la plus faible teneur en CLA de la viande. Le pâturage de prairies riches en légumineuses conduit à une viande plus riche en ALA et LA que le pâturage de graminées, probablement en lien avec une vitesse de transit plus rapide et donc une biohydrogénation moins complète du fourrage dans le rumen (Lourenco *et al.*, 2007). Au-delà du type de fourrage, la présence de métabolites secondaires dans les plantes (polyphénol oxydase, flavonoïdes, tannins, huiles essentielles et saponines) améliore le profil en AG de la viande ovine à travers un dépôt plus important d'AGPI (Campidonico *et al.*, 2016; Girard *et al.*, 2016a). Ces composés peuvent être présents en concentration élevée dans les légumineuses prairiales et arbustives, et dans les sous-produits (raisin, grenade, par exemple) (Chikwanha *et al.*, 2018). Campidonico *et al*. (2016) ont montré que les régimes riches en ensilages de trèfle violet (riche en polyphénol oxydase) et de sainfoin (riche en tannins condensés) avaient des effets positifs et additifs sur la teneur en AGPI n-3 de la viande d'agneau. Globalement, les rations riches en composés phénoliques augmentent la teneur de la viande en AGPI n-3 et AGPI n-6 et réduisent sa teneur en AGS (Girard *et al.*, 2016a ; Lourenco *et al.*, 2007 ; Vasta *et al.*, 2009). La forme de présentation du fourrage est également importante, les fourrages verts et ensilés conduisant à un meilleur profil en AG que les fourrages secs (Lourenco *et al.*, 2007).

Par ailleurs, la complémentation au pâturage avec des concentrés diminue certains avantages de la viande produite à l'herbe : teneur plus élevée en AG monoinsaturés et moins élevée en AGPI n-3, proches de celles d'agneaux de bergerie ((Berthelot et Gruffat, 2018), Tableau 12). L'effet de la complémentation au pâturage varie avec la quantité de concentré apportée, un apport restreint modifiant peu la composition en AG de la viande (Montossi *et al.*, 2013).

Malgré les bénéfices du pâturage pour les qualités nutritionnelles de la viande, il n'est pas toujours possible de faire pâturer les agneaux (comme c'est le cas, par exemple, des agneaux issus des troupeaux laitiers du bassin de Roquefort où la mise en traite exclusive impose un sevrage précoce). De plus, les agneaux sont parfois finis en bergerie après une phase de pâturage pour augmenter leur vitesse de croissance et leur taux de LIM (De Brito *et al.*, 2016), dont on a vu l'importance pour la qualité en bouche (Watkins *et al.*, 2013). Des rations richeen céréales (> 75% de la ration) sont alors utilisées. Dans le cas d'une finition en bergerie après pâturage, plus celle-ci est longue, plus la composition en AG du muscle se rapproche de celle d'agneaux de bergerie et perd ainsi les bénéfices nutritionnels apportés par le pâturage (Aurousseau *et al.*, 2007a ; Aurousseau *et al.*, 2007b). La viande d'agneaux élevés au pâturage et finis en bergerie pendant une courte période (14 jours) présente ainsi un profil en AG plus proche de celle d'agneaux d'herbe que la viande d'agneaux finis en bergerie pendant 37 jours (Scerra *et al.*, 2011).

Les agneaux nourris avec des rations riches en concentrés amylacés (agneaux de bergerie) présentent des proportions élevées de C18:1 et notamment de C18:1 t10 dans leurs tissus adipeux et musculaires (Bas *et al.*, 2007; Daniel *et al.*, 2004). La forte présence de cet isomère (1 à 7% des AG totaux selon les tissus), peu recommandé d'un point de vue nutritionnel, se fait au détriment du C18:1 t11 qui est plus favorable et à l'origine de la synthèse du CLA c9t11 au niveau tissulaire (Berthelot et Domange, 2018). Une voie possible d'amélioration du profil en AG de la viande des agneaux de bergerie consiste à introduire dans le concentré des matières premières riches en AGPI n-3 (oléoprotéagineux riches en C18:3 n-3 apportés sous forme de graines, de tourteaux partiellement déshuilés ou d'huile ; huiles de poissons ou d'algues qui ont l'avantage d'apporter des AGPI n-3 à longue chaîne et notamment du C22:6 n-3) (Berthelot et Domange, 2018 ; Chikwanha *et al.*, 2018). Les graines de lin notamment sont très riches en ALA (environ 57% des AG totaux). L'ajout de graines de lin extrudées (Bas *et al.*, 2007) ou d'huile de lin (Jeronimo *et al.*, 2009) permet d'augmenter les teneurs en C18:3 n-3, C20:5 n-3, C22:5 n-3 et C22:6 n-3 et d'améliorer le rapport n-6/n-3 dans la viande d'agneau. L'ajout d'huile de poisson dans la ration des animaux terrestres est pour l'instant interdite dans les pays occidentaux ; quant aux algues, leur coût rend leur utilisation peu envisageable pour l'instant (Gruffat, 2018). Comme une partie des AGPI ingérés sont dégradés au niveau du rumen, des technologies sont en cours d'étude pour protéger les lipides alimentaires des dégradations ruminales et permettre ainsi d'augmenter les teneurs en AGPI de la viande (par exemple traitements chimiques ou thermiques des graines/huiles, encapsulation des huiles) (McNiven *et al.*, 2011) ; (Alvarado-Gilis *et al.*, 2015; Scollan *et al.*, 2014). Les études aboutissent à des résultats variables, voire non concluants (Kronberg *et al.*, 2012 ; Ladeira *et al.*, 2014 ; Santana *et al.*, 2014).

Tableau 2.3.7. Effet de la nature du fourrage sur la proportion d'acides gras d'intérêt nutritionnel pour l'homme (d'après Chikwanha *et al.* (2018)).

Diet	Plant secondary metabolite	Fatty acid content (% of total FAME)						
		22:6*n* − 3	22:5*n* − 3	20:5*n* − 3	18:3*n* − 3	*n* − 3 PUFA	*c*9,*t*11-18:2	*t*11-18:1
Silage[a] (alfalfa)	None	0.3	0.9	0.9	2.9	5.0	NR	NR
Silage (red clover)	Polyphenol oxidase	0.2	0.7	0.6	3.0	4.5	NR	NR
Silage (birdsfoot trefoil)	Low condensed tannins	0.4	1.5	1.4	2.5	5.6	NR	NR
Silage (saifoin)	High condensed tannins	0.5	2.0	2.0	4.6	9.1	NR	NR
Silage[b] (100% timothy grass-T)	None	0.04	0.19	0.10	0.71	1.36	0.51	1.30
Silage (50% T + 50% Saifoin)	Condensed tannins	0.05	0.23	0.15	1.02	1.63	0.41	1.20
Silage (50% + 50% Red clover)	Polyphenol oxidase	0.06	0.27	0.19	1.20	1.90	0.39	0.94
Silage (50% T + 25% Saifoin + 25% Red clover)	Condensed tannins + polyphenol oxidase	0.08	0.26	0.17	1.14	1.87	0.43	0.99
Silage (50% Saifoin + 50% Red clover)	Condensed tannins + polyphenol oxidase	0.08	0.27	0.21	1.74	2.48	0.34	0.77
Calafatal[c] pastures (unweaned)		0.46	NR	1.36	2.50	4.32	2.08	NR
Naturalized pastures (unweaned)		0.36	NR	1.30	2.09	3.75	2.15	NR
Naturalized[d] pastures (grass) (unweaned)		0.36	1.39	NR	2.10	4.60	2.10	4.94
Rangeland pastures (grass and shrubs) (unweaned)		0.46	1.51	NR	2.69	6.35	2.07	5.33
Lucerne grass[e]		0.25	0.80	0.93	2.72	NR	1.09	3.10
Red clover grass	Polyphenol oxidase	0.27	0.90	1.03	2.86	NR	1.33	3.71
Perennial ryegrass		0.24	0.82	0.90	2.07	NR	1.23	3.65
Rye[f] grass (*Lolium perenne*) - 8 h grazing/whole day		1.36	NR	1.66	2.77	NR	1.85	1.55
Rye grass (*Lolium perenne*) - 4 h grazing/morning		1.18	NR	1.35	2.32	NR	1.45	1.06
Rye grass (*Lolium perenne*) - 4-h grazing/ afternoon		1.55	NR	2.03	2.80	NR	2.39	1.60

NR - not reported.
[a] Girard et al. (2016).
[b] Campidonico et al. (2016).
[c] Gallardo, Dannenberger, Rivero, Pulido, and Nuernberg (2014).
[d] Ramírez-Retamal, Morales, Martínez, and de la Barra (2014).
[e] Fraser et al. (2004).
[f] Vasta et al. (2012).

Il y a peu d'études sur la viande ovine biologique. Angood *et al.* (2008) ont comparé la composition en AG du muscle *longissimus* d'agneaux biologiques vs. conventionnels achetés dans le commerce : la viande d'agneaux biologiques présentait des teneurs plus élevées en ALA et AGPI n-3 et un ratio AGPI n-6/AGPI n-3 plus faible, mais des teneurs en C16:0

plus élevées. Cependant, les conditions de production des animaux étaient inconnues. Chez les agneaux d'herbe, deux études montrent une amélioration de la qualité nutritionnelle des AG déposés dans la viande des agneaux biologiques par rapport aux agneaux conventionnels : teneurs plus élevées en AGPI n-3 et ratio AGPI n-6/AGPI n-3 plus faible (Kocak *et al.*, 2016), rapport AGPI/AGS et % de CLA plus élevés, ces effets étant renforcés lorsque la disponibilité en herbe est élevée (Bauchart *et al.*, 2012).

A signaler que des méthodes sont actuellement développées pour prédire la teneur en lipides et la composition en AG des lipides de la viande à partir de méthodes spectrales (Guy *et al.*, 2011). Par ailleurs, Chikwanha *et al*. (2018) relèvent que l'on manque encore de données scientifiques faisant le lien entre le profil en AG de la viande, sa consommation et les maladies chroniques chez l'homme. Enfin, les indicateurs utilisés ne sont pas stabilisés ; ainsi, par exemple les indices d'athérogénicité et de thrombogénicité sont calculés différemment dans les études de Ulbricht et Southgate (1991), largement citée dans la littérature) et Campo *et al*. (2013).

2.3.2.4.Propriétés technologiques et d'usage

Après exposition de la viande fraîche à l'air, l'atome de fer de la molécule de myoglobine s'oxyde (formation de metmyoglobine), ce qui provoque un brunissement indésirable de la viande. Se développent aussi les phénomènes de peroxydation lipidique, liés à des réactions entre les espèces réactives à l'oxygène (radicaux libres) et les doubles liaisons présentes dans les AG, et qui conduisent à la production de produits peroxydés. Lorsque son intensité est modérée, la peroxydation a un effet bénéfique sur la flaveur de la viande, mais lorsque son intensité augmente, elle devient une des causes majeures de la détérioration de la qualité des produits carnés crus ou cuits pendant leur stockage sous forme réfrigérée ou congelée (Gruffat, 2018). Apparaissent des odeurs/flaveurs désagréables (rance). Les produits de l'oxydation des lipides peuvent également affecter la valeur santé de la viande à travers la production de composés toxiques potentiellement nuisibles à la santé des consommateurs (Durand *et al.*, 2010), leur rôle dans le développement du cancer colorectal ayant été démontré (Surya *et al.*, 2016). Les facteurs qui limitent la durée de vie de la viande fraîche sont donc l'évolution de sa couleur, la croissance microbienne et l'oxydation lipidique.

La sensibilité des viandes à l'oxydation est liée à **l'équilibre entre les facteurs pro-oxydants** et **antioxydants**. L'alimentation de l'animal joue à travers la modulation des teneurs en AGPI (sensibles à l'oxydation), en fer (pro-oxydant) et en antioxydants. La viande ovine a ainsi une durée de conservation plus courte que la viande bovine en raison d'une teneur en AGPI plus élevée (Kasapidou *et al.*, 2012). La phase d'élevage et de pré-abattage joue également sur les phénomènes de peroxydation à travers l'état de stress émotionnel des animaux. Terlouw *et al*. (2015) ont ainsi montré que des manipulations inadaptées des animaux augmentent le niveau de rancidité des viandes. Par ailleurs, les viandes à pH élevé du fait des conditions d'élevage et de pré-abattage, ont une plus forte capacité de rétention en eau et une stabilité microbienne plus faible (Sheath *et al.*, 2001).

Les **modalités** de **conditionnement** et de **stockage** sont importantes en raison des nombreux facteurs pro-oxydants potentiels (lumière, découpe, contact avec l'oxygène) (Gruffat, 2018).

La durée de vie de la **viande fraîche** dépend de son **mode de conditionnement**. En conditions aérobies sous film, les deux premiers facteurs précités (évolution de la couleur, croissance microbienne) sont déterminants mais pas le 3ème (qui n'a pas le temps d'intervenir). Le conditionnement sous **atmosphère modifiée riche en oxygène** permet de maintenir une couleur rouge vif et d'inhiber le développement des flores pathogènes anaérobies, mais augmente les phénomènes d'oxydation lipidique qui constituent la 1ère cause de perte de qualité. Le conditionnement sous **atmosphère modifiée contenant 10 à 20% de CO_2** inhibe la croissance de flores aérobies d'altération, mais, au niveau de 30%, peut augmenter les phénomènes de décoloration (Lauzurica *et al.*, 2005). C'est la **conservation sous vide** qui permet la durée de vie la plus longue (Berthelot et Domange, 2018).

La présence d'antioxydants, présents naturellement dans les aliments (herbe fraîche par exemple) ou ajoutés (acétate de DL-alpha-tocophérol, par exemple) permet de limiter les phénomènes d'oxydation et donc de préserver plus longtemps la qualité de la viande, et particulièrement de celles qui ont été enrichies en AGPI n-3. La viande d'agneaux qui ont **pâturé** présente une meilleure stabilité oxydative que celle d'agneaux alimentés avec une ration à base de concentrés, y compris dans des conditions de conservation pro-oxydatives (hachage, emballage en atmosphère riche en oxygène et cuisson) (Luciano *et al.*, 2009; Sante-Lhoutellier *et al.*, 2008) suffisant pour prévenir la lipoperoxydation. La **nature du fourrage** est importante. Ainsi, la stabilité de la couleur de la viande est plus élevée lorsque les agneaux sont finis sur du Ray-grass ou du plantain comparativement à du trèfle, de la luzerne ou de la chicorée (Kim *et al.*, 2013). Certains tannins présents dans le fourrage ou ajoutés dans l'aliment peuvent également améliorer la stabilité oxydative de la viande (Luciano *et al.*, 2009; Vasta *et al.*, 2008).

La supplémentation des rations en graines oléagineuses riches en AGPI (graines de lin, par exemple) ne confère pas un statut antioxydant suffisant pour prévenir les phénomènes de lipoperoxydation. C'est pourquoi des études s'intéressent à l'accompagnement de ces supplémentations avec des apports d'antioxydants alimentaires (vitamine E, extraits végétaux riches en polyphénols, apportés seuls ou simultanément) (Gruffat, 2018). **L'apport de vitamine E** (acétate d'alpha-tocophérol) diminue le développement d'odeurs et de flaveurs désagréables ('rance' et 'poisson') et améliore l'appréciation globale (Muino *et al.*, 2014). Les antioxydants à base **d'extraits de plantes** (huile essentielle de romarin, extraits de vin rouge ou d'algues *Ascophyllum nodosum*) ont été testés avec plus ou moins de succès (Muino *et al.*, 2014 ; Ortuno *et al.*, 2016).

Certains conditionnements impactent la qualité en bouche. Ainsi, il a été montré qu'un conditionnement sous atmosphère modifiée riche en oxygène (pour permettre une couleur rouge vif) réduisait le score de qualité en bouche de la viande d'agneau (Frank *et al.*, 2017).

2.3.2.5.Propriétés d'image

La qualité du produit dépend aussi de dimensions extrinsèques appelées ici caractéristiques d'image (respect du bien-être animal et de l'environnement et plus largement éthique autour de la production, origine du produit, valeurs sociales telles que la contribution au développement territorial, valeurs religieuses) et de préférences subjectives exprimées par certains segments de consommateurs et de citoyens (Montossi *et al.*, 2013; Zervas et Tsiplakou, 2011). Il faut signaler que la viande d'agneau porte une forte valeur symbolique, culturelle et cultuelle (Prache et Bauchart, 2015). Le consumérisme éthique (commerce équitable, produits biologiques) et de proximité (AMAP, marchés) se développe (Montossi *et al.*, 2013). Les croyances, attentes et perceptions des consommateurs sont essentielles car elles influencent l'acte d'achat ; elles sont cependant évolutives et variables entre segments de consommateurs (Font-i-Furnols *et al.*, 2011) et on constate parfois des différences entre le déclaratif et le comportement d'achat (Montossi *et al.*, 2013).

Une étude sur des consommateurs espagnols, français et britanniques montrent qu'ils expriment une préférence pour les agneaux produits à l'herbe (vs. en bergerie) ; ils considèrent que leur viande est plus saine, plus naturelle et plus savoureuse et qu'au-delà, le système d'élevage est plus respectueux de l'environnement et du bien-être animal (Font-i-Furnols *et al.*, 2011). Une autre étude sur des consommateurs italiens et norvégiens montre que ceux-ci préfèrent la viande d'agneau issue de prairies de montagne (vs. plaine), considérant que les systèmes d'élevage correspondants valorisent des ressources animales et végétales particulières qui donnent une spécificité organoleptique à la viande (Hersleth *et al.*, 2012).

L'origine du produit est également un élément important, les produits locaux ou nationaux étant préférés, car considérés comme plus frais et meilleurs et contribuant au développement territorial ou à l'économie nationale (Bernues *et al.*, 2003b) ; (Bernues *et al.*, 2003a) ; (Chambers *et al.*, 2007) ; (Pauselli *et al.*, 2009) ; (Font-i-Furnols *et al.*, 2011) ; (Hersleth *et al.*, 2012) ; (Montossi *et al.*, 2013). Ces préférences 'déclarées' ne sont pas toujours confirmées lorsque les consommateurs consomment la viande 'en aveugle' (c'est-à-dire sans informations sur les conditions de production) (Font-i-Furnols *et al.*, 2011 ; Sepulveda *et al.*, 2011). Cependant, plusieurs études montrent que des éléments de communication et d'information relatifs au mode de production (pratiques d'alimentation, bien-être animal, environnement) ou à leur origine influencent l'acceptabilité de la viande pour certains segments de consommateurs (Bernues *et al.*, 2003a ; 2003b ; D'Alessandro *et al.*, 2012; Napolitano *et al.*, 2007 ; Piasentier *et al.*, 2007) et peuvent être utilisés comme outils de différenciation.

Les signes de qualité sont un moyen de communiquer sur les modes de production et/ou l'origine, de différencier les produits, et ils sont des repères de qualité pour les consommateurs. Les Signes d'Identification de la Qualité et de l'Origine (SIQO) s'accompagnent de certification et de contrôles qui contribuent à les valider (du Plessis et du Rand, 2012) et à construire et conforter la confiance entre le vendeur et l'acheteur (Casabianca, 2018). Ils concernent 9,4% de la viande ovine produite en France (vs. 2,6% en viande bovine, 2% en viande porcine et 3,5% en produits de charcuterie). Au-delà, l'UE est riche de 48 signes de qualité AOP ou IGP qui concernent tous les types d'agneaux (agneaux de lait, agneaux légers, agneaux lourds produits à l'herbe ou en bergerie, ovins adultes) (Erasmus *et al.*, 2017). Il faut signaler cependant qu'il peut y avoir une variabilité importante dans les conditions d'élevage des animaux pour un SIQO donné. Erasmus *et al*. (2017) donnent l'exemple d'une IGP pour laquelle les agneaux sont conduits au pâturage avec leur mère au printemps, alors qu'ils sont sevrés tôt et engraissés avec des concentrés en bâtiments en automne. Au-delà du fait que la qualité de la viande est alors différente entre les deux périodes de production, ces auteurs questionnent la réalité du lien à la zone géographique de la viande des agneaux produits en automne. Cette variabilité dans les conditions de production, probablement liée à une volonté d'approvisionnement régulière au cours de l'année, ne concerne pas tous les SIQO ou à un moindre degré, d'où l'importance d'une bonne connaissance des engagements pris dans les cahiers des charges.

A noter qu'il y a peu d'études abordant le système d'élevage dans son ensemble, échelle indispensable à l'estimation de l'empreinte environnementale du produit. Selon Benoit et Dakpo (2012) cités par Benoit et Méda (2017), les émissions

brutes de GES par kg de carcasse produit sont proches en élevage biologique et conventionnel, mais la prise en compte de la séquestration du carbone dans les prairies conduit à des émissions nettes de GES inférieures de 7% en AB en moyenne. Par ailleurs, la non utilisation de pesticides de synthèse en AB conduit à une préservation des ressources en eau et de la biodiversité et prévient les dommages potentiels à la santé humaine (Reganold et Wachter, 2016, cités par Benoit et Méda (2017). Enfin, la production de viande ovine biologique nécessite en moyenne 10% de surface supplémentaire par rapport à la production de viande conventionnelle (65 vs 59 m^2/kg PV, Baudry *et al*. (Baudry *et al.*, 2019) ; Pointereau (2019)).

2.3.2.6. Propriétés sanitaires

Dangers microbiologiques associés à la filière ovine

Comme pour les autres viandes, celles issues de la filière ovine sont concernées par de nombreux dangers microbiologiques (Efsa Panel on Biological Hazards, 2013 ; Hanlon *et al.*, 2018), plusieurs dangers bactériens (notamment *Escherichia coli* porteurs de shiga-toxines, *Salmonella*, *Campylobacter*) et par un parasite *Toxoplasma*. Parmi ces dangers, les *Escherichia coli* porteurs de shiga-toxines et Toxoplasma sont les dangers les plus significatifs pour la filière (Efsa Panel on Biological Hazards, 2013).

Impact des conditions d'élevage

Les ovins sont le réservoir de *E. coli* porteurs de shigatoxines (La Ragione *et al.*, 2009). Les facteurs de risque au niveau des élevages sont difficiles à identifier mais la présence de bovins dans la même ferme semble être un facteur de risque de présence de ce danger chez les ovins (Urdahl *et al.*, 2001) .

Pour Toxoplasma, les données françaises, sur la base des données de séroprévalence, montrent que la prévalence chez les agneaux est moins forte que chez les adultes (18% contre 87%) (Halos *et al.*, 2010). Aucune différence significative n'a été observée entre la viande importée et la viande française. En France, la séroprévalence chez les agneaux a montré un gradient croissant du nord-ouest au sud (Halos *et al.*, 2010).

Impact du procédé d'abattage et découpe

Le processus d'abattage des ovins comprend des opérations qui affectent la contamination microbienne provenant de la toison et du contenu viscéral (Hauge *et al.*, 2011). Les bonnes pratiques d'hygiène et l'application des principes HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point System) permettent la maitrise de la contamination des carcasses. L'enlèvement de la peau des pattes arrière et avant, le retrait final ou complet de la peau, l'éviscération, l'application de vapeur ou le lavage à l'eau chaude, le refroidissement, l'entreposage réfrigéré ou congelé sont autant des points critiques potentiels pour la contamination microbienne des carcasses ovines pendant l'abattage (Milios *et al.*, 2011). Les essais réalisés relatifs aux différentes pratiques d'éviscération (Rossvoll *et al.*, 2018) ou de dépouille (Ranucci *et al.*, 2014) n'ont pas montré de différences significatives sur les niveaux de contamination des flores indicatrices d'hygiène. Les conditions de transport des carcasses et des viandes ovines sont également des éléments de maîtrise important pour la qualité et la sécurité microbiologique (Efsa Panel on Biological Hazards, 2014).

Impact des pratiques des consommateurs

La consommation de viandes ovines peu cuites est un facteur de risque pour les cas sporadiques de toxoplasmose (Anses, 2018a). Concernant, les *E. coli* STEC comme pour les viandes bovines, le degré de cuisson des viandes ovines conditionne le niveau de risque des produits consommés.

2.3.3. Produits transformés

Les produits transformés à base de viande ovine (saucisses, burgers) peuvent permettre de i) diversifier « l'offre produit » en offrant des produits faciles à cuisiner, ii) de mieux valoriser la viande de moindre valeur commerciale, comme celle d'animaux âgés ou celle issue de pièces moins recherchées par les consommateurs (poitrine, collier), même si les burgers peuvent aussi être produits à partir de morceaux nobles tel que le gigot (Cozar et Vergara, 2018). Cette viande est souvent hachée, soit pour éliminer les problèmes de tendreté liés au type de muscle et à l'âge des animaux, soit pour la mélanger à d'autres morceaux plus nobles et à d'autres ingrédients. Le hachage n'élimine cependant pas les problèmes de **flaveur** liés à l'âge des animaux. Une étude s'est intéressée à **l'addition de différents types de sucres** (glucose, sucrose, xylose) pour réduire la flaveur et augmenter l'acceptabilité de saucisses à base de viande issue de quartiers avant d'agneaux d'herbe âgés de 8 mois (salaisons avec nitrites) (Young *et al.*, 2009), les produits dérivés de la réaction de Maillard pouvant en effet masquer la flaveur. **L'addition de xylose** a été la plus efficace. Elle a permis d'augmenter l'appréciation de l'arôme, de la flaveur et l'appréciation globale du produit ; elle a aussi permis de diminuer l'identification de l'espèce animale qui peut avoir une connotation négative chez certains consommateurs peu habitués à la viande ovine. Une flaveur de 'mouton' trop intense peut aussi être

rectifiée avec l'utilisation de plantes **aromatiques** et d'**épices**. Lu *et al*. (2010) cités par Watkins *et al*. (2013) ont ainsi utilisé de la viande bovine additionnée de concentrations élevées d'AGCR et de scatol (composés impliqués dans la flaveur spécifique de la viande ovine, il s'agissait donc ici de 'mimer' la viande ovine) pour fabriquer des saucisses. Celles-ci ont été produites avec nitrites et ajout ou non d'extraits de **romarin** et d'**ail**. Utilisées séparément, ni les nitrites ni les aromates n'ont permis d'atténuer la flaveur ovine, alors que leur utilisation combinée l'a fait presque complètement disparaitre. Les flaveurs intenses de 'mouton' pourraient ainsi être masquées par une **formulation ad hoc** permettant ainsi de créer une gamme de produits à l'attention de consommateurs peu habitués à la viande ovine (Watkins *et al.*, 2013).

La viande hachée a une **durée de conservation** limitée en lien avec la croissance microbienne et l'oxydation lipidique, amplifiées avec le hachage. Les sulfites sont couramment utilisés en Europe comme conservateurs des burgers d'agneau (et plus largement de la viande hachée et des saucisses), du fait de leurs propriétés antioxydantes et antimicrobiennes (Belles *et al.*, 2019). Cependant, les risques d'intolérances aux **sulfites** et au-delà les **préoccupations croissantes des consommateurs quant aux additifs alimentaires conduisent à rechercher des alternatives** pour les réduire ou les remplacer (Belles *et al.*, 2019). Des études scientifiques s'intéressent donc à certains composés naturels issus de plantes (en poudre ou extraits) et/ou à certaines huiles essentielles comme alternatives aux conservateurs synthétiques, car elles présentent des propriétés intéressantes pour la conservation de la viande. Belles *et al*. (2019) ont ainsi comparé les effets de l'addition d'extraits de **thé vert** et/ou d'huile essentielle de **carvacrol**, seuls ou en mélange (vs. l'addition de sulfites vs. aucun additif) sur la qualité microbiologique, la couleur et l'oxydation lipidique de burgers d'agneaux conservés pendant 8 jours en conditions proches de celles d'un supermarché (sous film plastique perméable à l'air à 4°C et sous lumière artificielle pendant 14 h/j). L'addition de sulfites a eu un fort effet antimicrobien et a préservé la viande du brunissement ; elle a aussi réduit l'oxydation des lipides par rapport au traitement sans additif, mais à un degré moindre que le thé vert et le carvacrol. Les deux additifs naturels ont très fortement limité l'oxydation des lipides, mais seul le carvacrol a eu un effet sur la stabilité de la couleur et la croissance microbienne, ce dernier étant dose-dépendant (croissance microbienne plus inhibée avec 1 000 ppm qu'avec 300 ppm). Les deux additifs naturels ont aussi limité le développement des odeurs et flaveurs rances liées à l'oxydation, le carvacrol conduisant aussi à une diminution de celles liées au développement microbien. Le carvacrol semble donc être une alternative aux sulfites intéressante, mais à signaler qu'il provoque des odeurs et flaveurs pastorales. Quant au thé vert, les auteurs soulignent qu'il doit être associé avec un antimicrobien. De même, Cozar et Vergara (2018) ont analysé les effets de **l'addition d'épices** (romarin, thym, sauge ou ail, en poudre vs. sel uniquement) et du **mode de conditionnement** (SV : sous vide vs. AA : 30% CO_2 + 70% O_2 vs. AB : 30% CO_2 + 69,3% O_2+ 0,7% CO) sur la qualité microbiologique, la couleur et l'oxydation lipidique de burgers de viande hachée de poitrine et de collier (1/3 en parts égales) et de gigot (2/3) pendant 13 jours. Ils ont montré i) qu'il y avait un effet synergique du mode de conditionnement et de l'ajout d'épices sur la couleur et la stabilité oxydative des burgers, ii) que l'ajout d'ail combiné au conditionnement AA conduisait aux moins bons résultats en termes de stabilité de la couleur et du niveau d'oxydation lipidique (rancissement), mais que l'utilisation des conditionnements SV et AB réduisait ces problèmes, iii) que l'addition de romarin, de thym ou de sauge minimisait les variations de couleur et d'oxydation lipidique, quel que soit le mode de conditionnement et iv) que la qualité microbiologique variait seulement avec la nature de l'épice ajouté, les burgers à l'ail présentant les développements microbiens les plus élevés quel que soit le mode de conditionnement. Il faut signaler cependant que dans ces études sur la conservation de la viande hachée, les **pratiques d'élevage ne sont pas mentionnées** (Cozar et Vergara, 2018) ou ne sont pas favorables à la présence d'antioxydants dans la viande ou à la présence de flaveurs pastorales (agneaux de bergerie, Belles *et al*. (2019)). Il serait ainsi utile de **croiser les pratiques d'élevage** (par exemple agneau produit à l'herbe vs. en bergerie) **et les pratiques de transformation** pour mettre en évidence les interactions potentielles et déterminer les pratiques de transformation les plus adaptées à la variabilité de la qualité viande liée aux conditions de production (teneur en antioxydants, nature des AG déposés, flaveur de la viande, etc.).

2.3.4. Impact des pratiques des consommateurs

La température de cuisson à cœur de la viande ovine est plus faible en France (65°C) que dans d'autres pays européens (72°C en Espagne, Allemagne et Royaume Uni) (Font-i-Furnols *et al.*, 2009). Une température à cœur inférieure augmente la tendreté, la jutosité et l'intensité des flaveurs anormales, mais diminue l'intensité de flaveur (Font-i-Furnols *et al.*, 2009 ; Schreurs et Kenyon, 2017a).

Les modalités de cuisson (durée et intensité du traitement thermique, humidité, ingrédients ajoutés, …) modulent les qualités sensorielles (flaveur et jutosité notamment) et nutritionnelles de la viande. Si certains composés responsables de la flaveur sont présents dans la viande fraîche (scatol, indole, par exemple), d'autres sont générés et libérés lors de réactions d'oxydation des lipides pendant la cuisson (Watkins *et al.*, 2013). La flaveur de la viande cuite dépend ainsi de la composition

initiale de la viande crue (teneur en lipides et profil en AG, teneur en antioxydants et pro-oxydants, fer héminique et non héminique, teneurs en scatol et indole) et de l'intensité de l'oxydation au cours de la cuisson (Erasmus *et al.*, 2017; Vasta et Priolo, 2006 ; Watkins *et al.*, 2013). **Les mécanismes sous-jacents restent encore à préciser, car la flaveur résulte d'un grand nombre de composés aromatiques qui peuvent interagir** (Watkins *et al.*, 2013).

Quant aux qualités nutritionnelles, les traitements thermiques entraînent une peroxydation importante des lipides et une perte de jus qui concentre les lipides, phénomènes qui augmentent avec le temps et la température de cuisson (Gatellier *et al.*, 2010). Il est souhaitable de privilégier des modalités qui minimisent ces phénomènes, c'est-à-dire des cuissons à basse température (et de durée plus longue) (Gruffat, 2018). Les pertes en jus dépendent de la teneur en eau initiale de la viande et de la cinétique de la température à l'intérieur de la viande, elle-même liée à la taille des morceaux. Ainsi, les teneurs en lipides et en AG des viandes cuites sont plus élevées que celles des viandes crues. Elles dépendent des teneurs en lipides de la viande crue ainsi que du degré de cuisson. Quant à la composition de la viande en acides aminés, elle n'est pas altérée par la cuisson (Gruffat, 2018). Les viandes cuites présentent des teneurs élevées (et une bonne biodisponibilité) en zinc, ainsi qu'en sélénium. Elles sont d'importantes contributrices aux apports en vitamines B3 et B12 quel que soit le mode de cuisson. C'est également le cas pour l'apport en vitamine B6 par les viandes grillées, poêlées ou rôties, mais moins pour les viandes braisées ou bouillies. Enfin, les viandes cuites restent de très bons vecteurs de fer malgré des pertes significatives de fer et de fer héminique pour les cuissons longues : 100 g de viande cuite grillée, poêlée ou rôtie apportent autant de fer que 100 g de viande crue. Pour les viandes braisées ou bouillies, le rapport fer héminique/fer total reste inchangé, donc compte tenu de la bonne biodisponibilité du fer héminique, la contribution de ce type de viandes aux apports en fer reste intéressante (Gruffat, 2018).

Campo *et al*. (2013) ont analysé l'effet de différentes méthodes de cuisson (grillée, rôtie, mijotée vs. crue) de la viande d'agneau engraissé en bergerie, les différentes cuissons étant réalisées avec de l'huile d'olive. Toutes les méthodes de cuisson augmentent la teneur en lipides (dans l'ordre croissant viande crue < rôtie < grillée < mijotée) du fait des pertes en eau. Les auteurs observent peu de différences entre les deux méthodes de cuisson 'à sec' (viande rôtie ou grillée), bien que les temps de cuisson soient très différents. C'est le mijotage qui a induit les plus fortes modifications de la composition en AG (diminution de la proportion de C16:0, augmentation de la proportion des AGPI n-6, ainsi que des rapports AGPI/SFA et AGPI n-6/AGPI n-3), probablement en lien avec les ingrédients ajoutés (notamment l'huile d'olive ajoutée) et leurs possibles interactions avec la viande. La cuisson a entraîné une baisse de la teneur en vitamines B3 et B12 (-13% et -25%, sur la base de la MS), mais sans différence entre les types de cuisson et tout en permettant de conserver une bonne contribution de la viande à la couverture des besoins (100 g de viande cuite couvrent ainsi 84% à 113% des besoins). La cuisson a entraîné une baisse de la teneur en fer et en zinc, mais à un moindre degré (-9% et -6%, sur la base de la MS).

2.3.5. Exemples de tensions entre différentes dimensions de la qualité et acteurs de la chaîne d'élaboration du produit

La qualité du produit est par définition multidimensionnelle, avec des antagonismes (tensions) ou synergies possibles entre les différentes dimensions de la qualité, les différentes étapes et les différents acteurs de la chaîne alimentaire. Nous donnons quelques exemples à titre d'illustration :

Engraissement des agneaux à l'herbe vs. en bergerie

Le tableau suivant montre qu'il y a des **effets positifs** de **l'engraissement à l'herbe des agneaux** sur certaines caractéristiques commerciales de la carcasse, ainsi que certaines caractéristiques nutritionnelles, technologiques et d'image de la viande (profil en acides gras –proportions plus élevées en AGPI n-3 et en CLA-, stabilité oxydative de la viande, image), mais il y a des **effets négatifs** sur d'autres caractéristiques, notamment organoleptiques (couleur et flaveur de la viande). De plus, les caractéristiques de la carcasse et de la viande sont souvent **plus variables** chez les agneaux d'herbe, à cause d'une plus grande variabilité dans la croissance donc dans l'âge à l'abattage, ce qui peut poser problème à la fois pour les éleveurs, les abatteurs et les consommateurs. A signaler qu'il y a un **antagonisme** entre les caractéristiques nutritionnelles et la flaveur de la viande, lié à l'oxydation des AGPI lors de la cuisson. Ces effets positifs ou négatifs dépendent de la nature de la prairie (composition botanique) et de sa gestion (stade de l'herbe, quantité d'herbe offerte, etc.), ainsi que de la saison. Enfin, la production d'agneaux d'herbe est saisonnée et les performances de croissance des animaux sont variables selon les conditions climatiques, alors que la filière aval souhaite une régularité d'approvisionnement chez ses fournisseurs et un calendrier d'approvisionnement prévisible. Ce mode d'engraissement ne permet pas de couvrir les périodes de forte demande à Pâques et Noël notamment. Par ailleurs, il y a des différences de préférences entre pays, avec une moindre acceptabilité de la viande produite à l'herbe dans les pays du Sud de l'Europe. Enfin, les systèmes d'élevage herbagers sont plus exposés à des risques d'aléas climatiques, de problèmes sanitaires (parasitisme) et de prédation (loups, renards, etc.).

Ces **antagonismes et freins** conduisent souvent à complémenter les agneaux au pâturage avec des céréales ou à les finir en bergerie pendant quelques semaines avant l'abattage ; les effets de ces pratiques sur les différentes caractéristiques de la carcasse et de la viande dépendent alors du niveau de complémentation ou de la durée de finition. Certains signes de qualité liés au terroir (AOP Pré Salé du Mont St-Michel, par exemple) autorisent la complémentation (dans une certaine limite) des agneaux et leur finition en bergerie pendant une certaine durée. Enfin, l'engraissement à l'herbe n'est pas envisageable dans les systèmes laitiers où les agneaux sont sevrés très jeunes.

Effets positifs et négatifs associés à l'engraissement **à l'herbe des agneaux (vs. avec une ration riche en aliments concentrés en bergerie)**.

Dimensions	Effets positifs	Effets négatifs
Caractéristiques commerciales	-Gras de couverture plus ferme et plus lumineux	- Risques d'état d'engraissement insuffisant - Variabilité entre animaux - Production saisonnée
Caractéristiques organoleptiques		- Viande plus sombre - Flaveur plus forte et moins appréciée - Variabilité des effets selon la saison, l'animal, la nature de la prairie et la gestion de l'herbe (stade et quantité d'herbe offerte)
Caractéristiques nutritionnelles	- Meilleur profil en acides gras de la viande	- Variabilité des effets selon la saison, l'animal, la nature de la prairie et la gestion de l'herbe (stade et quantité d'herbe offerte)
Caractéristiques technologiques	- Meilleure stabilité oxydative de la viande (antioxydants de l'herbe)	
Caractéristiques d'image	- Naturalité, animaux en plein air, moindre empreinte environnementale (moins d'intrants, entretien prairies, biodiversité, captation carbone…)	

Agneaux d'herbe biologiques vs. conventionnels

Le tableau suivant montre qu'il y a des **effets positifs** de **l'élevage biologique** sur certaines caractéristiques commerciales de la carcasse, ainsi que certaines propriétés nutritionnelles et d'image de la viande (profil en acides gras, naturalité, signe de qualité, moindre empreinte carbone car moins d'intrants), mais il y a des **effets négatifs** sur d'autres caractéristiques (risques accrus de défauts de flaveur et de fermeté du gras de couverture). Ces risques accrus sont liés à certaines légumineuses, notamment le trèfle blanc, en général plus présent dans les prairies biologiques. A signaler qu'il y a un **antagonisme** entre les caractéristiques nutritionnelles et la flaveur de la viande, lié à l'oxydation des AGPI lors de la cuisson. Des études s'intéressent à différentes pratiques d'élevage qui pourraient permettre de diminuer l'occurrence des défauts tout en tirant avantage de la présence du trèfle blanc dans les prairies (utilisation de plantes riches en tannins condensés sous forme pâturée ou de supplémentation –foin, pellets-). Les études ne montrent pas de différences sur les autres dimensions de la qualité. Cependant, la production de viande ovine biologique nécessite plus de surface.

Effets positifs et négatifs associés à **l'élevage biologique** des agneaux d'herbe (**vs. élevage conventionnel** des agneaux d'herbe).

Dimensions	Effets positifs	Effets négatifs
Caractéristiques commerciales		-Risques de gras de couverture moins ferme
Caractéristiques organoleptiques		-Risques de défauts de flaveur accrus (+ de scatol, + de produits d'oxydation des AGPI)
Caractéristiques nutritionnelles	-Meilleur profil en acides gras de la viande (+ d'AGPI n-3)	
Caractéristiques d'image	- Produit différencié (SIQO) - Naturalité - Moindre niveau d'émissions de GES (kg eq. CO_2/kg produit), car moins d'intrants et service accru de fixation de l'azote de l'air par légumineuses	-Utilisation de terres nécessaires à la production augmentée

Enrichissement de la ration des agneaux de bergerie en AGPI n-3

L'enrichissement de la ration des agneaux engraissés en bergerie avec des matières premières riches en AGPI n-3 est favorable à la dimension nutritionnelle de la viande. Cependant, cette pratique ne doit pas se faire au détriment des qualités organoleptiques (développement de flaveurs rances, modification de la couleur) ou technologiques (durée de conservation plus courte). L'apport d'antioxydants, au stade de la production et/ou de la transformation, permet de limiter ces risques.

Teneur en lipides intramusculaires

La teneur en lipides intramusculaires (LIM) contribue à la qualité organoleptique de la viande ovine (tendreté, jutosité, flaveur). Cependant, une teneur en LIM trop élevée peut être préjudiciable à la fois pour des raisons commerciales (rejet du produit par les consommateurs) et diététiques. Il y a donc un compromis à trouver dans une teneur en LIM suffisante pour permettre le développement des qualités en bouche, mais pas excessive pour ne pas pénaliser les aspects diététiques et conserver un aspect commercial acceptable. Il faut signaler l'effet négatif pour les qualités en bouche de la sélection pour le développement musculaire et l'épaisseur de la noix de côtelette et contre le gras de couverture (Pannier *et al.*, 2014). Là aussi, il faut trouver un compromis pour une sélection équilibrée combinant ces deux caractéristiques antagonistes (Pannier *et al.*, 2018). Des études s'intéressent à la mesure de la teneur en LIM à l'abattoir à l'aide de méthodes rapides utilisables en ligne, de manière à mieux prédire la qualité en bouche, segmenter le produit, et envisager un paiement des éleveurs à la qualité de la viande produite (Pannier *et al.*, 2018).

2.3.6. Conclusions

La filière viande ovine européenne se caractérise par une grande diversité de systèmes de production et de types d'animaux produits (depuis des agneaux très jeunes pré-ruminants jusqu'à des ovins adultes), mais à l'inverse peu de produits transformés. Il y a de fortes particularités culturelles dans les préférences alimentaires liées à la plus ou moins grande importance des systèmes laitiers et des systèmes herbagers. Les points forts de cette filière sont l'image de 'naturalité' et le nombre de signes de qualité. Les points critiques sont une faible attractivité de la viande ovine chez les jeunes et le risque de défauts de flaveur. 'L'offre produit' est également peu variée et l'un des enjeux de la filière est de revaloriser la viande ovine auprès des jeunes, notamment à travers le développement de nouveaux produits faciles à cuisiner (viande hachée, plat 'portion', prêt à cuire, merguez, etc.) et de mieux connaître et prendre en compte la diversité des attentes des consommateurs (viande bio, de terroir, halal, etc.) (Prache *et al.*, 2018).

La qualité du produit se construit (et peut se dégrader) tout au long du continuum depuis la conception de l'animal jusqu'à la consommation. Elle est par définition multidimensionnelle, avec de possibles antagonismes ou synergies entre les différentes dimensions, étapes et acteurs de la chaîne alimentaire, que nous avons illustrés sur quelques exemples. Les méthodes de caractérisation multicritère, développées dans le chapitre suivant, sont émergentes ; elles peuvent intégrer des pondérations entre dimensions, des compensations entre points forts et faibles, voire des effets de seuil, discutés et choisis par les acteurs de la chaîne alimentaire.

Certaines difficultés méthodologiques sont à signaler. Ainsi, si la flaveur de la viande ovine est un critère important de sa qualité, les études soulignent une grande variation dans l'appréciation et la sensibilité aux flaveurs entre groupes de consommateurs, membres d'un même jury, et entre jurys entraînés et non entraînés. Les recherches sur les composés impliqués dans la flaveur et ses sources de variation sont d'ailleurs très évolutives. On manque encore d'approches intégrées

englobant les caractéristiques animales, les pratiques d'élevage, de transformation et de consommation. A signaler à cet égard le système MSA, initialement développé en Australie pour la viande bovine et en cours d'adaptation pour la viande ovine, qui cherche à combiner les facteurs amont et aval en un modèle de prévision de certaines propriétés organoleptiques pour les consommateurs. Ce système ne concerne cependant pas toutes les dimensions de la qualité. Enfin, on manque encore de données scientifiques faisant le lien entre les propriétés nutritionnelles de la viande (notamment son profil en AG), sa consommation et les maladies chroniques chez l'homme. Il faut aussi signaler que les indicateurs utilisés (indice d'athérogénicité et de thrombogénicité, par exemple) ne sont pas complètement stabilisés entre études.

L'effet des facteurs de variation des différentes dimensions de la qualité et leur importance sont résumés dans les tableaux de synthèse ci-dessous. Une restriction alimentaire de la mère pendant la gestation, identifiée dans les années 1980 comme délétère pour les caractéristiques commerciales de la carcasse (poids et état d'engraissement) du jeune, puis relativement 'oubliée' dans la littérature, a à nouveau fait l'objet d'études récentes, sous le concept de 'programmation fœtale'. A cet égard, l'orientation des systèmes d'élevage vers plus d'agro-écologie, donc vers des systèmes à la fois plus herbagers et moins consommateurs d'intrants peut présenter des avantages quant à la qualité nutritionnelle de la viande, mais aussi des risques, au-delà de ceux liés aux aléas inhérents à la production à l'herbe : i) plus grande variabilité des performances animales et en conséquence de la qualité du produit, ii) risques plus importants de défauts de flaveur, iii) conditions d'alimentation déficitaires à certaines périodes clés du cycle de production qui conditionnent la qualité du produit (notamment fin de la gestation et les semaines précédant l'abattage des animaux), et iv) irrégularité d'approvisionnement. La sélection génétique a par ailleurs surtout recherché un accroissement de la proportion de muscle dans la carcasse et dans certains morceaux nobles au détriment des dépôts adipeux, pour des raisons économiques, diététiques et d'efficacité alimentaire, avec le risque de dégrader les propriétés organoleptiques (Pannier *et al.*, 2014) et de rendre difficile la finition des agneaux à l'herbe (manque de gras de couverture) (Prache *et al.*, 2018). De plus, alors que l'on constate une variabilité interindividuelle importante de la flaveur de la viande issue d'animaux élevés dans les mêmes conditions, il n'y pas d'information, à notre connaissance, sur l'héritabilité de ce caractère (Watkins *et al.*, 2013) ni, à notre connaissance, d'études faisant état de sélection sur ce critère. Il semble essentiel que les objectifs de sélection prennent mieux en compte les critères importants pour des systèmes plus agro-écologiques (robustesse, santé, qualité des produits, au même titre que la productivité). L'accompagnement des éleveurs dans les itinéraires techniques (Sheath *et al.*, 2001), dans la prise en compte de l'hétérogénéité des animaux du troupeau, voire la re-conception des systèmes d'élevage sont également questionnés. Des études sont en cours par exemple sur les systèmes herbagers mixtes associant ovins et bovins, car ils offrent des services écosystémiques intrants qui permettent de mieux sécuriser les performances animales et la finition à l'herbe (d'Alexis *et al.*, 2014).

La transformation permet de valoriser certains morceaux moins nobles de la carcasse ou la viande d'animaux âgés et de diversifier l'offre produit. A signaler que les études s'intéressent particulièrement aux composés issus de plantes et aux huiles essentielles comme alternatives aux conservateurs de synthèse et pour rectifier une flaveur de 'mouton' trop intense. L'analyse de la littérature montre cependant le peu d'articulation entre l'étape de production et celle de la transformation. Une meilleure intégration des deux doit être encouragée, de manière à mieux adapter les procédés à la diversité des caractéristiques de la viande liée aux conditions d'élevage (hétérogénéité des carcasses et des viandes, dont la flaveur, la nature des AG déposés, la teneur en antioxydants, etc.). A cet égard, les méthodes rapides de caractérisation de la viande, qui sont en développement (SPIR par exemple) pourraient avoir un potentiel d'application important.

L'amélioration de la qualité nutritionnelle de la viande passe par une augmentation des teneurs en AGPI n-3 et en CLA 9cis, 11 trans et une réduction de la teneur en AGS. Seule l'alimentation des animaux influence de façon notable la composition en AG de la viande, comme par exemple une alimentation riche en AGPI. Toutefois, les processus de biohydrogénation des lipides alimentaires dans le rumen limitent les possibilités d'améliorer les teneurs en AG bénéfiques et à cet égard, le développement de nouvelles technologies de protection est nécessaire. La peroxydation des lipides au cours des phases d'élevage et de transformation peut fortement altérer les qualités nutritionnelles de la viande, phénomène d'autant plus important à considérer que les viandes sont riches en AGPI. Ainsi, l'apport combiné d'antioxydants à propriétés lipophiles et hydrophiles dans l'alimentation des animaux et une réduction du stress pré-abattage sont importantes pour conserver les qualités de la viande au cours des phases de conditionnement et de transformation. Enfin, la cuisson entrainant une concentration et une peroxydation importante des lipides de la viande, il est important de préconiser des cuissons à basse température (Gruffat, 2018).

Les besoins, perceptions et préférences des consommateurs sont variés mais évoluent vers des dimensions éthiques, environnementales et de redistribution de la valeur, avec le développement de systèmes alimentaires alternatifs (bio, AMAP, local), qui coexistent maintenant avec les systèmes agro-industriels dominants. Les signes de qualité et l'étiquetage permettent de rassurer les consommateurs et de tirer avantage de produits issus de modes de production plus agro-écologiques.

Synthèse des effets des différents facteurs de variation des caractéristiques de la carcasse et de la viande des ovins

Résumé de l'effet des facteurs de variation des propriétés commerciales des carcasses ovines

Facteurs	Rendement (poids de carcasse/poids vif à l'abattage)	Poids de la carcasse	Composition et état d'engraissement de la carcasse	Conformation	Fermeté et couleur du gras de couverture
Caractéristiques animales					
Race	++	+++	+++	++	+
Age/poids	+++	+++	+++	+++	+
Type sexuel	+	++	+++	-	+++
Poids à la naissance	-	+++	+++	-	-
Conditions d'élevage					
Nutrition de la mère en gestation	-	incertain	incertain	+	-
Nutrition et vitesse de croissance de l'agneau	+	variable	variable	-	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++). Lorsque l'effet dépend d'autres facteurs, l'effet est décrit comme 'variable'. Lorsqu'il y a un manque de concordance entre études, l'effet est décrit comme incertain.

L'effet de la nutrition de l'agneau est variable : pour les agneaux de lait (non sevrés), l'augmentation des apports alimentaires accroit l'adiposité de la carcasse. Pour les agneaux sevrés, les études sont contradictoires, certains auteurs observant un état d'engraissement légèrement inférieur avec une restriction alimentaire, d'autres non.

L'effet de la nutrition de la mère durant la gestation est variable : certains auteurs observent une réduction du poids de la carcasse et une augmentation de l'adiposité chez les agneaux dont les mères ont été restreintes en gestation, d'autres non.

Résumé de l'effet des facteurs de variation des propriétés organoleptiques de la viande ovine

Facteurs	Couleur	Tendreté	Jutosité	Flaveur
Muscle/morceau	+++	+++	+	++
Caractéristiques animales				
Race	+	-/+	-/+	-/+
Age	+++	+++	++	++
Type sexuel	-	++	++	+
Conditions d'élevage et pré-abattage				
Nutrition	++	++	++	+++
Stress	+++	++	+++	++
Traitement post-mortem de la carcasse				
Refroidissement	++	+++	++	+
Stimulation électrique	+	+++	++	+
Conditions de conservation et de préparation				
Durée (maturation et conservation)	++	+++	++	+
Mode de conditionnement	+++	+	++	++
Mode de transformation	-	+++	-	+++
Mode de cuisson	+++	+++	+++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++).

Chez les agneaux de lait, la viande a une couleur pâle et elle a une flaveur peu intense. Parmi les conditions d'élevage, on observe en général des caractéristiques de couleur, tendreté, jutosité et flaveur différentes entre agneaux engraissés à l'herbe et agneaux engraissés en bergerie avec une ration à base de concentrés, et une variabilité plus importante de ces caractéristiques pour les agneaux engraissés à l'herbe. La transformation concerne surtout la viande d'animaux âgés ; elle comprend le hachage (qui élimine les problèmes de tendreté) et l'addition de nitrites, sucres, herbes aromatiques et épices pour rectifier une flaveur trop intense.

Résumé de l'effet des facteurs de variation des propriétés nutritionnelles de la viande ovine

Facteurs	Teneur en protéines	Teneur en lipides	Profil en acides gras (AG)	Teneur en minéraux, vitamines et oligo-éléments
Muscle/morceau	-	+++	+	+++
Caractéristiques animales				
Race	-	+	+	-
Age	-	+++	+++	+++
Type sexuel	-	+++	-	-
Conditions d'élevage et pré-abattage				
Nutrition	-	+	+++	+++
Conditions de conservation et de préparation				
Mode de cuisson	-	++	++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++).

Chez les agneaux de lait (monogastriques sur le plan fonctionnel digestif), la viande est moins riche en fer et le profil en AG reflète celui du lait maternel. Parmi les conditions d'élevage, la viande d'agneau engraissé à l'herbe présente un meilleur profil en AG que la viande d'agneau engraissé en bergerie avec une ration à base de concentrés, les différences variant avec les conditions de pâturage.

Résumé de l'effet des facteurs de variation des CARACTÉRISTIQUES TECHNOLOGIQUES de la viande ovine

Facteurs	Aptitude à la conservation
Conditions d'élevage et pré-abattage	
Nutrition	+++
Stress	+
Conservation et préparation	
Durée de conservation	+++
Mode de conditionnement	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

L'aptitude à la conservation dépend i) de l'équilibre entre facteurs pro-oxydants et antioxydants, ii) du pHu de la viande, les viandes à pHu élevée présentant une stabilité microbienne plus faible, iii) du mode de conditionnement (atmosphère modifiée, sous vide, etc.). Les conditions d'élevage jouent à travers la modulation des teneurs en AG polyinsaturés, en fer et en antioxydants, celles de pré-abattage à travers le niveau de stress de l'animal.

Facteurs majeurs de variation des caractéristiques des carcasses et viandes d'ovins

Facteurs	Commerciale	Organoleptique	Nutritionnelle	Technologique
Caractéristiques animales				
Race	+++	+	+	-
Age	+++	+++	+++	-
Type sexuel	+++	++	+	-
Poids à la naissance	++	-	-	-
Conditions d'élevage et pré-abattage				
Nutrition	+	+++	+++	+++
Stress	-	+++	-	+
Traitement post-mortem de la carcasse				
Refroidissement	-	++	-	-
Stimulation électrique	-	++	-	-
Conditions de conservation et de préparation				
Durée (maturation et conservation)	-	+++	++	+++
Mode de conditionnement		++		+++
Transformation		++		
Mode de cuisson		+++	++	

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

2.4. Viande et produits transformés de porc

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Viande et produits de porc
La section sur le Porc et les produits transformés de porc a été rédigée en s'appuyant sur **237 références** dont 73% d'articles scientifiques primaires ou de synthèse, 9% de communications en conférences, 6% de rapports, 6% de règlements (nationaux ou européens) et 6% d'ouvrages ou chapitres d'ouvrage. Les **caractéristiques de la filière et des produits de porc aux niveaux national et européen** ont été présentées en introduction de la section, en se basant sur des rapports et ressources réglementaires. Vu l'ampleur de la littérature scientifique internationale disponible sur le sujet (plusieurs milliers de références sur les quinze dernières années), la rédaction de cette section a été entreprise **en se basant essentiellement sur des synthèses (revues scientifiques) et quelques méta-analyses disponibles**, complétées de résultats issus d'articles scientifiques primaires pour illustrer des points précis.
La littérature mobilisée est **internationale (88% des références)** produite par des auteurs européens en majorité, mais aussi des Etats Unis, d'Asie, et d'Australie dans une moindre mesure.
Les **revues les plus citées** figurent parmi les **principales revues de rang élevé** (premier quartile) des **catégories « Food Science and Technology »** et **« Agriculture, Dairy and Animal Science »** de la classification du Journal Citation Reports. **Meat Science** est la revue la plus citée (53 références) Le nombre assez élevé (16) d'articles publiés dans INRAE Productions Animales (référencé dans le Web of Science) s'explique par le recours à plusieurs synthèses traitant de façon complète diverses facettes de la thématique abordée. Les autres ressources nationales sont constituées d'environ un tiers de la « littérature grise ».
Les références utilisées sont **récentes** puisque **la moitié (120) ont été publiées sur la dernière décennie** et 36% entre 2001 et 2010 ; 13% des références, publiées avant 2000, correspondent à des notions bien établies qu'il convenait de mobiliser. Parmi les 15 auteurs les plus cités, 7 sont INRAE et contribuent à 57% des références citées 5 fois et plus. Au total les **auteurs INRAE** représentent **15% de l'ensemble des auteurs** des références citées.
L'autocitation (11%) s'explique par le recours à plusieurs articles originaux et de synthèse publiés par l'expert relevant du domaine traité. L'ampleur de la bibliographie disponible sur les propriétés de la viande et des produits de porc a obligé à faire un choix en considérant en premier lieu le **produit brut**, puis, parmi l'extrême diversité de produits transformés, **deux produits phares** relevant de technologies d'élaboration différentes. Il n'a malgré tout pas été possible de considérer l'ensemble de la littérature disponible sur ces objets depuis 15 ans ; les choix opérés (recours à des synthèses, méta-analyses lorsqu'elles sont disponibles) ont cependant visé à garder le plus d'**exhaustivité** possible.

2.4.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation

2.4.1.1. Contexte général de la production et de la consommation de viande et produits de porc

Le porc est la seconde viande la plus consommée à l'échelle mondiale, juste derrière la volaille (respectivement 15,6 kg et 15,9 kg équivalent carcasse/habitant en 2017, correspondant à 12,2 kg de viande de porc et 14,0 kg de viande de volaille/habitant ; d'après OCDE, 2018[15]). Comme pour les autres viandes, la consommation de porc varie fortement d'un continent à l'autre et constitue la principale viande consommée en Asie, ainsi qu'en Europe (41 kg équivalent carcasse/habitant en 2018) et en France (33 kg équivalent carcasse ou 25,7 kg de viande/habitant en 2018, soit 38% de la consommation de viande), IFIP (2019) ; OCDE, (2018). Au niveau européen, les consommations moyennes les plus élevées sont observées de manière récurrente en Allemagne, Autriche, Pologne, Espagne et Danemark (48 à 68 kg/an) et la plus faible au Royaume Uni (25 kg/an).

La production porcine mondiale (111,7 millions de tonnes (MT) équivalent carcasse en 2017, + 12% depuis 2009) est assurée à 57% par l'Asie (49% en Chine), l'UE (28) produisant 21% des volumes (FranceAgriMer (2010) ; IFIP (2019)). La France est le 3ème pays producteur de l'UE avec 2,2 MT équivalent carcasse en 2018, derrière l'Espagne (4,6 MT) et l'Allemagne (4,9 MT). Après une forte hausse dans les années 90, la production porcine française a légèrement diminué entre 2000 et 2018 (- 4%), alors qu'elle augmentait dans l'UE (+ 15%) en particulier en Espagne (+ 55%) et en Allemagne (+ 27%) (ITP (2001) ; IFIP (2019)).

Le niveau d'auto-approvisionnement en viande de porc en France, devenu excédentaire à partir du début des années 90 (106% en 2009), a progressivement diminué depuis une dizaine d'années pour arriver à l'équilibre (100%) en 2018 (IFIP, (2019)). Les importations de viande porcine (550 milliers T en 2018, à plus de 99% intra-communautaires dont plus de la moitié d'Espagne) et les exportations (492 milliers T en 2018, à plus 30% vers les pays tiers) portent essentiellement sur les

[15] OCDE (2018). Consommation de viande (indicateur). http://dx.doi.org/10.1787/edbce270-fr (Consulté le 13 décembre 2018)

pièces de découpe, les produits transformés et les graisses. La France est importatrice nette de jambons (pièces de découpe désossées) du fait d'un déficit structurel d'environ 20 à 30% des besoins lié à une forte demande nationale pour la production de jambon cuit. A l'inverse, le solde est positif pour la longe, la demande en viande fraîche étant moindre que dans d'autres pays. Concernant les produits transformés, la balance commerciale est très négative (-486 millions € en 2016), la France important principalement des charcuteries cuites en provenance d'Allemagne et des charcuteries sèches en provenance d'Espagne et d'Italie. A l'inverse, la balance commerciale est positive pour les abats et les graisses, exportés vers des pays où ils sont mieux valorisés, en particulier la Chine (Dourmad *et al.*, 2018). Au sein d'un marché national autosuffisant, ces échanges sont importants pour valoriser en alimentation humaine l'ensemble de la carcasse et des abats, en jouant sur les complémentarités et la diversité des habitudes alimentaires dans les différents pays (Dourmad *et al.*, 2015).

Au niveau européen, le niveau d'auto-approvisionnement est positif en moyenne (112%) mais varie considérablement entre les pays, de près de 500% au Danemark, près de 250% aux Pays-Bas et en Belgique, 168% en Espagne, 124% en Allemagne, à 93% en Pologne, 62% en Italie, 54% au Royaume-Uni et près de 30% en Grèce (IFIP, 2019). Dans certains pays la production porcine est insuffisante pour satisfaire les besoins de la transformation : ainsi, l'Italie importe de la viande fraîche et en particulier des jambons à hauteur d'environ 70% de ses besoins pour la production de jambons cuits et secs (Lecuyer et Legendre, 2015).

Les caractéristiques de ces échanges, en termes de volume et de valeur, s'expliquent par le fait qu'en France, comme en Europe, le porc est consommé majoritairement sous forme de produits transformés : ils représentent environ 75% de la consommation nationale de porc et 50 à 60% en Italie et Pologne, 60-65% en Espagne et 65-70% en Allemagne (IFIP, 2019; Lecuyer et Legendre, 2015). En France, les principaux produits sont : les saucisses et saucissons (32%, dont 1/3 de saucisson sec), le jambon et les viandes cuites (28%), les viandes salées, séchées, fumées (15%), les pâtés et rillettes (10%) et les produits traiteur et conserves (16%) (Figure 20) (IFIP, 2019). Le Code des Usages de la Charcuterie, de la Salaison et des Conserves de Viandes[16], réédité en 2016 et mis à jour en 2017 ; (IFIP, 2016 ; 2017), recense ainsi plus de 450 spécialités charcutières françaises, traditionnelles ou innovantes.

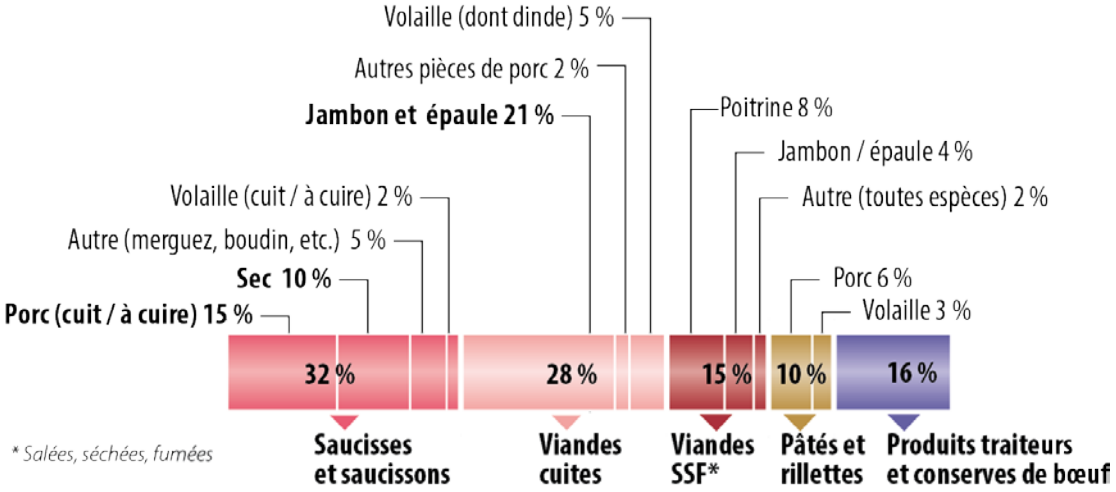


Figure 2.4.1. Diversité des charcuteries produites en France en 2018 (en pourcentage des volumes produits), à partir de matières premières (viandes et abats) de porc (84%), volaille (11%) ou autres espèces (5%) (IFIP, 2019)

Les types de produits de porc fabriqués sont également très nombreux et vairés selon les pays ou régions d'Europe. Les salaisons sèches à temps d'affinage long (jambons/épaule) et court (saucissons, chorizo, coppa, etc.) occupent une place importante en Italie, qui compte 21 produits de charcuterie AOP d'**Appellation d'Origine Protégée (AOP)** et en Espagne (5 AOP ; voir 2.4.1.2). La part des morceaux salés, séchés et fumés n'est pas négligeable dans les autres pays, mais il s'agit surtout de produits saumurés type bacon (Royaume-Uni, Danemark) (Lecuyer et Legendre, 2015). L'image de qualité très élevée des charcuteries italiennes et espagnoles masque une hétérogénéité forte, et la segmentation est importante notamment pour les jambons secs (voir 2.4.1.2 et 2.4.3.2). Les prix moyens des charcuteries italiennes et espagnoles apparaissent, avec la France, parmi les plus élevés d'Europe. L'Italie et l'Espagne disposent d'un document de référence fixant

[16] https://www.code-des-usages-charcuterie.fr/

les dénominations, les caractéristiques principales des produits transformés (recettes, ingrédients, caractéristiques physico-chimiques, durée de fabrication des jambons secs, etc.), et des mentions de qualité pour certains produits (notamment les jambons, toutefois ces textes apparaissent moins exhaustifs et précis que le Code des usages français (Lecuyer et Legendre, 2015). Au Danemark, en Pologne et au Royaume-Uni, il n'existe pas (en 2015) de normes ou de textes réglementaires fixant des règles sur les recettes ou la dénomination des produits de charcuterie ; la qualité des produits est régie par des normes « privées » fixées entre un industriel et ses différents clients. L'Allemagne se caractérise par une très forte variété de charcuteries (formats, recettes, taille du grain, arômes…), dominées par les produits embossés (« Würste ») mais également les jambons cuits, produits secs, pâtés et produits en gelée, etc. La variété des produits embossés est cependant issue de processus de fabrication assez standardisés, permettant une valorisation optimale de la carcasse (Lecuyer et Legendre, 2015). Le niveau qualitatif des produits est très hétérogène, incluant des articles « premier prix » destinés au hard discount jusqu'aux produits sous signe de qualité. Comme en Espagne et en Italie, la typicité régionale est marquée. L'Allemagne compte 18 produits sous **Indication Géographique Protégée (IGP)** dont 5 jambons secs, mais pas d'AOP. L'Allemagne dispose également d'un texte réglementant le secteur de la charcuterie définissant notamment des critères physico-chimiques, mais qui comporte peu d'informations sur les procédés de fabrication et les niveaux de qualité des produits (Lecuyer et Legendre, 2015).

La grande variété de produits de porc induit des attentes qualitatives variées et spécifiques selon les acteurs de la filière : producteurs, abatteurs, transformateurs, distributeurs, consommateurs, complexifiant la notion de qualité dans la filière (Lebret et Faure, 2015). Cette diversité de produits est aussi associée à une diversité de procédés d'élaboration ainsi que de recettes, marques ou « signatures » collectives ou privées, et de productions sous signes officiels de qualité et d'origine (SIQO) : Label Rouge, AOP/AOC, IGP, production biologique (Dourmad *et al.*, 2018). La grande variété de produits transformés contraste avec la faible diversité de l'offre en viande fraîche où les côtelettes, la longe (rôti) et le filet mignon constituent l'essentiel des ventes, surtout en grande distribution.

Le niveau de consommation individuelle de porc diminue en France depuis 2000, parallèlement à l'évolution de la consommation moyenne de viande, toutefois le volume total reste stable compte tenu de l'évolution de la population. La diminution de consommation de porc touche surtout la viande fraîche, les produits de charcuterie étant moins impactés (FranceAgriMer, 2018)[17]. En contrepartie, les productions et produits de porc sous SIQO augmentent de façon marquée depuis quelques années, tirées par un marché en croissance, même si elles ne représentent qu'une faible part de la production totale (Label Rouge : 5,0% ; porcs biologiques : 0,7% ; (IFIP, 2019). Les volumes de productions sous IGP concernent surtout des charcuteries (3% des charcuteries de porc), les AOP, très marginales, correspondant à un marché de niche.

2.4.1.2. Diversité de la production et de la transformation dans la filière porcine en France : structures de production et de transformation, animaux, modes de production et produits

Structures de production et de transformation

La production porcine française est souvent perçue comme uniforme, alors qu'elle présente une assez grande diversité en termes d'organisation, de taille des élevages et de leur insertion dans l'exploitation agricole. Ainsi, en 2010, les élevages spécialisés représentaient 39% des exploitations et 61% du cheptel alors que pour 38% des exploitations l'élevage porcin était associé à la présence d'herbivores, en particulier des vaches laitières (Roguet *et al.*, 2014). En termes géographiques, comme dans les autres pays Européens, la production porcine française est marquée par une forte régionalisation, la Bretagne et le Grand Ouest représentant respectivement 58 et 75% de la production nationale, le Grand Sud-Ouest près de 10%. Cette régionalisation se poursuit, surtout du fait de la réduction de la production en dehors du Grand Ouest, rendant compte de la sensibilité de cette production aux économies d'agglomération (Dourmad *et al.*, 2018). Plus de 90% de la production est assurée par des groupements de producteurs, au nombre de 32 en 2018 (contre 92 en 2000) et rassemblant plus de 8 800 adhérents, les 6 plus gros commercialisant près de 70% de la production. Le secteur de l'abattage des porcs présente également une grande diversité de structures : sur 174 abattoirs dénombrés en France en 2017, les 145 plus petits (moins de 100 000 porcs abattus) contribuaient à seulement 9% des abattages alors que les 9 plus importants contribuaient à 59% des abattages (11% pour le plus gros) (IFIP, 2019). La répartition géographique des activités d'abattage est à l'image de celle de la production avec 64,4% des abattages en Bretagne, 11,0% en Pays de la Loire et 9,2% en Nouvelle Aquitaine. Les abattoirs les plus importants sont sous la direction de groupements de producteurs, de groupes privés, de découpeurs-transformateurs, de distributeurs, ou d'organisations privées intégrant l'ensemble de la filière. Les petits abattoirs locaux (parfois municipaux) jouent un rôle important dans le maintien de la production porcine sur l'ensemble du territoire et vice-

[17] FranceAgriMer (2018). Fiche Elevage Filière Porc. www.franceagrimer.fr (Consulté le 13 décembre 2018)

versa, et peuvent être cruciaux pour certaines filières sous SIQO notamment celles valorisant les races locales (Dourmad *et al.*, 2018). Les entreprises de charcuteries-salaisons (310 en France en 2018) présentent également une répartition régionale, l'Ouest de la France (Bretagne et Pays de la Loire) concentrant 55% de la production, devant la région Auvergne-Rhône Alpes (12%) (IFIP, 2019). A ce niveau également on note une diversité des tailles de structure, avec quelques gros opérateurs (6% des entreprises réalisent 43% du CA du secteur) et de nombreuses structures de taille moyenne ou petite (58% des entreprises contribuent à 10% du CA du secteur). Le porc représente 84% des matières premières carnées valorisées par les charcuteries-salaisons en 2018 et la volaille 11%, en progression, tirée par la demande des consommateurs. Les jambons (et épaules) cuits restent les produits phares (21%), les jambons et saucissons secs représentant 14% des produits de charcuterie (Figure 2.4.1.) (IFIP, 2019).

Animaux

La très grande majorité de la production de viande porcine française est issue de « porcs charcutiers » (environ 96%) ; la viande issue de truies de réforme (environ 4%) est valorisée par la production de charcuteries et salaisons, alors que la production de porcelets de lait est négligeable en France.

Comme dans les autres pays producteurs, la grande majorité des porcs charcutiers sont issus de croisements entre des lignées maternelles et des lignées paternelles, la production de viande à partir d'animaux de race pure se limitant aux filières associées aux races locales (voir ci-dessous). L'utilisation du croisement permet de spécialiser les lignées/races avec d'un côté, des lignées maternelles sélectionnées pour leurs performances de reproduction et leur comportement maternel et de l'autre, des lignées paternelles sélectionnées pour la croissance, l'efficacité alimentaire et la qualité des carcasses (teneur en maigre) et des viandes (caractéristiques technologiques essentiellement). Cette organisation permet de valoriser la complémentarité entre races spécialisées, d'améliorer l'efficacité de sélection et de bénéficier de l'effet d'hétérosis (Dourmad *et al.*, 2018). La majorité des truies élevées dans les élevages de production sont issues du croisement entre les races Large-White et Landrace, les truies de lignées composites sino-européennes représentant environ 30% des effectifs. Du côté paternel, l'homogénéité est encore plus grande puisque en 2017, 94% des inséminations ont été réalisées avec de la semence de verrats contenant 50% ou plus de race Piétrain et 74% avec du Piétrain pur ; les lignées Duroc représentent une part mineure (5%) mais en progression (Hassenfratz, 2018), certains opérateurs valorisant leur effet favorable sur la qualité sensorielle de la viande (viande moins claire, moins exsudative et plus tendre), ou mettant en avant la « robustesse » des animaux en élevage (IFIP (2019) ; observations personnelles). Les mêmes races sont généralement utilisées dans les filières Label Rouge et Biologique avec toutefois des contraintes particulières relatives à la qualité de la viande : absence des allèles n et RN^- aux gènes Halothane et Rendement Napole (induisant respectivement les défauts de qualité de type PSE et viande acide, *cf.* chapitre 1 et ci-après) obligatoire en production Label Rouge et recommandée en production biologique (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (Commission européenne, 2008b; 2017a ;)). Les races locales porcines françaises sont au nombre de 6 : Basque, Bayeux, Blanc de l'Ouest, Cul Noir du Limousin, Gascon et Nustrale, associées à des systèmes de production spécifiques généralement en relation avec un SIQO. Ces races locales sont suivies par le Ligéral (Ministère de l'Agriculture) qui assure la gestion de leurs livres généalogiques et met en œuvre des programmes de conservation. Pour la plupart, ces races locales se caractérisent par de faibles performances de reproduction et de croissance, une forte adiposité et des qualités organoleptiques des viandes bien supérieures à celles de porcs conventionnels, valorisées par des SIQO (Bonneau et Lebret, 2010 ; Lebret *et al.*, 2019a).

Ainsi, en dehors de l'utilisation des races locales en race pure dans des filières de niche, on observe depuis plusieurs années une tendance à l'homogénéisation des races utilisées en production porcine en France, y compris dans les élevages Label Rouge et biologiques, alors même que le panel des races disponibles permettrait d'accroître la diversité de la production en combinant différemment les croisements (Dourmad *et al.*, 2018). Une évolution semble toutefois se dessiner avec le développement récent de l'utilisation du verrat Duroc ; la mise en place du plan de filière élaboré par l'interprofession et favorisant la recherche de différenciation des produits entre standard et labels (INAPORC, 2018) pourrait aussi contribuer à faire évoluer le panorama des ressources génétiques porcines valorisées en France.

Modes de production et produits

Concernant les modes d'élevage des animaux, la très grande majorité des porcs en France (95%) est élevée en bâtiments sur caillebotis, qui représente aussi le mode d'élevage le plus répandu en Europe et dans le monde (INAPORC, 2018). Ce type de logement permet d'ajuster les apports alimentaires ainsi que la température ambiante aux besoins des animaux, qui varient fortement selon leur stade de croissance, et permet par ailleurs une évacuation rapide des déjections. Ce système offre le coût de production le plus faible, en raison du moindre coût alimentaire par rapport aux autres systèmes malgré un coût de bâtiment plus élevé. Les conditions d'élevage (caractéristiques du logement dont surface par animal selon le stade

physiologique, milieu de vie, modalités d'interventions sur les animaux (dont la caudectomie), etc…) sont réglementées par l'UE (directive 91/630/CEE (1991) puis directive codifiée 2008/120/CE (2008a) et transcrites dans le droit français (normes minimales relatives la protection des porcs, JORF (2003) ; elles stipulent que chaque porc de production dispose obligatoirement d'une superficie d'espace libre au moins égale à 0,65 m² jusqu'à 110 kg et 1,0 m² au-delà (le poids vif moyen des porcs à l'abattage étant de près de 120 kg en France en 2018) et ne devrait pas subir la caudectomie en routine telle que cela est en fait pratiqué.

La castration chirurgicale des porcelets mâles est pratiquée en France et dans plusieurs pays européens pour réduire les risques d'apparition d'odeurs indésirables de la viande (*cf.* chapitre 1 ; Bonneau, (1998)). Cette pratique est de plus en plus remise en cause en raison de la douleur qu'elle entraîne pour l'animal pendant et après l'opération (Prunier *et al.*, 2006). En 2010, la quasi-totalité des acteurs européens de la filière porcine se sont engagés à pratiquer la castration sous analgésie et/ou anesthésie prolongée à partir de Janvier 2012 et à arrêter progressivement cette pratique (European Commission, 2010)[18], au profit de la production de mâles entiers ou immunocastrés (vaccination spécifique contre le GnRH qui inhibe le développement sexuel ; Prunier et Bonneau (2006) ; Bonneau (1998)). L'élevage de porcs mâles entiers, très majoritaire depuis de nombreuses années au Royaume-Uni, en Irlande et en Espagne a fait récemment une percée spectaculaire aux Pays-Bas (60% des mâles) et des progrès significatifs en Belgique, en Allemagne comme en France où il concerne environ 20% des mâles (Bonneau (1998). Malgré le coût de production inférieur des mâles entiers (meilleure efficacité alimentaire), la castration chirurgicale des mâles reste majoritaire en France et plusieurs pays de l'UE pour éviter les défauts d'odeur (Parois *et al.*, 2018). En Janvier 2020, le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation a annoncé l'interdiction de la castration à vif des porcelets à partir de 2022 en France, dans le cadre de nouvelles mesures pour la protection et l'amélioration du bien-être animal (MAA, 2020)[19]. La castration chirurgicale devra alors être réalisée avec anesthésie et analgésie, celles-ci pouvant par dérogation être pratiquées par les éleveurs. Il existe une grande hétérogénéité des pratiques dans la prise en charge de la douleur liée à la castration selon les pays, l'utilisation systématique de l'anesthésie (avec ou sans analgésie) étant encore peu répandue (Pays-Bas, Norvège, Suède et Suisse) alors que l'analgésie seule ne permet pas de la réduire efficacement (Bonneau, 1998; De Briyne *et al.*, 2016).

L'alimentation apportée aux animaux est formulée avec précision pour répondre aux besoins nutritionnels des animaux en fonction de leur stade de développement. Elle provient d'industries de l'alimentation animale qui fournissent aux éleveurs la totalité de la ration (aliments complets) ou des aliments complémentaires conçus pour compléter les céréales ou autres matières premières cultivées ou achetées par l'éleveur ; en effet, près d'un tiers des éleveurs français cultivent leurs céréales et/ou oléoprotéagineux (colza, pois, tournesol, soja etc.) et fabriquent à la ferme tout ou partie de la ration alimentaire des porcs (INAPORC, 2018).

A côté du mode de production conventionnel décrit ci-dessus, se développent depuis plusieurs années d'autres démarches valorisant l'origine ou le mode de production. Mobilisant différents acteurs de la filière porcine, elles répondent à des cahiers des charges, précis et sont régulièrement contrôlées par des organismes tiers et accrédités (INAPORC, 2018). Ceci peut ne concerner que la phase d'élevage, mais le plus souvent, cela concerne l'ensemble de la filière, y compris la transformation. Les groupements de producteurs, qui gèrent l'essentiel de la production nationale, jouent un rôle moteur dans l'évolution et la diversification de la production, en développant des liens forts avec l'aval y compris la transformation et la distribution via des contractualisations ou plus directement lorsqu'une même organisation regroupe l'ensemble des maillons de la filière (Dourmad *et al.*, 2018).

Ces démarches sont valorisées par des SIQO ou des marques collectives ou privées. Les voies de différenciation concernent différentes dimensions avec, le plus souvent, l'association de plusieurs d'entre elles pour un même produit :

- L'origine géographique des produits et/ou de la production. On y retrouve des labels officiels : SIQO comme les AOC (Appellation d'Origine Contrôlée, signe français), AOP (Appellation d'Origine Protégée) et IGP (Indication Géographique Protégée), signes européens, mais aussi des marques collectives liées à l'interprofession (comme le label Porc Français garantissant l'origine nationale des animaux ainsi que de leur production et de leur transformation), ou des labels et marques régionales.

[18] https://ec.europa.eu/food/animals/welfare/practice/farm/pigs/castration_alternatives_en [accédé le 29/01/2020]

[19] Mesures pour la protection et l'amélioration du bien-être animal. Janvier 2020. https://agriculture.gouv.fr/didier-guillaume-presente-un-plan-gouvernemental-pour-la-protection-et-lamelioration-du-bien-etre [accédé le 29/01/2020]

- La qualité organoleptique des produits, avec le SIQO Label Rouge (le plus reconnu et, avec le Bio, celui auquel les consommateurs accordent le plus de confiance (INAO, 2015 ; 2017)[20]) ; la qualité nutritionnelle avec le label « Bleu-blanc-cœur », le plus important en volume (9% de la production de porcs en 2017),
- L'absence ou la présence de certains composés dans l'alimentation des animaux, comme « sans OGM », « sans antibiotiques », « nourri aux grains »…
- Le bien-être animal, avec principalement des engagements liés au mode de logement des animaux (sur paille, en liberté, en plein-air) ou à l'abandon de certaines pratiques (comme la castration ou la coupe des queues),
- La production biologique, avec un cahier des charges spécifique européen conditionnant l'ensemble des structures et pratiques d'élevage.

En 2018, la production de porcs **Label Rouge** (LR) représentait près de 5,0% de la production nationale soit 1,11 millions de porcs (IFIP, 2019). Cette production est en forte augmentation depuis quelques années puisqu'elle représentait 0,75 million de porcs en 2013 (Figure 21). La production de porc LR s'inscrit dans le cadre de cahiers des charges spécifiques à chaque label à partir de conditions de productions communes (socle minimal) fixées par l'INAO et régulièrement remises à jour, la dernière version datant de 2017 (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a). Les produits de charcuteries et salaisons LR sont également régis par des cahiers des charges spécifiques à chaque label à partir de conditions de productions communes (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2017a) qui imposent notamment (depuis 2005) l'utilisation de porcs LR pour la production de charcuteries-salaisons LR. En 2019, on dénombre 15 filières de porc Label Rouge et 48 produits de charcuteries ou salaisons LR (Tableau 2.4.1.).

Tableau 2.4.1. Nombre de viandes et produits de charcuterie produits sous SIQO (hors AB) en France en 2019 (INAO 2019, http://www.inao.gouv.fr)

	AOP/AOC	IGP	Label Rouge
Viandes porcines	2	7	15
Charcuteries ou salaisons	5	14	48

Le niveau de qualité supérieure des viandes de porc LR relativement au produit courant (porc standard élevé et abattu en France à un âge d'environ 170 jours ne bénéficiant pas de SIQO) repose sur les caractéristiques sensorielles, ainsi que sur les caractéristiques d'image au regard des conditions de production, le service et la qualité de présentation des portions et produits, et la régularité de qualité. Les critères à considérer pour atteindre ces objectifs concernent notamment la génétique (animaux non porteurs des allèles n et RN^-, liste positive de races et croisements autorisés), le type sexuel (femelles ou mâles castrés sont autorisés), l'alimentation (exemple pour les porcs en engraissement : liste positive d'ingrédients et additifs autorisés ; 90% minimum de grains de céréales, graines et fruits oléagineux, graines de légumineuses et leurs produits dérivés ; moins de 1,9% d'acide linoléique dans la ration ; les systèmes d'alimentation et d'abreuvement autorisés sont décrits), l'âge des animaux à l'abattage (minimum 182 jours), les conditions de transport et d'abattage (transport de maximum 6 h ou 200 km ; douche ou brumisation avant le départ de l'exploitation, à l'arrivée à l'abattoir et avant l'abattage ; 3 h minimum d'attente en abattoir), le poids des carcasses (minimum 80 kg), le pH des viandes (pH ultime compris entre 5,50 et 6,20 dans le Semi membraneux (jambon) ou 5,40 et 6,10 dans le long dorsal (longe). S'y ajoutent des considérations relatives à l'image des produits en relation avec le logement et le bien-être des animaux, l'environnement, le lien au sol (capacité d'épandage d'au moins 40% des effluents sur l'exploitation). Concernant le logement des animaux, on trouve différents types de labels : i) en bâtiment, sur sol ajouré avec une surface par porc supérieure de près de 50% à celle de l'élevage conventionnel (≥ 1 m² /porc au-delà de 21 semaines, ≥ 1,20 m²/porc au-delà de 110 kg de poids vif) ou sur litière (≥ 1,20 m² /porc de plus de 17 semaines ou de 60 kg de poids vif) ; l'élevage en bâtiment concerne la grande majorité de la production LR avec 75% des élevages et 79% de cette production en 2018 ; ii) « Fermier » : en bâtiment avec accès à un parcours au plus tard à 17 semaines (≥ 2m²/porc sur aire bétonnée ou ≥ 50 m²/porc sur sol nu); 6% des élevages) et

[20] INAO, 2015. *Chiffres clés 2013 des produits sous signes de la qualité et de l'origine. Viandes et charcuteries*. INAO, Fil Rouge, Sylaporc. https://www.inao.gouv.fr/content/download/810/7296/version/3/file/2013_chiffrescles_viandes_SIQO.pdf [Consulté le 16 décembre 2018]

INAO, 2017. *Chiffres clés 2016. Viandes et charcuteries sous le signe de la qualité et de l'origine*. INAO, Fil Rouge, Sylaporc. https://www.inao.gouv.fr/content/download/2315/22415/version/1/file/Publication-Viandes-Charcuteries-2016-INAO-FILRouge.pdf [Consulté le 16 décembre 2018]

iii) « Fermier en plein air » (≥ 83 m²/animal) ou « Fermier en liberté » (≥ 250 m²/animal), qui concernent 19% des élevages (IFIP, 2019).

L'élevage de porcs LR s'est fortement accru à partir de 2005 (il représentait alors 0,3 million de porcs/an), lorsqu'il a été décidé de lier la production de charcuteries LR à celle des animaux qui devaient donc être produits sous cahier des charges LR. Auparavant, la part de produits de charcuterie LR était beaucoup plus élevée (de l'ordre de 15%) et celle des porcs LR, surtout destinés à la viande fraîche, très faible (moins de 2%). Lorsqu'on a lié les deux, le taux de charcuterie LR a fortement diminué puis les élevages LR se sont développés, sans toutefois que les produits de charcuterie qui en sont issus ne retrouvent leur part de marché initiale (Dourmad *et al.*, 2018). Parmi les produits de charcuteries-salaisons LR produits en 2016, le saucisson occupe la première place (44%) suivi du jambon cuit (28%), le jambon sec représentant 9% des volumes (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a).

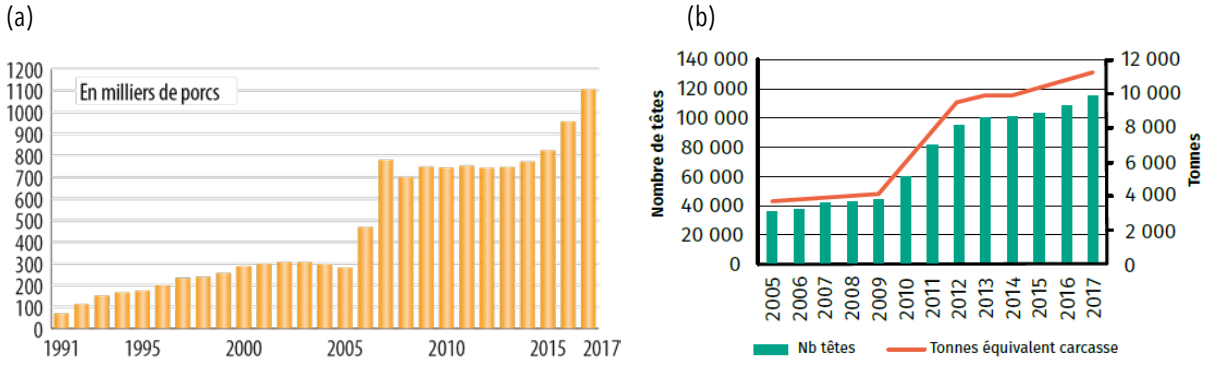


Figure 2.4.2. Evolution de la production de porcs sous Label Rouge (a) (IFIP (2018b) ou en production biologique (b) (FNAB (2018))

La **production porcine biologique** représente 0,7% de la production nationale en 2018 (soit 157 520 porcs charcutiers) (IFIP, 2019). Des taux de production porcine biologique proches ou légèrement supérieurs sont observés aux Pays-Bas (0,6%, soit environ 90 000 porcs), en Allemagne (0,7%, soit 200 000 porcs) et au Danemark (près de 0,9% soit 168 000 porcs). Ces trois pays avec la France constituent les principaux producteurs de porc biologique en Europe (Roinsart et Alibert, 2018). Au niveau national, la production porcine biologique est en forte progression depuis 3 à 4 ans et présente une perspective de croissance élevée soutenue par une augmentation importante du nombre d'élevages en conversion, afin de mieux répondre à l'augmentation croissante de la demande des consommateurs (Figure 2.4.2.). Les dernières données disponibles confirment cette dynamique avec une augmentation de 33% de la consommation de viande porcine bio et 18% pour les charcuteries salaisons entre 2017 et 2018 en France (Agence bio, 2019)[21]. Après une production d'environ 40 000 porcs/an jusqu'en 2009, la production s'est fortement accrue pour atteindre environ 100 000 porcs en 2013, puis s'est stabilisée jusqu'à cette nouvelle phase de développement (FNAB, 2018). Le principal bassin de production se situe dans le Grand-Ouest, la Bretagne et les Pays de la Loire regroupant 40% du cheptel. On observe une importante diversité dans la structure des élevages de porcs bio, avec 72% des élevages qui commercialisent moins de 100 porcs/an alors que 80% des porcs sont produits dans des élevages fournissant plus de 300 porcs/an. En 2017, quatre grandes filières organisées écoulent 80% de la production française de porcs bio, et réunissent les plus gros élevages. Les viandes et produits bio sont commercialisés à 44% en GMS, 28% en magasins spécialisés et 13% par des artisans alors que la vente directe représente 7% des volumes et concerne surtout la viande fraîche, la restauration hors foyer absorbant 7% de la production (FNAB, 2018). La production porcine biologique française est insuffisante pour répondre à la demande. Les importations (10%) proviennent d'Espagne, d'Allemagne ou du Danemark pour couvrir les besoins des GMS, magasins spécialisés et transformateurs en particulier en jambon bio. La consommation de charcuterie bio occupe en effet une place croissante en France, le jambon cuit représentant 45% des volumes de viande de porc bio consommés en France en 2015 alors que la viande fraîche progresse mais de façon plus modérée (Fnab, 2016)[22]. Cependant, le manque d'offre en porcs charcutiers bio concerne toute l'Europe, ce qui freine le développement global de l'offre de produits porcins bio pour les consommateurs.

[21] Agence Bio, 2019. *Dossier de presse : les chiffres 2018 du secteur Bio*. Agence française pour le développement et la promotion de l'agriculture biologique. 21 p. https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2019/06/DP-AGENCE_BIO-4JUIN2019.pdf [accédé le 23 Juillet 2019]
[22] Fnab, 2016. *Produire Bio. La FilièrePorcs Bio*. https://www.produire-bio.fr/filiere-porcs-bio/ [Accédé le 31 janvier 2020]

La production de porcs biologiques est régie par la **réglementation européenne** qui définit les objectifs et principes généraux ainsi que les règles de la production, de l'étiquetage et de contrôle des produits biologiques (Règlements CE n°834/2007 (2007) et CE n°889/2008 (2008b)). Cette réglementation est en cours d'évolution avec la publication des règlements (UE) 2018/848 (2018a) et 2018/1584 (2018b) remplaçant et abrogeant les règlements précédents et applicables à partir de Janvier 2021. Les grands principes de la production biologique reposent sur des pratiques environnementales optimales, le respect de la biodiversité, la préservation des ressources naturelles et la recherche d'un niveau élevé de bien-être animal (INAO, 2019)[23]. Ainsi, pour permettre aux animaux d'exprimer leurs comportements et favoriser leur bien-être, les surfaces disponibles en élevage sont supérieures à celles rencontrées en élevage conventionnel, les animaux ont accès à un parcours végétalisé ou une aire d'exercice extérieure pouvant être couverte (au total $\geq$2,3 m²/porc jusqu'à 110 kg) et doivent disposer de litière (couchage) ; actuellement, la moitié des truies bio sont conduites en plein air (mise bas et lactation), alors que 99% des porcs charcutiers bio sont élevés en bâtiment (courette ouverte). L'alimentation est biologique (possibilité d'incorporer jusqu'à 5% de matières premières non bio jusque fin 2020), sans OGM et sans incorporation possible d'acides aminés de synthèse, ce qui constitue une contrainte forte sur les ressources protéiques et l'équilibre nutritionnel des rations avec des conséquences possibles sur les caractéristiques des produits. Des fourrages grossiers, frais, secs ou ensilés doivent être ajoutés à la ration journalière des porcs (Prunier et Lebret, 2009). Les races de porcs doivent être adaptées aux conditions d'élevage (rusticité) ; la castration des porcs mâles est autorisée jusqu'à 7 jours, avec analgésie et/ou anesthésie (les deux à partir de 2022), alors que l'immunocastration, ainsi que l'épointage des dents et la caudectomie sont interdits. La gestion de la santé est basée sur la prévention et la limitation stricte des traitements allopathiques, et le lien au sol est favorisé (aliments produits sur l'exploitation d'origine régionale ; épandage des effluents sur des terres bio). L'évolution de la réglementation applicable en 2021 renforce l'objectif d'un système global de gestion agricole et de production alimentaire qui permet de répondre à la demande de produits biologiques émanant des consommateurs, tout en fournissant des biens accessibles au public qui contribuent à la protection de l'environnement et du bien-être animal ainsi qu'au développement rural. Ainsi l'utilisation de substances et procédés naturels pour la production des produits biologiques ainsi que les circuits courts de distribution et les productions locales seront favorisés.

Les modes de production incluant une **origine géographique de la production** concernent les races locales, parmi lesquelles les trois plus importantes en termes d'effectifs : Basque, Gascon et Nustrale ont obtenu une **AOC/AOP** pour leurs produits, respectivement Kintoa (viande fraîche et jambon sec ; 2016 (AOP jambon en cours), Noir de Bigorre (viande fraîche et jambon sec ; 2015) et Corse (jambon sec, lonzo et coppa ; 2012). Ces AOC valorisent différents critères de différenciation sur lesquels ont été élaborées les spécifications de leurs cahiers des charges, portant notamment sur : la race utilisée (race pure dans ces trois cas), une délimitation géographique pour l'origine et l'élevage des animaux, l'engraissement en plein-air à partir de 5 (Kintoa) ou 6 (Noir de Bigorre) mois d'âge minimum (densité maximale Kintoa : 35 porcs/ha de prairie et 25 porcs/ha de forêt ; Noir de Bigorre : 20 porcs/ha de prairie), une alimentation incluant de l'herbe, des châtaignes et/ou des glands avec apport d'un aliment composé (non transgénique, élaboré à partir d'une liste de matières premières autorisées et contenant minimum 60% (Kintoa) ou 70% (Noir de Bigorre) de céréales et distribué à hauteur maximale de 2,7 kg/j (à partir de 8 mois, Kintoa) à 3 kg/j (Noir de Bigorre). Les porcs Nustrale pour l'AOC/AOP Corse sont produits en système agro-pastoral proche des systèmes traditionnels méditerranéens rencontrés en Espagne (porc Ibérique Bellota), au Portugal (Alentejo), en Sicile (Nero Siciliano), Sardaigne (Sarda)… (Lebret, 2008). Ils sont élevés sur parcours ($\leq$ 5 porcs/ha) à partir de minimum 2 mois d'âge où ils reçoivent un aliment croissance-engraissement (1 à 2 kg/j), peuvent être déplacés en estive (plateaux de montagne ; alimentation à base des ressources fourragères disponibles *et al*iment complémentaire jusqu'à 1 kg/j) ; la phase de finition (minimum 45 jours) a lieu entre octobre et mars, sur parcours sous chênes et/ou châtaigniers ($\leq$ 8 porcs/ha) dont les fruits constituent l'alimentation exclusive pendant au moins 30 jours avec apport possible d'orge ensuite ($\leq$ 4 kg/j et $\leq$ 30% de l'alimentation en châtaignes et/ou glands durant la période de finition). Dans ces trois filières de production AOC où les animaux présentent une croissance lente relativement aux génotypes et au mode d'élevage conventionnels, l'âge et le poids à l'abattage sont élevés (minimum 12 mois d'âge et 85 kg (Corse) ou 100 kg carcasse (Kintoa, Noir de Bigorre). Des spécifications concernent la qualité des carcasses (épaisseur minimale de gras et/ou de muscle), du gras de bardière (proportion minimale d'acide oléique) et de la viande (couleur, gamme de valeurs de pH autorisée, teneur en lipides intramusculaires (Kintoa : $\geq$ 6% dans l'échine ; Noir de Bigorre : $\geq$ 2,5% dans le long dorsal). Les procédés d'élaboration des produits aux différentes étapes et jusqu'à leur conditionnement ainsi que la description précise des produits finis incluant leurs caractéristiques physico-chimiques sont également décrits. L'accent est mis sur la valorisation de procédés traditionnels de fabrication, en particulier un affinage long des jambons secs (minimum 12 mois pour le Corse, 16 mois pour le Kintoa, 20

[23] INAO, 2019. Les signes de qualité et d'origine. https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Agriculture-Biologique [Consulté le 19 juillet 2019]

mois pour le Noir de Bigorre…). Ces produits sous AOC/AOP correspondent à un marché de niche avec à la fois, une consommation locale en partie liée au tourisme, des magasins dans des grands centres urbains et des ventes en ligne et pour certains, à l'export (Japon notamment).

Les volumes produits dans les filières AOC/AOP porcines françaises sont très faibles relativement à l'ensemble de la production (0,03% des porcs abattus en 2016 ; INAO, 2017[24]) et occupent également une place mineure au sein des produits de porc sous SIQO (environ 3%), toutefois ces filières, ainsi que les effectifs d'animaux produits dans les différentes races locales, sont globalement dans une dynamique de croissance, dans le contexte général d'augmentation de la consommation des viandes et produits de porc sous SIQO.

A côté de l'AOC/AOP, **l'Indication géographique protégée** valorise également un lien au territoire, qui est toutefois plus ténu puisqu'il ne concerne que la production ou la transformation d'un produit. Cette contrainte moins forte laissant plus de flexibilité pour développer des filières de qualité, les IGP sont donc plus nombreuses et leur volume de production logiquement plus élevé que celui des produits AOC. L'IGP peut être associée à un LR, les produits associant les 2 signes représentant plus de la moitié du volume de viandes porcines sous IGP en 2016 ; à l'inverse, les charcuteries-salaisons sous IGP incluent peu fréquemment le LR (9% des IGP) (INAO, 2017)[25].

Au sein des charcuteries-salaisons IGP, le jambon sec, ainsi que les rôtis et saucissons cuits ou fumés prédominent, représentant respectivement 42% et 40% des volumes (INAO, 2017)[26]. A titre d'exemple, l'IGP Jambon de Bayonne, enregistrée en 1998 au niveau européen et dont le cahier des charges vient d'être révisé (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a), constitue l'une des plus importantes filières IGP de charcuteries- salaisons françaises avec 1,3 millions de jambons produits par an soit 20% des volumes de jambon secs produits en France (Consortium du Jambon de Bayonne, 2018)[27]. Toutes les étapes de la production du jambon, depuis la mise au sel, jusqu'à l'affinage et au conditionnement, sont réalisées dans une zone géographique d'étendue limitée (bassin de l'Adour, soit le département des Pyrénées-Atlantiques et quelques cantons limitrophes), tandis que la zone de production des animaux couvre un grand quart Sud-Ouest de la France (22 départements de Nouvelle Aquitaine et Occitanie) (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a). L'IGP Jambon de Bayonne concerne ainsi 950 élevages ; il s'agit d'exploitations de type porcs/céréales (maïs principalement) dans une logique d'exploitation céréales -> porcs -> fertilisation des cultures, qui produisent 1,6 millions de porcs/an (soit près de 7% de la production nationale). Une trentaine d'entreprises de salaisons transforment ces produits dans la zone IGP.

Sans présenter une situation exhaustive sur les viandes et charcuteries - salaisons produites en Europe sous signe d'origine géographique, il semble important d'apporter quelques informations sur la situation en Espagne, en raison de la grande confusion généralement observée sur les jambons d'origine espagnole, associée à leur notoriété. L'Espagne compte cinq AOP de jambons secs parmi lesquelles une porte sur des « porcs blancs » croisés Duroc (Jamón de Teruel) et quatre sur des porcs de race pure Ibérique ou croisés 75% Ibérique et 25% Duroc (Dehesa de Extremadura, Guijuelo, Jabugo, Los Pedroches) : l'utilisation d'animaux croisés permet d'améliorer nettement les performances donc de réduire les coûts de production au niveau de l'élevage des animaux. A l'AOP peut s'ajouter la dénomination espagnole « ibérique », établie par un décret (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2014) : les porcs de race pure sont dénommés « 100% ibérique » alors que le terme « ibérique » est autorisé pour les animaux croisés, le pourcentage de race ibérique devant figurer sur l'étiquetage des produits (hors AOP, jusqu'à 50% de croisement Duroc est autorisé). En outre, plusieurs systèmes d'élevage en finition sont possibles : i) aux glands (« De Bellota ») : alimentation exclusive à base de glands et ressources pâturées en phase de finition entre octobre et mars (durée ≥ 60 jours, gain de poids ≥ 46 kg, abattage ≥ 14 mois) ; les dénominations « Dehesa » ou « montanera » sont réservées exclusivement à ce type de produits; ii) engraissement en plein air (« de cebo de campo ») : animaux élevés en plein air et recevant un aliment concentré à base de céréales et légumineuses en finition (durée ≥ 60 j, surface ≥ 100 m²/porc au-delà de 110 kg, abattage ≥ 12 mois) ; ou iii) engraissement (« de cebo») : animaux

[24] INAO, 2017. *Chiffres clés 2016. Viandes et charcuteries sous le signe de la qualité et de l'origine*. INAO, Fil Rouge, Sylaporc. https://www.inao.gouv.fr/content/download/2315/22415/version/1/file/Publication-Viandes-Charcuteries-2016-INAO-FILRouge.pdf [Consulté le 16 décembre 2018]

[25] INAO, 2017. *Chiffres clés 2016. Viandes et charcuteries sous le signe de la qualité et de l'origine*. INAO, Fil Rouge, Sylaporc. https://www.inao.gouv.fr/content/download/2315/22415/version/1/file/Publication-Viandes-Charcuteries-2016-INAO-FILRouge.pdf [Consulté le 16 décembre 2018]

[26] INAO, 2017. *Chiffres clés 2016. Viandes et charcuteries sous le signe de la qualité et de l'origine*. INAO, Fil Rouge, Sylaporc. https://www.inao.gouv.fr/content/download/2315/22415/version/1/file/Publication-Viandes-Charcuteries-2016-INAO-FILRouge.pdf [Consulté le 16 décembre 2018]

[27] *Consortium du Jambon de Bayonne* (2018). http://www.jambon-de-bayonne.com/la-filiere [Consulté le 18 décembre 2018]

élevés en système intensif et recevant un aliment concentré à base de céréales et légumineuses (surface ≥ 2 m²/porc au-delà de 110 kg, abattage ≥ 10 mois) (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2014). Un code couleur des produits a été établi pour distinguer les animaux et systèmes d'élevage dont ils sont issus : noir = belotta 100% Ibérique, seul cas de figure pour lequel la dénomination « Pata negra » est autorisée, rouge : belotta ibérique, vert : cebo de campo ibérique, blanc : cebo ibérique). En résumé, la situation est complexe pour les consommateurs qui associent probablement « ibérique » à l'animal de race pure alimenté exclusivement aux glands, alors que ce type de produits ne représente que 9% de la production de jambons ibériques (AOP et non AOP) en 2017, contre 60% pour les jambons cebo (Ministerio de Agricultura, 2018).

Hormis la dénomination ibérique, une autre confusion souvent observée porte sur la dénomination de jambon Serrano, dont le nom signifiant « montagne » en espagnol peut être associé dans l'esprit des consommateurs à cette origine géographique. Il s'agit en fait d'une spécialité traditionnelle garantie (**STG**, signe européen) attestant d'une recette traditionnelle pour l'élaboration du produit, celle-ci pouvant être délocalisée en dehors du pays ou de la région de provenance. La ressemblance visuelle du logo STG avec ceux des IGP et des AOP ajoute vraisemblablement à cette confusion. En raison des contraintes nettement moindres tant sur la production des animaux que des produits des jambons Serrano, les volumes de production sont logiquement très nettement supérieurs à ceux des jambons AOP : 18,9 millions de pièces de jambons STG Serrano ont été commercialisés en 2017 (dont 87% sur le marché espagnol et 11% en UE), contre 210 000 jambons AOP ibériques (commercialisés à 89% sur le marché espagnol) (Ministerio de Agricultura, 2018).

2.4.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des carcasses et viandes fraîches depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets

On traitera dans ce chapitre des carcasses (commercialisées en l'état ou en pièces : jambon, longe, épaule, poitrines par les abatteurs aux boucheries) et de la « viande fraîche » qui correspond aux morceaux de viande incluant éventuellement du tissu adipeux adjacent (ex. côtelettes), consommés après une phase de maturation de quelques jours suivant la découpe des carcasses, sans autre transformation que la cuisson. Vu l'ampleur de la littérature scientifique internationale disponible sur le sujet (plusieurs milliers de références sur les quinze dernières années), ce chapitre est basé essentiellement sur des synthèses et méta-analyses publiées dans le domaine, complétées de résultats issus d'articles scientifiques primaires pour illustrer des points précis.

2.4.2.1. Propriétés commerciales

La valeur commerciale des carcasses qui constitue la base du paiement des producteurs par les abattoirs est déterminée à partir de deux indicateurs, le poids de carcasse chaude et la teneur en muscle des pièces (TMP) ou plus simplement des épaisseurs de muscle et de gras (filières pour lesquelles des équations de prédiction de la TMP à partir de mesures linéaires ne sont pas applicables ; *cf.* chapitre 1). Une décote est appliquée en France pour les porcs mâles entiers présentant des défauts d'odeur (décote plus faible mais systématique pour les mâles entiers dans d'autres pays européens). Hormis l'évaluation d'indicateurs de caractéristiques technologiques dans certains abattoirs (pH, déstructuration ; *cf.* chapitre 1) pour effectuer un tri des pièces destinées aux transformateurs ou pour qualifier les carcasses au sein de cahiers des charges spécifiques, la qualité intrinsèque de la viande (caractéristiques technologiques, sensorielles ou nutritionnelles) n'est pas déterminée et donc pas rémunérée aux producteurs. La valeur commerciale des carcasses et viandes fraîches, au niveau des abattoirs et donc des producteurs, dépend par conséquent directement du poids vif à l'abattage et de la composition corporelle (rapport maigre/gras) (revue de Lebret et Faure (2015)).

Le poids de carcasse chaude résulte du poids vif de l'animal à l'abattage, déterminé par la vitesse de croissance et l'âge au stade d'abattage, et du rendement en carcasse, qui varie inversement avec le poids des abats blancs et rouges relativement au poids vif. Le rendement en carcasse se situe autour de 80% chez le porc, soit nettement plus élevé que dans d'autres espèces animales notamment les ruminants, en raison du poids relatif plus faible des abats blancs chez les monogastriques.

Le poids de carcasse à un âge donné et la composition corporelle sont déterminés par le **type génétique** et les **conditions d'élevage** des porcs. La sélection génétique sur la vitesse de croissance et contre l'adiposité (épaisseur de lard dorsal) pratiquée depuis les années 60 dans les principales races utilisées en croisements en production conventionnelle a été très efficace pour augmenter la **croissance** des animaux et la **teneur en maigre** des carcasses (+12 points depuis 1970 ; revue de Bidanel *et al*. (2018)). La variabilité de composition corporelle et notamment d'épaisseur de lard dorsal entre types génétiques s'est réduite suite à cette sélection, mais persiste encore aujourd'hui (revues de Ciobanu *et al*. (2011) et Schwob *et al*. (2020). Ces génotypes répondent aux attentes des éleveurs, des abatteurs et du marché très majoritaire des viandes « standard » en termes de composition des carcasses (teneur en muscle) ainsi que de performances de croissance et

d'efficacité alimentaire. Toutefois, malgré la prise en compte de caractères de qualité de viande dans les critères de sélection génétique, plusieurs études ont mis en évidence une altération des propriétés technologiques (réduction de la capacité de rétention d'eau et du rendement technologique suite à un métabolisme musculaire plus glycolytique) et sensorielles (aspect : viande plus claire et plus exsudative) avec les progrès génétiques réalisés sur les performances zootechniques (vitesse de croissance, efficacité alimentaire, TMP) (revues de Rosenvold et Andersen (2003), Lebret (2004) et Warner et Dunshea (2017)). En dépit de l'effet délétère de l'allèle n au locus halothane sur la qualité technologique et sensorielle de la viande, son influence favorable sur le rendement de carcasse et la teneur en muscle (revues de Sellier (1998) et Rosenvold et Andersen (2003)) explique qu'une grande proportion des porcs charcutiers produits en France soient porteurs de c*et* allèle (génotype Nn). A l'opposé, les races locales non sélectionnées pour leurs performances zootechniques présentent une très forte adiposité et sont valorisées dans des systèmes de production spécifiques, associées à un âge à l'abattage élevé (revue de Bonneau et Lebret (2010)). La valeur commerciale de ces carcasses est logiquement totalement différente de la production conventionnelle. De façon générale, les races ou croisements les plus gras présentent un **rendement en carcasse** supérieur aux génotypes maigres (Ciobanu *et al.*, 2011).

Parmi les facteurs intrinsèques à l'animal déterminant la valeur commerciale des carcasses, le **type sexuel** joue un rôle important. Les mâles entiers sont plus maigres que les femelles, les mâles castrés présentant l'adiposité la plus élevée, donc une moindre valeur commerciale (méta-analyse de Pauly *et al*. (2012) et revue de Lebret *et al*. (2015b)). Par ailleurs, le coût de production des mâles entiers est inférieur à celui des mâles castrés ou des femelles en raison d'une meilleure efficacité alimentaire et rétention protéique (de Roest *et al.*, 2009; Prunier et Bonneau, 2006). Toutefois, les carcasses de porcs mâles entiers peuvent être moins bien rémunérées en raison du risque d'odeurs indésirables de leur viande (revue de Parois *et al*. (2018)). Les porcs immunocastrés, solution alternative à l'arrêt de la castration chirurgicale des porcelets mâles présentent une adiposité intermédiaire entre celle des mâles entiers et des mâles castrés chirurgicalement (méta-analyse de Batorek *et al*. (2012). Le rendement en carcasse est plus élevé chez les mâles castrés que les mâles entiers en raison du poids du tractus génital, et intermédiaire chez les immunocastrés (Batorek *et al.*, 2012; Prunier et Bonneau, 2006). Quel que soit le type sexuel, l'augmentation du poids et de l'âge à l'abattage des porcs est associée à une augmentation de l'adiposité des carcasses (revue de Lebret et Mourot (1998) et Latorre *et al*. (2008)) entraînant une moindre valeur commerciale (hormis des systèmes de paiement de filières spécifiques). L'augmentation du poids d'abattage est également associée à une augmentation modérée du rendement en carcasse (Latorre *et al.*, 2008).

L'**alimentation** constitue un autre puissant levier pour moduler la composition corporelle. Chez le porc en croissance, une restriction alimentaire (réduction des apports relativement aux besoins) réduit l'adiposité corporelle, le dépôt de lipides étant plus sensible aux apports en énergie que le dépôt de protéines, et par conséquent améliore la TMP et la valeur commerciale des carcasses (revue de Lebret (2008). Une limitation des apports alimentaires en phase de finition est souvent pratiquée en élevage pour optimiser la composition corporelle (TMP) à l'abattage. Outre la quantité, la nature des apports alimentaires en particulier le rapport entre la teneur en protéines (ou lysine, l'acide aminé le plus limitant pour la croissance chez le porc) et en énergie du régime détermine la composition du gain de poids (dépôts relatifs de tissus maigres et de tissus gras) et consécutivement la composition des carcasses. Ainsi, un régime déficitaire en protéines apporté à volonté pendant la période de croissance-finition accroît l'adiposité corporelle et déprécie la qualité des carcasses, alors qu'une limitation progressive des apports en lysine relativement à l'énergie (alimentation de précision) permet de contrôler l'adiposité (Lebret, 2008). En **production porcine biologique**, l'interdiction d'incorporer des acides aminés (AA) de synthèse dans l'alimentation implique que le besoin en AA essentiels pour la croissance des porcs soit couvert par des ressources protéiques biologiques, or celles-ci sont souvent produites en quantité insuffisante sur l'exploitation mais également peu disponibles sur le marché, et leur composition n'est pas toujours bien adaptée aux besoins nutritionnels. En conséquence, la croissance des animaux notamment le dépôt des tissus maigres peut être réduit faute d'apports adéquats en AA (notamment lysine, thréonine, méthionine, tryptophane), induisant une moindre teneur en maigre et possiblement une détérioration de la qualité commerciale des carcasses (revue de Prunier et Lebret (2009)).

L'environnement de l'animal en élevage influence également la composition corporelle. La température ambiante est un facteur important, en particulier dans les systèmes alternatifs ou de plein air, où elle peut impacter l'adiposité des carcasses donc leur valeur commerciale. Une réduction de la température ambiante en élevage accroît les besoins en énergie, d'autant plus que l'on s'écarte de la zone de confort thermique (entre 20 et 25°C environ pour le porc en croissance, jusqu'à 28°C chez les porcelets en post-sevrage) et s'apparente à une restriction alimentaire si ces besoins énergétiques supplémentaires ne sont pas couverts. Chez des porcs alimentés à volonté, le froid (12°C) relativement au chaud (28°C) ne modifie pas la quantité mais la répartition des tissus gras en favorisant les dépôts sous-cutanés aux dépens des dépôts internes, entraînant donc une réduction de la TMP. A l'opposé, l'exposition au chaud (≥ 30°C) réduit le niveau d'ingestion spontanée et consécutivement

l'adiposité corporelle (Lebret *et al.*, 2015b). L'élevage sur paille, incluant une plus grande surface disponible par animal ainsi qu'une température ambiante réduite, conduit souvent à des carcasses plus grasses par rapport au logement sur caillebotis si les animaux sont alimentés à volonté (revue de Millet *et al*. (2005)). L'impact de modes d'élevage alternatifs (dont la production biologique) avec courette extérieure ou sur parcours sur l'adiposité dépend des effets interactifs des conditions climatiques (moyenne et variations de température) et du niveau d'activité physique des porcs en regard des apports alimentaires: une moindre adiposité est souvent observée en conditions froides, alors qu'en conditions plus clémentes l'adiposité est équivalente voire accrue par rapport à l'élevage conventionnel (Lebret, 2004 ; Prunier et Lebret, 2009; Rosenvold et Andersen, 2003). **En conclusion, si le type génétique et la conduite alimentaire constituent les principaux leviers pour moduler la composition corporelle et déterminer la valeur commerciale des carcasses chez le porc, celles-ci peuvent être modulées par les conditions d'élevage notamment la température ambiante, variable selon le mode de logement ou la région de production considérés.** Ainsi des conditions d'élevage fluctuantes (température, activité physique, niveau de couverture des besoins alimentaires…) inhérentes aux modes de production alternatifs engendrent une plus grande **variabilité** des performances zootechniques et de la valeur commerciale des carcasses.

2.4.2.2.Propriétés sanitaires

Dangers microbiologiques d'importance pour la filière

Les produits alimentaires issus de la filière porcine sont au même titre que les autres filières confrontées à de nombreux dangers microbiologiques. Plus de 25 dangers biologiques peuvent être transmis du porc aux consommateurs (Fosse *et al.*, 2008). Parmi les dangers bactériens, *Yersinia enterocolitica*, *Salmonella enterica*, *Campylobacter spp.* et *Listeria monocytogenes* sont caractérisés par les niveaux de risque les plus élevés (Fosse *et al.*, 2008). Parmi les dangers parasitaires, *Trichinella* spp. (Anses, 2017b) et *Toxoplasma gondii* (Pires *et al.*, 2017) sont les plus importants pour la filière (Fosse *et al.*, 2008). Concernant les virus, le virus de l'hépatite E est associé à des niveaux de risque élevé (*cf.* chapitre 3). Ce risque est essentiellement associé aux produits alimentaires contenant du foie de porc et consommés crus ou insuffisamment cuits (Pavio *et al.*, 2014).

Facteurs de risque aux niveaux des élevages

Les facteurs de risque relatifs à la présence des dangers bactériens au niveau des élevages porcins sont largement documentés (Fosse *et al.*, 2009). La biosécurité des élevages (défaut des procédures de nettoyage et désinfection des bâtiments d'élevage, introduction des dangers par le biais des éleveurs ou des équipements), l'alimentation (alimentation humide versus l'alimentation sèche), les pratiques de conduite d'élevage (présence d'autres espèces animales sur l'exploitation, conditions de transport des animaux), sont des éléments essentiels au contrôle de la prévalence de portage des porcs par *Campylobacter*, *Y. enterocolitica* et *Salmonella* et *L. monocytogenes (Fosse, 2008)*.

Pour les dangers parasitaires, l'accès des porcs à un parcours extérieur est un facteur de risque important concernant la présence de *Trichinella* (Anses, 2017b) et *Toxoplasma (van der Giessen et al., 2007 ; Wallander et al., 2016)*.

Le virus de l'hépatite E est très répandu parmi la population porcine domestique en Europe (Feurer *et al.*, 2018). Au sein d'un pays, la séroprévalence des porcs pour le virus de l'hépatite E dépend des zones géographiques (Salines *et al.*, 2018 ; Wilhelm *et al.*, 2016). Les fortes séroprévalences sont généralement associées à des mélanges d'animaux en post-sevrage et à des conditions d'hygiène défavorables. L'abattage précoce d'une partie des animaux, la lignée génétique des reproducteurs femelles, un déficit de mesures de biosécurité et l'utilisation d'une eau issue d'un captage superficiel à proximité de l'élevage pour l'abreuvement des animaux sont d'autres facteurs de risque identifiés (Walachowski *et al.*, 2014).

Importance des procédés de transformation

Importance de l'abattage

La maitrise de l'hygiène des procédures abattage est un élément essentiel de la maitrise de l'ensemble des dangers biologiques (voir Caractéristiques technologiques). La réglementation du paquet hygiène définit les obligations des professionnels (application des bonnes pratiques d'hygiène, HACCP, traçabilité des produits) et des services de contrôle (inspection des animaux et des carcasses). La contamination croisée à l'abattoir est possible, mais le statut sanitaire des animaux à la ferme, les conditions de transport et d'attente avant l'abattage restent des facteurs essentiels. Pour certains dangers, l'importance particulière de certaines étapes du procédé d'abattage ou de certaines pratiques a pu être identifiée. Concernant *Salmonella,* l'application d'un double-flambage d'un traitement aux acides organiques (à ce jour, le traitement chimique des carcasses à l'abattoir n'est pas autorisé) ou d'un lavage après l'éviscération est des pistes pour améliorer la

maitrise du niveau des risques (Anses, 2018c). Pour Yersinia, les facteurs de risque de contamination de la carcasse sont la présence de la tête sur la carcasse et l'incision des amygdales des porcs (Van Damme *et al.*, 2015).

Transformation des produits

L'application des bonnes pratiques d'hygiène et de l'HACCP est un élément essentiel de la maitrise des flores microbiennes (Augustin et Minvielle, 2008). Le profil temps-température des produits conditionne les niveaux des flores bactériennes pathogènes (*Salmonella*, *Yersinia* spp., *L. monocytogenes*) et d'altération (*Pseudomonas*, flores lactiques) (Efsa Panel Biol Hazards BIOHAZ, 2016; Efsa Panel on Biological Hazards, 2014).

Importance des pratiques des consommateurs

Les coupes de porc sont habituellement bien cuites, mais il y a un risque de contamination croisée relatif à *Salmonella* pendant la découpe et la manipulation de la viande par les consommateurs (Swart *et al.*, 2016). Il est à noter que l'absence de cuisson pour des produits contenant du foie de porc cru est une pratique à risque pour le virus de l'hépatite E (Pavio *et al.*, 2014).

2.4.2.3.Propriétés organoleptiques

Les caractéristiques sensorielles des viandes porcines : aspect (couleur, …), texture (tendreté, jutosité) et flaveur résultent d'interactions complexes entre le type génétique, le mode de production des animaux, les conditions de pré-abattage (transport) et d'abattage, de refroidissement des carcasses ainsi que de maturation et de préparation (cuisson) des viandes (revues de Cannon *et al*. (1995), Lebret *et al*. (1999), Lebret *et al*. (2015b), Rosenvold et Andersen (2003) et Warner et Dunshea (2017)). L'effet d'un facteur sur les caractéristiques sensorielles doit donc être modulé au regard des effets des autres sources de variation ; toutefois pour plus de clarté nous allons passer en revue l'influence respective de ces différents facteurs sur l'élaboration des propriétés organoleptiques des viandes porcines.

Le **type génétique** des animaux est un des déterminants majeurs des caractéristiques sensorielles, à travers son influence sur la détermination des propriétés tissulaires (*cf.* chapitre 1). Il existe chez le porc des **gènes à effet majeur sur la qualité**, le plus connu étant le **gène Halothane**, dont l'allèle récessif n est responsable du syndrome du stress thermique. Les effets de ce gène sont associés depuis les années 60 au développement de viandes pâles, molles (à l'état cru) et exsudatives ou **PSE** (pale soft, exsudative), défaut majeur de qualité technologique (voir chapitre 1 et volet caractéristiques technologiques ci-après) (Briskey, 1964). Avant l'identification de la mutation causale dans le gène **RYR1** (isoforme 1 du récepteur à la ryanodine ; Fuji *et al*. (1991) et le développement de tests moléculaires, la présence de l'allèle à l'état homozygote (nn) était détectée par l'évaluation de la sensibilité des porcs à l'halothane (gaz anesthésiant). Outre les propriétés technologiques, l'allèle n au locus RYR1 induit une altération des caractéristiques sensorielles : viande plus claire et plus dure après cuisson (revues de Sellier (1998) et Ciobanu *et al*. (2011)). Bien que l'allèle n défavorable soit récessif, les animaux hétérozygotes (Nn) présentent une altération de la qualité sensorielle de la viande (couleur plus claire, viande plus dure) par rapport aux animaux non porteurs (NN), la qualité de viande des animaux homozygotes nn étant nettement plus impactée (Larzul *et al.*, 1996 ; Sellier, 1998). Malgré les effets négatifs du génotype Nn sur les propriétés technologiques (voir ci-après) et sensorielles des viandes, son influence positive sur les caractéristiques commerciales (teneur en maigre des carcasses) reste prioritaire pour les éleveurs et abatteurs notamment en France, où la proportion de porcs charcutiers de ce génotype reste élevée.

Un autre gène à effet majeur sur la qualité de la viande de porc est le **gène RN** pour Rendement Napole, un indicateur du rendement de fabrication du jambon cuit (Ciobanu *et al.*, 2011; Sellier, 1998). Le gène RN code pour une sous-unité régulatrice d'une protéine kinase activée par l'AMP (PRKAG3), un régulateur majeur de l'homéostasie énergétique tissulaire (Milan *et al.*, 2000). L'allèle défavorable RN^- dominant et présent essentiellement dans la race Hamphsire, est responsable d'une très forte augmentation de la teneur en glycogène musculaire, conduisant à un pH ultime bas (viande acide) et à une altération des propriétés technologiques de la viande (*cf.* chapitre 1 et volet caractéristiques technologiques ci-après), mais aussi des propriétés sensorielles (réduction de la tendreté et de la flaveur) pour des dégustateurs (jury entraîné) français (Le Roy *et al.*, 2000), alors qu'une augmentation de l'intensité du goût, de l'odeur et de l'acidité a été observée par des dégustateurs (non entraînés) suédois (Lundstrom *et al.*, 1996). En raison de son fort impact sur le rendement de fabrication des produits cuits et malgré son effet favorable sur la teneur en muscle des carcasses (Sellier, 1998), l'allèle RN^- est éradiqué des populations porcines françaises et de la plupart des populations Hamphsire depuis plusieurs années (Ciobanu *et al.*, 2011).

En dehors des gènes à effet majeur, les caractéristiques sensorielles de la viande de porc varient fortement selon la race ou le croisement. Parmi les types génétiques sélectionnés pour leurs performances de production, la viande de porcs de race pure

ou croisés **Duroc** présente généralement une teneur en lipides intramusculaires (LIM) supérieure à celle des races conventionnelles (Gispert *et al.*, 2007 ; Plastow *et al.*, 2005 ; Schwob *et al.*, 2020; Trefan *et al.*, 2013) et généralement, mais pas systématiquement, une meilleure tendreté, jutosité et/ou flaveur de la viande (revues de Ngapo et Gariépy (2008), Bonneau et Lebret (2010) et Warner et Dunshea (2017)). Pour cette raison, des filières revendiquant une qualité sensorielle supérieure de la viande ou des produits transformés utilisent souvent des porcs Duroc en race pure ou en croisement. Cependant, il existe une forte variabilité de teneur en LIM et de qualité sensorielle de la viande entre lignées au sein de la race Duroc, qu'il est important de considérer en fonction des objectifs qualitatifs visés. En dehors de l'effet défavorable de l'allèle RN^-, la viande de porcs de race Hamphsire est souvent considérée, en particulier par les dégustateurs du nord de l'Europe, comme plus juteuse et plus tendre relativement à d'autres races (Landrace, Large White), probablement en raison d'une teneur en LIM plus élevée et malgré un pH ultime inférieur (Bonneau et Lebret, 2010 ; Warner et Dunshea, 2017). Ainsi la viande de porcs Hampshire est appréciée en Suède, où cette race est beaucoup utilisée comme lignée mâle, alors qu'elle est aujourd'hui très peu présente en France ou d'autres pays européens.

A côté de ces génotypes « performants » en termes de production de viande, la viande issue de porcs de **races locales** présente des caractéristiques sensorielles particulièrement élevées : couleur rouge plus soutenue, moindre exsudation, tendreté et jutosité supérieures (Labroue *et al.*, 2000 ; Lebret *et al.*, 2015a ; Lebret *et al.*, 2019b; Pugliese et Sirtori, 2012). Outre les facteurs génétiques, l'âge et le poids supérieurs à l'abattage associés aux conditions d'élevage spécifiques (élevage extensif, accès à des ressources alimentaires locales, dans certains cas conduite alimentaire favorisant une phase de croissance compensatrice en finition, *cf.* ci-dessous) agissent en synergie pour déterminer la composition biochimique (dont la teneur en LIM), les caractéristiques métaboliques et la microstructure du muscle et in fine les propriétés gustatives des viandes (Edwards, 2005 ; Lebret *et al.*, 2015b; Sellier, 1998). Ces races sont valorisées dans des filières spécifiques sur des marchés de niche, pour la production de viande ou de produits transformés dont en particulier le jambon sec.

Concernant l'influence du **type sexuel** des porcs sur les propriétés sensorielles de la viande, certaines études montrent une tendreté supérieure (ou une moindre force de cisaillement) de la viande de porcs mâles, castrés comparés à celle des femelles, et de la viande de femelles relativement à celle des mâles entiers (revue de Lebret *et al*. (1999) et Pauly *et al*. (2012)) et qui peut s'expliquer, en partie, par les différences de teneur en LIM entre types sexuels (méta-analyses de Pauly *et al*. (2012) et Trefan *et al*. (2013)). Toutefois ces différences sensorielles ne sont pas systématiquement rapportées (Ngapo et Gariepy, 2008 ; Trefan *et al.*, 2013). Le principal effet du type sexuel sur les propriétés sensorielles reste celui des **odeurs indésirables de certaines viandes de porc mâle entier (appelées aussi odeurs sexuelles)**, qui peuvent être perçues pendant la cuisson des viandes voire altérer la flaveur lors de la dégustation. Les molécules responsables de ce défaut sont principalement l'**androsténone** (stéroïde testiculaire exerçant un rôle de phéromone et dont une fraction est stockée dans le gras, donnant une odeur d'urine aux produits), et le **scatol** (métabolite du tryptophane produit par les bactéries du colon chez tous les types sexuels, mais dont une fraction non métabolisée par le foie chez les mâles entiers s'accumule dans les tissu gras donnant une odeur fécale à la viande) ; l'**indole**, qui est également un produit de dégradation du tryptophane, peut aussi contribuer à ce défaut (chapitre 1 ; Bonneau (1998) ; Prunier et Bonneau, (2006) ; Lundström *et al*. (2009)). Ces trois molécules sont lipophiles et donc présentes essentiellement dans les tissus gras. Le niveau d'androsténone dépend essentiellement de l'âge, du poids et du génotype de l'animal, la sélection génétique constituant le principal lever d'action pour le réduire. Concernant le scatol, les principaux leviers d'action concernent la conduite d'élevage : propreté des cases, afin de limiter l'absorption de scatol par la peau lorsque l'animal est en contact avec des fèces, gestion de l'environnement microclimatique (limiter l'exposition aux températures élevées pour limiter la volatilisation du scatol et sa réabsorption pulmonaire), ainsi que la conduite alimentaire : l'incorporation de fibres fermentescibles en fin d'engraissement contribue à limiter la production de scatol par les bactéries du colon (Parois *et al.*, 2018 ; Warner et Dunshea, 2017). **La perception des odeurs indésirables** par les consommateurs **dépend d'un grand nombre de facteurs liés à l'animal** (génétique, alimentation, élevage), **ainsi qu'au type de produit** (notamment sa teneur en gras), **au mode de préparation** (méthodes ou ingrédients ajoutés pouvant masquer ces odeurs, l'un des plus efficaces étant la fumée) **et de consommation** (chaud ou froid, la cuisson rendant perceptibles l'androsténone et le scatol, surtout par olfaction plutôt que lorsque le produit est en bouche (flaveur) (Parois *et al.*, 2018). Ainsi, une évaluation sensorielle par un jury entrainé de huit produits différents issus de porcs mâles entiers (côtelettes, bacon, longe, filet, saucisson sec fermenté, jambon cuit, jambon sec et viande hachée) montre une influence plus prononcée de l'odeur de verrat dans les produits de viande servis chauds par rapport aux produits de viande servis froids (Wauters *et al.*, 2017). Les **transformateurs** s'appuient déjà sur ces différences entre produits pour **valoriser au mieux les viandes odorantes** en les diluant à un faible pourcentage dans des mêlées de produits de charcuterie consommés froids (ex. pâté, saucisson), en utilisant des ingrédients masquant très puissants (arômes, épices), ou en les valorisant en produits fumés ou secs consommés froids (IFIP, 2015). **Un autre facteur de variation important est le consommateur lui-même** : alors que l'odeur de scatol est perçue par la grande majorité des consommateurs, une proportion importante d'entre eux est

anosmique (ne peut percevoir l'odeur) à l'androsténone (Font-i-Furnols, 2012). Le caractère hédonique (agréable ou désagréable) de l'odeur varie aussi selon les consommateurs, une minorité ressentant l'odeur d'androsténone comme agréable (Parois *et al.*, 2018). En conséquence, pour **optimiser la valorisation des viandes de porcs mâles entiers** (consommation en frais ou transformation), la détermination des seuils de perception des odeurs par les consommateurs est cruciale. Or l'androsténone et le scatol sont perçus favorablement aux faibles concentrations puis défavorablement à des teneurs supérieures, le point d'inflexion variant selon les consommateurs, surtout pour l'androsténone en raison des consommateurs anosmiques. Il n'existe donc pas de seuil absolu de teneurs en scatol ou en androsténone en deçà duquel il n'y aurait aucun risque d'odeur désagréables et au-delà duquel le risque serait de 100% (Parois *et al.*, 2018). Cependant, les données de la littérature permettent d'établir que l'acceptabilité des produits frais chute fortement au-delà de 0,20 à 0,25 µg de scatol par gramme de tissu frais (Lundstrom *et al.*, 2009). Pour l'androsténone, la littérature évoque des concentrations entre 0,5 et 2,0 µg/g de tissu frais comme valeurs de référence. En outre, les deux molécules semblent interagir dans le développement des odeurs (Parois *et al.*, 2018). La situation est complexe, toutefois la prise en compte des différents cas de figure (teneurs respectives des composés, produits, …) peut être envisagée par une approche de modélisation (Aluwe *et al.*, 2018), avec en préalable la mise en œuvre d'une **méthode instrumentale de détection des odeurs sur la chaîne d'abattage**. Actuellement, seule la détection par le nez humain (détection de l'odeur de chaque carcasse de porc mâle entier après chauffage du gras dorsal) est opérationnelle au niveau des chaînes d'abattage et utilisée à grande échelle en France et plusieurs autres pays européens. Son inconvénient majeur est lié à la fiabilité des opérateurs ; en outre sa pertinence n'est pas démontrée car ses résultats n'ont jamais été comparés avec l'acceptabilité des produits par les consommateurs (Parois *et al.*, 2018). La mise au point de méthodes instrumentales rapides et fiables pour détecter les carcasses malodorantes sur la ligne d'abattage fait actuellement l'objet de nombreux travaux. Un brevet vient ainsi d'être déposé par des danois (Lund *et al.*, 2018) sur une méthode permettant de quantifier les concentrations en androsténone, scatol et indole du gras dorsal par spectroscopie de masse (MS/MS) après chauffage puis ionisation et vaporisation des molécules par diode laser (méthodologie LDTD). L'association de ces méthodologies permet d'analyser environ 350 échantillons par heure (Borggaard *et al.*, 2017). Elle est actuellement testée au Danemark mais aussi en France par Uniporc Ouest et l'IFIP et les premiers résultats sont très prometteurs (Chevillon et Escriva, 2019). Ces auteurs soulignent que des moyens financiers et techniques très importants, essentiellement pour la préparation de l'échantillon et la réalisation des analyses (robotisation) seront nécessaires pour mettre en place cette méthode sur les chaînes d'abattage. Cependant cela constituerait un progrès majeur attendu par la filière, afin d'orienter chaque carcasse vers une utilisation adaptée en fonction des concentrations en molécules odorantes, des procédés de transformation mis en œuvre et du marché (Parois *et al.*, 2018).

L'âge et le poids des animaux à l'abattage ainsi que la conduite alimentaire associée peuvent influencer les propriétés sensorielles des viandes issues de génotypes conventionnels (voir ci-dessus pour les races locales). Une augmentation concomitante de l'âge et du poids (porcs 'lourds') augmente l'adiposité des carcasses et l'expression de caractéristiques musculaires favorables aux propriétés sensorielles (dépôt de LIM notamment), toutefois dans des proportions parfois limitées et qui n'induisent pas systématiquement d'amélioration sensorielle perceptible (Lebret *et al.*, 1999 ; Trefan *et al.*, 2013). Dans leur revue, Ngapo et Gariépy (2008) rapportent des résultats contradictoires concernant l'augmentation du poids et de l'âge d'abattage sur la qualité sensorielle : pas d'influence, amélioration de la jutosité, amélioration ou réduction de la tendreté ont été rapportés ; cette variabilité des résultats peut s'expliquer par des différences de poids à l'abattage entre études, mais aussi de la durée de maturation ou du mode de cuisson des viandes. Toutefois, l'effet est généralement d'ampleur modérée. Pour un **poids à l'abattage donné**, une **augmentation de l'âge** des animaux peut induire des effets contrastés sur les caractéristiques sensorielles, en raison des pratiques d'élevage, notamment les **stratégies alimentaires** mises en œuvre et leurs conséquences sur la dynamique de la croissance. Ces deux facteurs sont donc traités ici conjointement. Un **plafonnement des apports alimentaires** en phase de finition, souvent pratiqué pour optimiser la TMP des carcasses, induit aussi une réduction de la teneur LIM avec des conséquences plutôt défavorables pour la tendreté et la jutosité de la viande (Lebret, 2008). Malgré l'objectif de qualité sensorielle supérieure du **Label Rouge** (LR), une restriction (plafonnement) alimentaire peut être rencontrée en production LR en afin de réduire la vitesse de croissance des animaux en finition et respecter l'âge minimal requis à l'abattage – puisque ces productions ne disposent pas de types génétiques dédiés, à croissance plus lente, que ceux utilisés en production conventionnelle. En conséquence, l'optimum de teneur en LIM et donc de tendreté et de jutosité de la viande n'est pas forcément atteint. Une solution consiste à limiter plus fortement et progressivement les apports protéiques (lysine) par rapport à l'énergie dans la ration alimentaire, ce qui permet d'augmenter spécifiquement la teneur en LIM sans modifier l'adiposité de la carcasse (Lebret, 2008). L'expression d'une phase de croissance compensatrice en finition (réalimentation à volonté suite à une restriction) pour améliorer la tendreté de la viande est assez courante en production bovine (Lebret *et al.*, 2015b). En production porcine conventionnelle, cette pratique a peu d'intérêt puisque l'on cherche à réduire l'âge à l'abattage et l'adiposité corporelle pour optimiser le coût de production et la

valeur commerciale des carcasses, même s'il a été montré qu'elle permet d'améliorer la tendreté de la viande suite à un turn-over accru des protéines musculaires (Bonneau et Lebret, 2010). La croissance compensatrice est pratiquée dans certains systèmes de productions de races locales pour permettre le dépôt élevé de LIM contribuant à l'élaboration des propriétés sensorielles élevées des viandes. Cette stratégie a aussi été envisagée avec des génotypes conventionnels pour augmenter simultanément l'accrétion des LIM favorables à la tendreté et la jutosité de la viande, et l'âge à l'abattage (cahier des charges LR), toutefois les périodes de restriction et de réalimentation doivent encore être optimisées pour atteindre ce double objectif (Lebret, 2008). Ainsi, **un âge minimal à l'abattage ne garantit pas une amélioration des propriétés sensorielles des viandes porcines, la réponse dépendant de la dynamique de croissance et de son effet sur la composition des tissus constitutifs de l'animal**.

La **localisation anatomique** du muscle/ de la pièce constitue un autre facteur de variation interne à l'animal de la qualité sensorielle de la viande. La longe et certains muscles du jambon sont des muscles dits « blancs » ou glycolytiques alors que les muscles de la partie antérieure du corps sont plutôt « rouges » (métabolisme énergétique plus oxydatif, teneur en glycogène inférieure aux muscles blancs, engendrant un pH ultime moins bas et généralement moins de pertes en eau, taille des fibres musculaires généralement inférieure) et présentent souvent, mais pas systématiquement, plus de gras intra et intermusculaire (voir chapitre 1, et revues de Lebret *et al*. (1999), Lefaucheur (2010) et Listrat *et al*. (2015)). Ainsi, **l'aspect de la viande** : couleur, exsudation, importance et répartition du gras… **diffère fortement selon la localisation anatomique**. Les teneurs en phospholipides et en certains acides aminés libres et dipeptides, supérieures dans les muscles rouges, contribuent à engendrer des différences de **flaveur** entre muscles (Ngapo et Gariepy, 2008). L'impact strict de la localisation anatomique sur la tendreté, la jutosité ou la flaveur n'est généralement pas aisé à évaluer en raison de nombreux facteurs confondants, y compris des modes de préparation et de cuisson souvent différents selon l'origine anatomique des pièces. Toutefois, en comparant différents morceaux (muscles) de porcs rôtis, Channon *et al*. (2016) montrent que le taux d'insatisfaction des consommateurs est plus faible pour le *Triceps brachii* (épaule) que le *Longissimus* (longe) et surtout le *Biceps femoris* (jambon) ; ces auteurs soulignent l'effet marqué de l'origine anatomique de la viande relativement à la durée de maturation (2 ou 7 jours), la méthode (rôti vs. grillé) ou la température de cuisson (70° vs. 75°°C).

L'influence de la **nature de l'alimentation** sur les propriétés sensorielles des viandes porcines résulte en premier lieu de **l'équilibre nutritionnel** de la ration. Ainsi, une amélioration de la tendreté de la viande peut être obtenue par la distribution en fin d'engraissement d'un régime déficitaire en protéines mais non limitant en énergie, qui accroit l'accrétion lipidique surtout au niveau intramusculaire (Lebret, 2008 ; Wood *et al.*, 2008). Ce cas de figure peut se rencontrer en **production biologique** où les apports en AA peuvent être insuffisants relativement aux besoins nutritionnels (Prunier et Lebret, 2009).

La **nature des lipides alimentaires**, qui constitue une des principales voies de modulation des propriétés nutritionnelles de la viande, peut impacter aussi les propriétés sensorielles : la distribution de rations riches en acides gras polyinsaturés (**AGPI**), sensibles à l'oxydation, peut entraîner des **défauts d'odeur et de flaveur** dus à l'**oxydation** de ces lipides, dans les tissus adipeux mais aussi les viandes. L'importance et la vitesse de l'oxydation lipidique dépendent de nombreux facteurs dont la composition en acides gras (**AG**) insaturés, la teneur en fer, le pH de la viande et sa teneur en antioxydants (Falowo *et al.*, 2014). L'incorporation d'**antioxydants** comme la vitamine E dans les rations alimentaires permet de limiter l'oxydation des lipides mais aussi des protéines, dans les tissus gras et la viande de porc au cours de leur conservation (revues de Rosenvold et Andersen (2003), O'Grady et Kerry (2009) et Falowo *et al*. (2014) ; méta-analyse de Trefan *et al*. (2011)) pendant sa conservation : un effet favorable (moindre brunissement) est parfois rapporté mais est moins fréquemment observé chez le porc (O'Grady et Kerry, 2009 ; Warner et Dunshea, 2017) contrairement au bovin et à l'ovin (Rosenvold et Andersen, 2003) où la couleur plus rouge de la viande présente plus de risque de décoloration pendant la conservation. Comme chez le bovin ou les volailles, de nombreuses études ont été conduites pour évaluer l'incorporation de végétaux (herbes, fruits, feuilles), d'extraits végétaux (par exemple les catéchines du thé) ou épices, aux propriétés antioxydantes, sur la réduction de l'oxydation des lipides des protéines et l'altération de la flaveur ou de la couleur de la viande de porc (revues de Falowo *et al*. (2014) ; Jiang et Xiong (2016) ; Tomovic *et al*. (2017)) ; (voir 2.4.2.4 « Caractéristiques nutritionnelles »). Leur activité antioxydante est souvent due à des **composés phénoliques** (acides, diterpènes, flavonoïdes et huiles volatiles), qui inhibent la formation ou limitent la diffusion des radicaux libres. Des **minéraux** (sélénium, zinc) et vitamines (A : carotène, C : acide ascorbique et E : tocophérol) qui agissent comme cofacteurs d'enzymes antioxydantes, sont aussi considérés comme des **antioxydants naturels** (revue de Tomović *et al*. (2017)). Des résultats récents montrent qu'une supplémentation alimentaire en **méthionine** (acide aminé précurseur de la cystéine constitutive du glutathion, un antioxydant cellulaire majeur) pendant deux semaines avant l'abattage diminue le risque d'oxydation des lipides et améliore la couleur de la viande au cours de sa conservation (viande plus rouge et moins claire), en association avec une augmentation des concentrations en glutathion dans le tissu musculaire à l'abattage (Lebret *et al.*, 2018a).

Le **type d'habitat** des animaux peut influencer les propriétés sensorielles des viandes, via les effets conjoints de l'activité physique et de la température ambiante, parfois associés à l'alimentation, sur les caractéristiques métaboliques et la composition des tissus musculaires. Ainsi, l'élevage sur courette extérieure ou parcours peut produire des **viandes plus rouges**, toutefois cet effet n'est pas systématique (Lebret *et al.*, 2015b). Concernant la texture et le goût des produits, l'élevage sur **paille** est associé à une **flaveur supérieure du bacon** (Maw *et al.*, 2001) et l'élevage sur litière avec courette extérieure améliore la **jutosité** de la viande comparativement à l'élevage sur caillebotis (Lebret *et al.*, 2011), toutefois d'autres études ne rapportent **pas d'effet significatif** du type d'habitat (litière, accès extérieur, …) sur la qualité sensorielle (revues de Millet *et al*. (2005), Lebret (2008) et Ngapo et Gariépy (2008)). Chez des porcs de génotype conventionnel (= sélectionnés pour la croissance et l'efficacité alimentaire), **l'élevage en plein air a des effets contrastés sur les propriétés sensorielles, selon les conditions climatiques et la conduite alimentaire appliquée** : une amélioration, comme une dégradation de la tendreté de la viande liée à un pH ultime inférieur (voir chapitre 1) ont ainsi été rapportées (Lebret *et al.*, 2015b). Ainsi, le mode d'élevage peut avoir des conséquences variées sur la qualité sensorielle des produits du porc, en fonction de la variabilité des facteurs environnementaux (type d'habitat, conditions climatiques…) et des pratiques d'élevage mises en œuvre (conduite alimentaire : niveau et nature des apports, et bien sûr type génétique et type sexuel).

Comparé au mode de production conventionnel, plusieurs facteurs peuvent ainsi intervenir en **production biologique** pour influencer les caractéristiques sensorielles de la viande. Concernant la conduite alimentaire, l'interdiction d'utiliser des AA de synthèse peut rendre difficile l'équilibre nutritionnel de la ration. Un régime déficitaire en AA essentiel mais distribué à volonté (Sundrum *et al.*, 2000) ou l'apport d'un régime déséquilibré en AA limitants pour la croissance (Sundrum *et al.*, 2011) conduisent à une diminution de la teneur en maigre des carcasses et une augmentation de la teneur en LIM avec des conséquences potentiellement favorables sur les propriétés sensorielles. Toutefois, cette augmentation des LIM s'accompagne aussi d'une augmentation de la variabilité de paramètre avec des valeurs pouvant aller jusqu'à 4% (Sundrum *et al.*, 2000), or une teneur de cet ordre peut être défavorable pour l'acceptabilité de la viande en raison de la présence de gras visible (Fernandez *et al*. (1999) ; voir chapitre 1). A l'inverse, la nécessité d'incorporer du fourrage à la ration des porcs biologiques peut conduire à apporter l'aliment « concentré » en quantité limitée (restriction) et à distribuer le fourrage à volonté. Cette stratégie alimentaire est favorable d'un point de vue éthique en permettant de réduire l'impact négatif de la restriction alimentaire sur le bien-être des animaux. Cependant, d'un point de vue nutritionnel, la restriction alimentaire avec apport de fourrage à volonté limite souvent les apports en énergie et protéines, induisant une réduction de la vitesse de croissance des animaux et une modification des dépôts corporels et tissulaires, notamment une réduction des LIM. Hansen *et al*. (2006) rapportent ainsi une réduction de la tendreté de la viande de porcs élevés en système biologique et recevant un aliment concentré en quantité limitée (70% du niveau à volonté) avec complément de fourrage, vs. des porcs élevés en système biologique et recevant le même aliment concentré à volonté, ou vs. des porcs élevés en système conventionnel alimentés à volonté. Une autre étude a montré une réduction de la jutosité (évaluée par un jury entraîné) de la viande de porcs bio élevés en extérieur, associée un pH ultime inférieur et des pertes en eau accrues, comparée à de la viande de porcs élevés en système conventionnel, toutefois sans impact sur les préférences des consommateurs lors d'un test en aveugle (Jonsall *et al.*, 2002). Plus récemment, Álvarez-Rodríguez *et al*. (2016) ont comparé les caractéristiques de la viande (longe) de porcs élevés en production biologique selon la réglementation européenne actuellement en vigueur (CE n°834/2007 (2007) et CE n°889/2008 (2008b) ; *cf.* 2.4.1.2) : élevage en bâtiment sur litière et accès à une courette extérieure, 2,2 m²/porc ; alimentation biologique (15,3% de protéines totales, 3,9% de matières grasses), apport de fourrages grossiers) et conventionnelle (élevage sur caillebottis 0,7 m²/porc, aliment conventionnel (18,5% de protéines totales, 4,7% de matières grasses). Ils rapportent un pH ultime inférieur mais des pertes en eau équivalentes, une couleur moins rouge et une teneur supérieure en LIM de la viande de porc bio relativement à la viande conventionnelle. L'ensemble de ces résultats, assez disparates, montre comme illustré par Oksjberg *et al*. (2005), que ce ne sont pas directement les règles de la production biologique qui déterminent les caractéristiques sensorielles des viandes, mais les **pratiques d'élevage** : **conduite alimentaire** (Sundrum *et al.*, 2011; Sundrum *et al.*, 2000) associée à **d'autres paramètres** tels que les conditions de **logement** (température ambiante, surface disponible par animal) et bien sûr le **génotype** des animaux, qui déterminent les propriétés tissulaires et consécutivement les composantes sensorielles, qui peuvent ainsi être améliorées ou altérées. Ces **différents facteurs, choisis ou subis**, **engendrent une grande variabilité des propriétés sensorielles au sein des productions porcines biologiques** (Prunier et Lebret, 2009).

Dans les **systèmes de production extensifs** également, de nombreux facteurs liés à l'animal, son environnement et sa conduite interagissent pour déterminer les propriétés musculaires et les qualités ultérieures des viandes. Ainsi, l'élevage de porcs de races locales en conditions extensives et selon une conduite alimentaire mixte (ressources naturelles complétées par un aliment conventionnel) ou spécifique (par exemple, finition exclusive aux glands pour le porc Ibérique de type Bellota), associés à un âge et un poids d'abattage élevés, permettent **l'expression de leur potentiel génétique favorable à la**

qualité sensorielle (tendreté, jutosité, flaveur) : dépôt élevé de LIM favorisé par une croissance compensatrice en finition en particulier dans le système Corse ou certains systèmes Ibériques, composition spécifique en AG, couleur rouge de la viande (revues de Lebret (2008), Pugliese et Sirtori (2012) et Lebret *et al*. (2019b)). Il a été montré que des différences de qualité sensorielle entre la viande de porcs de race locale Basque ou Large White (viande de porcs basque plus rouge, plus tendre et moins exsudative) observées lorsque ces deux races sont élevées en bâtiment ou sur litière et courette, peuvent être exacerbées par le mode d'élevage extensif des porcs basques : couleur rouge plus intense et exsudation plus réduite (Lebret *et al.*, 2015a), illustrant ainsi les **interactions entre facteurs génétiques et d'élevage dans la détermination des caractéristiques sensorielles des viandes et produits de porc** (voir partie Produits transformés : le jambon sec).

Les **conditions de pré-abattage** (manipulation des animaux, transport, attente en abattoir) et **d'abattage** (conditions d'anesthésie, préparation et refroidissement des carcasses) ont des **effets majeurs sur les propriétés technologiques mais aussi sensorielles des viandes porcines** (revues de Monin (2003), Rosenvold et Andersen (2003), Terlouw (2005) et Warner et Dunshea (2017)). En effet, les stress de toute nature qui surviennent aux cours de ces étapes peuvent modifier le métabolisme musculaire et la cinétique des transformations physiques et biochimiques du muscle en viande, et en conséquence impacter fortement les propriétés technologiques (vitesse et amplitude de chute du pH, capacité de rétention d'eau), mais aussi les caractéristiques sensorielles de la viande : couleur, quantité d'exsudat et texture (tendreté, jutosité) (Monin, 2003), même si l'impact sur les paramètres de texture n'est pas systématique (Ngapo et Gariepy, 2008). Comme pour d'autres dimensions qualitatives, l'influence des conditions de pré-abattage et d'abattage sur les propriétés sensorielles varie selon d'autres facteurs, dont en particulier le type génétique (Rosenvold et Andersen, 2003). Globalement, les effets des conditions de pré-abattage et d'abattage sur les propriétés sensorielles de la viande étant très fortement associés, voire résultant de ceux observés sur les propriétés technologiques de la viande, ils seront traités conjointement ci-après dans les caractéristiques technologiques.

L'influence de la **durée de maturation des viandes** sur les propriétés sensorielles de la viande de porc est bien établie (Ngapo et Gariepy, 2008 ; Warner et Dunshea, 2017). Une maturation pendant 6 à 10 jours contre à 1 à 2 jours améliore la tendreté suite à la dégradation (protéolyse) progressive de la structure myofibrillaire, ainsi que la flaveur de la viande en raison de la libération de peptides et d'acides aminés qui interviendront dans le développement de composés odorants lors de la cuisson (Wood *et al.*, 1996). Il semble aussi que les flaveurs anormales soient réduites après 6 à 10 jours contre 1 j de maturation. Selon Wood *et al*. (1996), l'allongement de la durée de maturation jusqu'à 10 jours aurait plus d'effet sur l'amélioration de la tendreté, que le type génétique (Duroc comparé au Large White). Il est important de relever que l'effet favorable d'un allongement de la maturation de 2 à 7 jours est perceptible par un jury d'experts, mais aussi par des consommateurs (Channon *et al.*, 2003).

Parmi les nouvelles technologies visant à améliorer la qualité sanitaire, mais aussi la tendreté des viandes (hautes pressions, ultrasons, ..), les hautes pressions présentent l'effet améliorateur le plus important. Toutefois, cet effet est nettement moindre chez le porc comparé au bovin ou à l'ovin probablement en raison de la moindre dureté initiale de la viande de porc (revue de Warner et Dunshea (2017)).

La **congélation** est le mode de conservation de la viande de porc le plus répandu. Elle constitue un levier économique important pour les acteurs de la filière car elle permet la régulation des flux de matière, ainsi que le commerce de la viande sur de longues distances. La congélation ayant pour objectif de préserver au maximum les caractéristiques initiales des viandes, la maîtrise des phases de congélation (refroidissement initial, cristallisation de l'eau puis de refroidissement jusqu'à la température de conservation), stockage à l'état congelé et décongélation sont essentielles pour préserver les propriétés des produits (IFIP, 2014). Une congélation rapide (1 à 10 cm/h) permet de limiter la dénaturation des protéines et les pertes d'exsudat lors de la décongélation ; elle est difficile à obtenir au cœur des grosses pièces même en conditions industrielles, mais peut être atteinte pour les petites pièces (côtes de porc). La vitesse de décongélation influence également l'exsudation et ne doit pas être trop rapide surtout si la congélation a été lente (IFIP, 2014).

La **couleur** de la viande congelée dépend de la vitesse de congélation, une congélation rapide induisant une augmentation de la clarté (plutôt défavorable), ce qui peut avoir de l'importance si le produit est acheté congelé par le consommateur. Après décongélation, la couleur de la viande sera moins stable que celle d'une viande fraîche en raison d'une augmentation de sensibilité de la myoglobine à l'oxydation. Concernant la **texture** de la viande, la tendreté serait améliorée suite à la congélation, possiblement en raison d'une moindre cohésion de la viande qui serait plus facile à mâcher (Ngapo et Gariepy, 2008). L'effet sur la jutosité est moins net, sauf en cas d'exsudation de décongélation excessive où la jutosité est réduite (IFIP, 2014). Les processus de congélation et décongélation ont peu d'impact sur la flaveur s'ils sont menés dans de bonnes conditions, par contre la **durée de stockage** influence la **flaveur** : une durée courte réduit l'intensité de flaveur,

probablement suite à la dégradation ou la perte de précurseurs (sucres résiduels, peptides) dans l'exsudat. Une congélation longue favorise le développement d'odeur de rance en raison de l'oxydation des lipides, favorisée par la libération de substances pro-oxydantes (fer héminique) suite à l'altération des membranes cellulaires lors de la congélation (IFIP, 2014). La durée de conservation à l'état congelé dépend donc des nombreuses caractéristiques tissulaires qui influencent la peroxydation lipidique (teneur et nature des lipides, équilibre teneur en pro-oxydants/antioxydants… voir ci-dessus) et type d'emballage (sous-vide ou non…) (voir Caractéristiques d'usage).

Les **conditions de cuisson** de la viande de porc influencent fortement ses caractéristiques sensorielles, alors qu'elles sont très variables et par essence **impossibles à contrôler** puisque c'est la **seule étape**, outre la durée et les conditions de conservation, qui dépend du **consommateur**. Pour informer les consommateurs d'une altération des propriétés sensorielles en raison d'une cuisson généralement trop longue de la viande de porc, une campagne de communication avec un message simple a ainsi été lancée récemment en Australie (Warner et Dunshea, 2017). Techniquement, la température en surface et son profil d'évolution dans la viande ainsi que la méthode de transfert de chaleur diffèrent selon les méthodes de cuisson ; ces paramètres interagissent avec les propriétés de la viande crue pour déterminer les propriétés sensorielles (Ngapo et Gariepy, 2008). D'après ces auteurs, la **jutosité** est la **composante sensorielle qui dépend le plus des conditions de cuisson** ; elle diminue avec l'élévation de température interne de 60 à 80°C, quelle que soit la méthode (rôti/grillé/frit), voire même entre 70 et 75°C (Warner et Dunshea, 2017), cet effet étant cependant plus marqué sur la longe que sur les muscles du jambon. Globalement, l'augmentation de la température interne de 65 à 75-80°C réduit la **tendreté** de la viande, effet dont l'amplitude varie selon les méthodes de cuisson et le muscle considérés (Channon *et al.*, 2016; Wood *et al.*, 1995). A l'inverse, l'augmentation de la température interne de la viande réduit les flaveurs désagréables et accroit l'intensité de flaveur de porc de différents morceaux rôtis, grillés ou poêlés (Ngapo et Gariepy, 2008). La **cuisson longue à basse température** (plusieurs heures ou dizaines d'heures à une température d'environ 60°C, généralement sous-vide) gagne en popularité dans les restaurants et cuisines collectives, car elle permet d'améliorer la tendreté de la viande (qui dépend de la combinaison température x durée de cuisson), l'apparence (couleur moins altérée) et l'homogénéité de la qualité d'une portion (revue de Dominguez-Hernandez *et al*. (2018)). Cette méthode réduit aussi les pertes en eau à la cuisson, paramètre économique important pour les industriels. Cependant, l'augmentation de la durée de cuisson peut altérer la jutosité. Un autre paramètre essentiel est la qualité sanitaire des produits : si la cuisson longue à basse température est efficace pour inactiver les bactéries mésophiles, des travaux complémentaires sont nécessaires pour éviter des risques éventuels en présence de pathogènes plus thermorésistants (Dominguez-Hernandez *et al.*, 2018).

L'influence de l'élévation de température sur la jutosité et la tendreté de la viande dépend de phénomènes physiques, alors que l'effet sur la **flaveur** résulte de **réactions biochimiques complexes**, notamment des réactions de Maillard entre acides aminés et glucides (dont l'intensité augmente avec la température), d'oxydation des lipides, et d'interactions entre les produits issus de ces réactions qui forment des composés aromatiques (Aaslyng et Meinert, 2017; Gandemer, 1999 ; Ngapo et Gariepy, 2008). Lors de la cuisson, les facteurs les plus importants dans la détermination de la flaveur sont la température de surface et la méthode de transfert de chaleur : ainsi, des viandes grillées (240-250°C) présentent une flaveur plus importante que des viandes poêlées (155°C), la cuisson au four engendrant une moindre intensité de flaveur (Aaslyng et Meinert, 2017; Ngapo et Gariepy, 2008). La cuisson lente à basse température réduisant l'intensité de flaveur de la viande en comparaison à une cuisson à température plus élevée, un passage de quelques secondes à haute température (130-150°C) juste avant la dégustation est souvent pratiquée pour développer la flaveur (Dominguez-Hernandez *et al.*, 2018). Pour résumer, la flaveur de la viande s'accroît avec la température de cuisson, toutefois, ceci engendre une diminution de la jutosité et de la tendreté : optimiser les propriétés sensorielles de la viande consiste à trouver un équilibre entre la flaveur, la tendreté et la jutosité, trois composantes importantes dans l'appréciation des produits par les consommateurs (Aaslyng et Meinert, 2017). Par ailleurs, la méthode de cuisson associée à la composition du morceau (notamment sa teneur en gras) peut fortement influencer le développement des **odeurs indésirables des viandes de porc mâle** entier : du fait de leur poids moléculaire, l'androsténone et le scatol sont peu volatils et ne sont perçus qu'à une température de chauffage élevée, et leur concentration sera d'autant plus élevée que le produit contient une grande quantité de gras (Parois *et al.*, 2018). De plus, comme décrit ci-dessus, dont la perception de ces odeurs dépend aussi du **consommateur** lui-même.

2.4.2.4. Propriétés nutritionnelles

Nous considérons ici comme propriétés nutritionnelles la capacité des viandes porcines à satisfaire les besoins nutritionnels de l'homme, c'est-à-dire les transferts nutritionnels positifs associés à leur consommation : apports en protéines, lipides, vitamines (en particulier en vitamine B1 en concentration très élevée chez le porc, Lawrie et Ledward (2006)) et minéraux. Les transferts nutritionnels négatifs associés : polluants organiques, résidus médicamenteux ou composés néoformés des produits de charcuterie…) étant traités par ailleurs (volets Caractéristiques sanitaires et Produits transformés de porc). Les

propriétés nutritionnelles de la viande ainsi définies sont déterminées essentiellement par sa teneur en protéines et sa composition en lipides et micronutriments (vitamines, minéraux). Les teneurs et compositions des lipides ainsi que de certaines vitamines (Vit E) et minéraux (sélénium par exemple) dépendent de nombreux facteurs liés à l'animal ou son élevage, en particulier la conduite alimentaire, alors que la teneur en protéines (18 à 22% du poids de muscle frais) et sa composition en acides aminés, équilibrée par rapport aux besoins de l'homme (Tome, 2008), sont relativement stables (Lebret et Picard, 2015; Mourot, 2009).

Chez le porc, la teneur en LIM varie entre 1 et 10% du poids de muscle selon les muscles considérés. Ces lipides sont constitués de triglycérides (lipides de réserve, 0,5 à plus de 5% du poids du muscle), de phospholipides (lipides de structure, entre 0,5% et 1%) et de cholestérol (0,05 à 0,1%) (revues de Listrat *et al*. (2015) et Lebret et Picard (2015)). Si la teneur en phospholipides varie assez peu et dépend surtout du type métabolique du muscle (teneur supérieure dans les muscles rouges), la teneur en triglycérides est très variable selon différents facteurs intrinsèques (muscle, type génétique, type sexuel) ou extrinsèques à l'animal (conduite alimentaire, mode d'élevage) (Lebret, 2008 ; Wood *et al.*, 2008). Les lipides sont constitués essentiellement d'AG qui se répartissent en trois classes : acides gras saturés (AGS), monoinsaturés (AGMI) et polyinsaturés (AGPI), au sein desquels on distingue deux catégories : les AGPI n-6 ou oméga 6 et les AGPI n-3 ou oméga 3 (voir chapitre 1), dont les proportions relatives varient également fortement selon le muscle, l'animal ou ses conditions de production, en particulier son alimentation (Lebret et Picard, 2015; Wood *et al.*, 2008). Dans la viande, des teneurs réduites en AGS et un accroissement des teneurs en AGPI n-3 (notamment l'acide linolénique ALA) sont recherchées afin de mieux répondre aux recommandations nutritionnelles (Anses, 2011a).

Les valeurs de LIM rapportées ci-dessus montrent que la **viande de porc est maigre** lorsque le gras visible est écarté : 3 à 4% de lipides dans le rôti cuit, environ 15% pour une côte grillée. En revanche, la **teneur en gras des produits transformés est très variable** : moins de 4% dans le jambon cuit supérieur, 12% dans le jambon de Bayonne, 20% dans les chipolatas crues, environ 30% pour le saucisson sec et 35 à 40% pour les rillettes (Ciqual, 2017)[28]. En termes de composition en AG, **les AGMI sont majoritaires dans les muscles et tissus adipeux du porc** où ils représentent entre 42 et 50% des AG, voire jusqu'à 60% chez certaines races locales à forte adiposité (Lebret *et al.*, 2019b); l'acide oléique C18:1 est le principal AG tissulaire (plus de 40% des AG). Les AGS constituent la seconde classe d'AG chez le porc, avec 35 à 42% des AG tissulaires. La proportion d'AGPI est plus faible et très variable (5 à 18%) selon de nombreux facteurs liés à l'animal (race, type sexuel) ou son élevage (alimentation, en particulier). Parmi les AGPI, la proportion d'AG n-3 est généralement nettement inférieure à celle des AGPI n-6 (0,8 à 1,5% contre 5 à 18% des AG totaux), conduisant à un rapport n-6/n-3 d'environ 15, et un rapport des précurseurs acide linoléique (LA, C18:2 n-6) / acide linolénique (ALA, C18:3 n-3) compris entre 15 et 30 dans la viande de porc « standard » (Mourot, 2010).

L'influence du **type génétique** sur la teneur et la composition en lipides des viandes porcines dépend directement du niveau d'adiposité des animaux (potentiel de synthèse et de dépôt de lipides dans les tissus) : en conditions d'élevage similaires, des génotypes gras produiront des viandes contenant une plus forte proportion de lipides saturés ou monoinsaturés résultant d'une synthèse endogène élevée, comparativement à des génotypes maigres (Lebret *et al.*, 2015b; Wood *et al.*, 2008). En effet, le porc ne synthétisant pas d'AGPI, ceux-ci, d'origine strictement alimentaire, sont plus ou moins « dilués » au sein des lipides tissulaires. Ainsi, **tout facteur génétique ou d'élevage modulant l'adiposité influencera donc directement le profil en AG des différents dépôts adipeux** chez le porc (Nurnberg *et al.*, 1998). De cette façon, le **type sexuel** influence l'adiposité et consécutivement la teneur et la composition en lipides des viandes et tissus adipeux : les mâles entiers, plus maigres, présentent des gras plus insaturés que les mâles castrés, les femelles étant intermédiaires (revues de Lebret et Mourot (1998) et Wood *et al*. (2008)). L'adiposité des animaux augmentant au cours de la croissance, une augmentation simultanée de **l'âge et du poids à l'abattage** s'accompagne d'une augmentation de la synthèse endogène de lipides (AGS et AGMI) et de leur dépôt dans les tissus adipeux constitutifs (tissu adipeux sous-cutané dorsal : bardière, et tissu adipeux périrénal : panne) ainsi qu'aux niveaux inter et intramusculaires, et consécutivement d'une réduction de la proportion d'AGPI dans les lipides tissulaires (Lebret et Mourot, 1998 ; Nurnberg *et al.*, 1998).

La composition des tissus adipeux du porc et par suite leurs caractéristiques nutritionnelles (et technologiques) varient selon leur **localisation anatomique.** La bardière est moins riche en lipides et plus riche en eau et protéines que le tissu adipeux périrénal et, au sein même de la bardière qui contient deux couches tissulaires (voire trois chez les génotypes très gras), la couche externe contient plus d'eau et moins de lipides que la couche interne, ces différences étant associées à des différences anatomiques d'activité lipogénique (Lebret et Mourot, 1998). En conséquence, **la composition en AG des tissus adipeux varie avec leur localisation** au sein de la carcasse. Comparativement à la panne, la bardière contient plus d'AGMI et d'AGPI

[28] Ciqual (2017). Table de composition nutritionnelle des aliments. https://ciqual.anses.fr/ [accédé le 13 mars 2019]

et moins d'AGS, en particulier dans la couche externe : les AG insaturés sont localisés préférentiellement dans les tissus externes et les AGS d'origine endogène dans les tissus adipeux internes (panne) (Lebret et Mourot, 1998). Des différences de profil lipidique sont également observées entre le tissu adipeux externe et le tissu intramusculaire, avec généralement des proportions inférieures en AGS et AGPI et supérieure en AGMI dans le muscle *Longissimus* relativement à la bardière (Mourot, 2010; Wood *et al.*, 2008), toutefois ces résultats dépendent du type génétique et de la conduite alimentaire. **Entre muscles**, comme indiqué ci-dessus, des différences de **teneurs en lipides totaux** engendrent logiquement des différences de concentration dans la viande (mg/g) des différents AG constitutifs ainsi que des vitamines liposolubles (dont la Vitamine E). En outre, comparé aux muscles « blancs », les muscles « rouges » sont plus riches en phospholipides qui contiennent eux-mêmes de plus fortes proportions d'AGPI à longue chaîne, que les triglycérides (Lawrie et Ledward (2006) et Wood *et al*. (2008)) ; en conséquence, les muscles rouges contiennent une plus grande proportion d'AGPI que les muscles blancs.

L'**alimentation** constitue un **levier majeur pour modifier les caractéristiques nutritionnelles des viandes porcines**. Comparativement à l'alimentation à volonté, une restriction produit des carcasses et pièces plus maigres (Lebret, 2008) et contenant plus de lipides insaturés, suite à la moindre dilution des AG d'origine alimentaire (plus ou moins insaturés selon la nature du régime) au sein des lipides d'origine endogène, comme expliqué ci-dessus (Wood *et al.*, 2008). C'est **surtout la nature des lipides alimentaires qui influence la composition en lipides de la viande**, les AGPI alimentaires pouvant être déposés directement dans les tissus sans modification biochimique chez les monogastriques, contrairement aux ruminants (Nurnberg *et al.*, 1998). La relation très forte et bien établie entre la nature des AG ingérés et celle déposée dans les tissus en particulier pour les AGPI C18:2 et C18:3 (Mourot, 2009; Wood *et al.*, 2008) est mise à profit pour adapter le profil lipidique des viandes aux recommandations nutritionnelles visant à augmenter la teneur des produits alimentaires en AGPI n-3 et à limiter celle des AGPI n-6 (rapports n-6/n-3 et LA/ALA inférieurs à 5). La « réponse » très rapide des tissus et dynamique en fonction des apports, permet d'envisager une durée de distribution limitée en fin de phase d'élevage pour limiter les surcoûts de production (surcoût alimentaire). De nombreux travaux menés chez le porc ont montré l'intérêt de l'apport de lin, de colza ou de chanvre dans l'alimentation pour enrichir les produits en AG n-3. L'efficacité du procédé dépend de **l'origine variétale** (des graines de lin sont sélectionnées pour leur teneur en matière grasse et en AGPI n-3, qui peut varier de 1 à 25 selon la variété), de **proportion** dans la ration et de la **forme de l'apport**, la **graine de lin extrudée** apparaissant la plus favorable (Mourot et Lebret, 2009). Ainsi, dans le cas de régimes isocaloriques et isolipidiques, la graine de lin extrudée permet d'obtenir dans le muscle *Longissimus* de porc une proportion de C18:3 n-3 de 1,48% contre 0,48% avec l'huile de tournesol, entraînant une forte réduction du rapport LA/ALA à 8,3 contre 27,6 (Mourot et Lebret, 2009). L'efficacité d'augmentation de la teneur en ALA de la bardière est généralement équivalente (Wood *et al.*, 2008), voire légèrement supérieure. Ainsi, la consommation de viande de porcs ayant reçu un aliment à base de céréales et contenant 4,2% de graines de lin extrudées (vs. 1,5% d'huiles de palme et de tournesol dans le groupe standard, les régimes étant isolipidiques, isoénergétiques et isoprotéiques) permet d'apporter de 350 à 450 mg d'ALA pour 100 g de viande, soit une teneur en ALA 5 fois plus élevée relativement à la viande des porcs ayant reçu l'aliment standard (Guillevic *et al.*, 2009). Cependant, les teneurs en AG à longue chaîne dérivés du précurseur C18:3, comme l'EPA (acide eicosapentaènoïque C20:5) et le DHA (acide docosahexaènoïque C22:6) sont peu augmentées dans les viandes suite à une supplémentation alimentaire en C18:3, vraisemblablement en raison d'une faible activité des delta 5 et 6 désaturases chez le porc, comme observé chez la plupart des animaux et chez l'homme (Mourot et Lebret, 2009). Cette stratégie d'amélioration du profil lipidique de la viande par l'alimentation fonctionne aussi pour les produits transformés cuits ou crus (andouille, pâté de campagne, poitrine rôtie, saucisson ; Guillevic *et al*. (2009) mais est moins adaptée pour la production de jambon sec de type Parme pour lequel l'acceptabilité globale, l'odeur et le goût sont altérés en raison de l'oxydation des AGPI (Musella *et al.*, 2009). La **viande (et produits) de porc** étant les produits carnés les plus consommés en France et en Europe, ils constituent donc un **vecteur de choix** (le deuxième après les produits laitiers) pour **contribuer à rééquilibrer le rapport AGPI n-6/n-3 dans l'alimentation humaine**. En France, un des acteurs dans ce domaine est la filière bleu blanc cœur (Mourot et de Tonnac, 2015). Outre les AG, la teneur en vitamines, en particulier en **vitamine E** de la viande, qui permet de limiter l'oxydation des lipides et des protéines pendant la transformation et la conservation des produits, dépend directement des apports alimentaires. Une **supplémentation de l'alimentation en antioxydants** est fortement recommandée en association avec la distribution de régimes enrichis en AGPI n-3 pour **prévenir les risques d'oxydation lipidique** pouvant entraîner une altération de la flaveur (voir volet Caractéristiques organoleptiques) mais aussi une perte de la valeur nutritionnelle par dégradation des AG essentiels (LA *et al*A) et la formation de composés toxiques lors de la conservation des produits (IFIP, 2018a; Jiang et Xiong, 2016 ; Rosenvold et Andersen, 2003). La stabilité oxydative de la viande dépend de sa concentration en inhibiteurs antioxydants et de leur activité, et de la teneur en composés pro-oxydants. Comme indiqué ci-dessus, des antioxydants naturels d'origine végétale inclus dans la ration alimentaire des animaux peuvent réduire l'oxydation des lipides dans la viande au cours de la conservation et jusqu'à la consommation (revue de Falowo *et al*. (2014). La maîtrise de **l'oxydation des protéines** est

également un point important à prendre en compte, celle-ci induisant de nombreuses modifications physico-chimiques (voir volet Caractéristiques technologiques) et une altération de la valeur nutritionnelle de la viande via une diminution de la digestibilité des protéines et de la biodisponibilité des acides aminés constitutifs (Falowo *et al.*, 2014). La supplémentation alimentaire des animaux en **minéraux,** comme le **sélénium,** afin de protéger les lipides et protéines tissulaires des stress oxydants permet effectivement d'augmenter sa teneur dans le tissu musculaire, où il peut jouer un rôle d'antioxydant en complément de la vitamine E (Mourot, 2009). Par contre, les supplémentations alimentaires en fer ou cuivre afin d'améliorer les performances de croissance et l'état sanitaire des animaux n'augmentent que très modérément leurs teneurs dans la viande, ces minéraux se déposant principalement dans les abats (foie) (Mourot et Lebret, 2009). En outre, le cuivre et le zinc peuvent favoriser l'oxydation des tocophérols naturels et augmenter ainsi le risque d'oxydation lipidique dans les produits. De façon générale, les composés antioxydants, dont la vitamine E, doivent être ajoutés à des doses modérées afin de limiter le **risque de pro-oxydation** conduisant à un effet inverse à celui recherché (Falowo *et al.*, 2014). Des travaux sont actuellement conduits pour évaluer l'efficacité des antioxydants naturels et optimiser leur durée de distribution dans l'alimentation pour obtenir une réponse favorable tout en limitant le surcoût alimentaire.

Le **mode de logement** des porcs peut influencer les propriétés nutritionnelles des viandes via une modification de leur profil lipidique. Ainsi, une **diminution de la température ambiante** en deçà de la zone de confort thermique du porc, situation fréquemment rencontrée en **conditions d'élevage alternatives** (accès à courette extérieure ou parcours) induit un changement de la composition en AG de la bardière avec une **augmentation de la proportion d'AGMI** et une réduction des proportions d'AGS et AGPI ; cet effet, observable dès que la température n'excède pas en moyenne 17°C, pourrait s'expliquer par le besoin de maintien de la fluidité membranaire (revue de Lebret (2008)). L'inverse est observé au chaud (>31°C) : la température élevée diminue le niveau d'ingestion des animaux et consécutivement la synthèse lipidique, entraînant une augmentation de la proportion d'AGPI dans les tissus adipeux du porc.

Outre l'effet de la température, les **conditions d'élevage** et en particulier l'élevage en extérieur avec **pâturage** influence fortement la composition en AG des tissus adipeux et de la viande, en augmentant les teneurs en AG n-3 dont en particulier le C18:3 et en diminuant le rapport n-6/n-3, en raison de la teneur élevée de ces AG dans l'herbe (revue de Lebret (2008)). Cet effet est généralement associé à un **enrichissement naturel des viandes en vitamine E** (α et γ tocophérols) et autres micronutriments permettant de limiter ultérieurement les phénomènes d'oxydation dans les viandes (Lebret, 2008). Par contre, l'influence du pâturage sur la teneur en fer ou en myoglobine de la viande est généralement non significative (Andres *et al.*, 2000 ; Tomazin *et al.*, 2019). Ainsi, le pâturage des animaux est **favorable aux caractéristiques nutritionnelles** des viandes porcines via une modification du profil lipidique. Cet effet est retrouvé dans les **systèmes d'élevage extensifs** valorisant des races locales, où les animaux ont accès au pâturage (plus ou moins selon la saison et la région) et sont alimentés exclusivement ou en partie à base de ressources locales (glands, châtaignes…). Cette conduite alimentaire particulière favorise le dépôt et la synthèse endogène d'AGM en particulier **l'acide oléique C18:1**, ainsi que d'AG n-3 et de composés antioxydants à partir des ressources pâturées (Lebret, 2008 ; Pugliese *et al.*, 2013). L'enrichissement naturel des viandes en antioxydants est particulièrement important pour ces productions valorisées sous forme de produits secs de longue durée d'affinage, pour lesquels le contrôle de l'oxydation lipidique et protéique lors de la transformation est essentiel en termes nutritionnels et organoleptiques (Gandemer, 2002) ; voir aussi la partie Produits transformés : le jambon sec, ci-après.

L'influence du **mode de production biologique** sur le **profil lipidique de la viande** est controversée : en comparant les propriétés de viandes porcines biologique et conventionnelle du commerce (sans information complémentaire sur les pratiques d'élevage ou l'alimentation), Karwowska et Dolatowski (2013) ont observé une proportion inférieure d'AGPI et d'AG n-3 ainsi qu'une moindre oxydation des lipides au cours de la conservation pendant 7 jours, dans les viandes bio. A l'inverse, dans leur étude comparant les viandes de porcs bio et conventionnelle (voir le descriptif des systèmes dans le paragraphe Caractéristiques sensorielles), Álvarez-Rodríguez *et al.* (2016) rapportent des proportions équivalentes d'AGS, AGMI et AGPI, cependant la viande bio présentait une proportion d'AGPI n-3 supérieure et un moindre rapport n-6/n-3 (15 vs. 25) relativement à la viande de porc conventionnelle. Une méta-analyse portant sur les différences de composition entre viandes bio et conventionnelles montre une réduction de la proportion d'AGMI au profit des AGPI chez le porc, toutefois cette analyse a porté sur un nombre limité d'études et n'a pas permis de statuer sur la proportion d'AG n-3 (Srednicka-Tober *et al.*, 2016a). Les différences de pratiques d'élevage et d'alimentation au sein de la production biologique expliquent probablement les différents résultats observés et illustrent à nouveau la grande variabilité des propriétés des viandes porcines biologiques.

Ainsi, comme pour les autres propriétés qualitatives des viandes porcines, les caractéristiques nutritionnelles résultent des **interactions** entre l'ensemble des facteurs présentés ci-dessus. Une caractéristique importante et facilement modulable par les facteurs de production en particulier l'alimentation est le profil en AG des tissus gras et des viandes, qui a fait l'objet de très nombreuses études depuis plusieurs décennies. Depuis une vingtaine d'années, des approches de **modélisation** se sont

développées pour intégrer ces données et proposer des modèles prédictifs de la composition en AG tissulaires en fonction de l'alimentation des animaux (composition du régime, durée de distribution…), les travaux les plus récents prenant en compte les performances de croissance ou la composition des carcasses (Paulk *et al.*, 2015). Un raffinement de ces modèles prenant en compte divers types génétiques et conduites alimentaires mais aussi différents tissus cibles (dont les lipides intramusculaires) serait utile pour optimiser la composition en lipides des tissus selon des objectifs qualitatifs.

Les conditions pré-abattage et d'abattage des animaux n'ont pas d'impact sur les propriétés nutritionnelles des viandes associées à leur composition biochimique en protéines, lipides, acides gras, vitamines et micro-constituants. La **durée et les conditions** de maturation et surtout de **conservation** peuvent influencer la peroxydation lipidique, qui s'accroit avec l'exposition à l'oxygène, à la lumière, la température, … (IFIP, 2018a). Le **mode de conditionnement** de la viande joue un rôle majeur pour la maîtrise de ces processus (voir 2.4.2.6 « Caractéristiques d'usage »).

La **cuisson** peut influencer les propriétés nutritionnelles des viandes, en modifiant les **teneurs et propriétés de ses constituants**, ainsi qu'en **exacerbant les réactions d'oxydation**, de façon plus ou moins importante selon le type de cuisson et la température. Les teneurs en minéraux (Na, Ca, Fe, Cu, Zn) de la viande de porc sont ainsi augmentées d'un facteur 1,5 à 2 après la cuisson, essentiellement en raison de leur « concentration » suite à la perte en eau de la viande pendant la cuisson, qui représente 25 à 30% du poids cru, voire plus selon la méthode, température et durée de cuisson…) (Lawrie et Ledward, 2006). A l'inverse, les teneurs en potassium et magnésium, ainsi qu'en vitamine B1 et autres vitamines hydrosolubles, sont réduites après cuisson par solubilisation dans l'« eau » perdue lors de la cuisson (Lawrie et Ledward, 2006). La vitamine A, liposoluble, reste par contre à des teneurs élevées dans la viande cuite à une température interne d'environ 80°C. Les **produits d'oxydation** générés lors de la cuisson participent au développement de composés aromatiques et à la flaveur de la viande, mais en contrepartie ils peuvent **altérer les propriétés nutritionnelles** des viandes, certains produits terminaux de la peroxydation lipidique étant génotoxiques et cytotoxiques (IFIP, 2018a) ; voir chapitre Santé). Toutes choses égales par ailleurs, plus la température est élevée, plus les réactions d'oxydation sont importantes. La cuisson peut aussi conduire à la formation de composés néoformés préjudiciables à la santé : des hydrocarbures polycycliques aromatiques présents dans les fumées peuvent se retrouver en surface de viandes grillées au barbecue ; d'autre part, un chauffage prolongé (≥ 150-200°C) favorise la formation d'amines hétérocycliques mutagènes à la surface du produit (dans la « croûte ») par la réaction de Maillard (IFIP, 2018a). La maîtrise des conditions de cuisson est donc primordiale pour **concilier valeur nutritionnelle et propriétés sensorielles** des viandes.

2.4.2.5. Propriétés technologiques

Les caractéristiques technologiques, c'est-à-dire l'aptitude de la viande (fraction maigre ou tissus gras) à être transformée en divers produits de charcuteries ou salaisons, cuites ou sèches, sont des **caractéristiques qualitatives majeures en filière porcine**, puisque trois quart de la viande porcine est consommée sous forme de produits transformés en France. Concernant la fraction maigre de la viande (muscle), le principal paramètre de qualité technologique est la **capacité de rétention en eau,** qui conditionne très fortement les **rendements technologiques** (rendements de fabrication). Ce paramètre est très fortement déterminé par le métabolisme musculaire péri et post-mortem, en particulier la vitesse et l'amplitude de chute du pH post mortem (p.m.). Les **principaux défauts de qualité technologique** sont les viandes PSE (vitesse très rapide de chute du pH), acides (pH ultime bas), ou DFD (pH ultime élevé) (voir chapitre 1). Un autre défaut important de qualité technologique est la **viande déstructurée,** qui présente une perte de l'aspect fibreux au profit d'une masse molle, sans structure apparente ; ce défaut, qui ressemble au niveau macroscopique au problème PSE, touche d'abord la partie profonde du jambon (muscles *adductor* et *semimembranosus*) et la longe dans les cas les plus graves (Figure 22) (Monin, 2003). Lors du tranchage industriel des jambons, les zones déstructurées des tranches se désagrègent (pertes au tranchage, texture « pommade »), entraînant des pertes économiques importantes dans l'industrie du jambon cuit. Ce défaut préoccupe les acteurs de la filière depuis une vingtaine d'années et est devenu crucial avec l'augmentation des volumes de ventes de jambon cuit en libre-service (augmentation des cadences de tranchage, production de tranches fines et homogènes), associée à l'élimination progressive des additifs technologiques (phosphates) et à la réduction de la teneur en sel. Une des difficultés réside dans le fait que contrairement aux viandes PSE « classiques » ce défaut n'est pas discernable sur le jambon entier mais seulement lors du désossage, où il est évalué visuellement sur une échelle de 1 à 4 (IFIP, 2014).

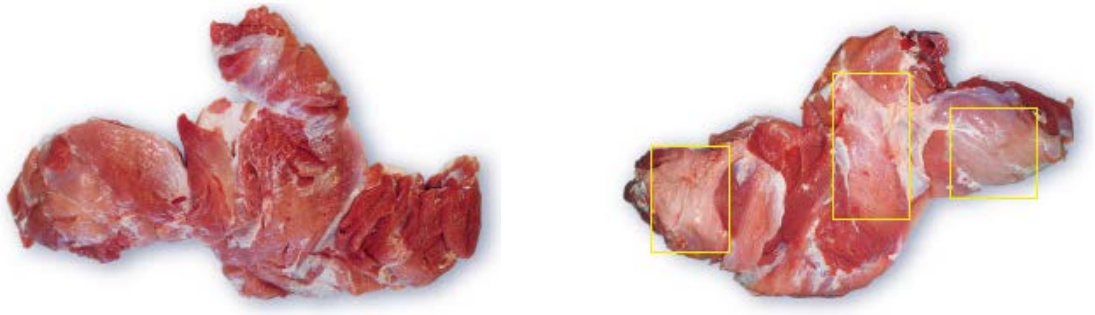


Figure 2.4.3. Jambons désossés (vue interne) d'aspect normal à gauche (note 1) et déstructuré à droite (note 4) (photo B. Lebret)

Plusieurs études ont visé à comprendre l'origine biologique du phénomène, **sans conclusion claire à ce jour** et on ignore encore si la lésion est présente dès l'élevage ou si elle est latente et déclenchée par les opérations de transport à l'abattoir et d'abattage. Il ressort cependant que ce défaut est d'**origine multifactorielle** ; il est associé i) à une dégradation des indicateurs de qualité technologique : basses valeurs de pH à 45 min, 4 h et surtout de pH à 24 h post mortem, perte en eau élevée (Minvielle *et al.*, 2001 ; Vautier *et al.*, 2008), ii) à une moindre protéolyse post-mortem (Laville *et al.*, 2005) et iii) aux processus de stress oxydant et d'apoptose dans le tissu musculaire (Theron *et al.*, 2019). Malgré l'apport d'améliorations aux différents maillons de la filière : élimination de l'allèle RN$^-$, optimisation de la durée de mise à jeun et des conditions de pré-abattage (manipulations et transport des animaux dans des conditions limitant les agressions), tri des jambons sur la valeur du pH à 24 h, optimisation des procédés de salage, cuisson et tranchage (voir le chapitre sur le jambon cuit), ce défaut touche toujours près de 15% des jambons en France (IFIP, 2014 ; Schwob *et al.*, 2018). Une étude exploratoire récente réalisée sur un faible effectif, a montré la possibilité, partir d'analyses spectrales des protéines plasmatiques provenant de sang prélevé à l'abattage puis l'élaboration de modèles prédictifs par chimiométrie (réseaux de neurones), de distinguer des jambons normaux de jambons déstructurés par spectométrie maldi-tof ; inversement la spectroscopie proche-infra-rouge s'est révélée performante pour prédire la présence de défaut de déstructuration (Theron *et al.*, 2020). Toutefois ces méthodes doivent être améliorées pour être plus discriminantes, et validées sur un effectif plus important. A ce jour, en l'absence de prédicteurs fiables et robustes (avant désossage) de la déstructuration, le pH à 24 h du muscle Semimembranosus reste un bon indicateur du risque d'apparition du défaut: celui-ci est multiplié par 3,2 lorsque le pHu diminue de 0,10 unité en deçà de 5,60 chez des porcs NN (en deçà de 5,70 pour des Nn) (Schwob *et al.*, 2018).

De façon générale, les **indicateurs majeurs de qualité technologique** des viandes porcines (pH à 45 min et à 24 h, perte en eau) sont également très **corrélés à des paramètres sensoriels** tels que la couleur (luminance, intensité de rouge) et la texture (tendreté, jutosité). L'effets de facteurs de variation liés à l'animal, son élevage et sa transformation et jusqu'à la consommation sur les caractéristiques technologiques, influencent ainsi très souvent les caractères sensoriels, comme indiqué précédemment.

Concernant les **tissus gras** (gras sous-cutané : bardière ou interne : périrénal ou panne) qui sont utilisés comme matières premières (au même titre que d'autres pièces) par les industries de transformation, leurs caractéristiques technologiques correspondent à leur **aptitude à la transformation et la conservation**, c'est-à-dire leur **consistance**, leur **cohésion** et leur **faible sensibilité à l'oxydation**. La **fermeté** des tissus adipeux est fonction de leur **composition chimique** : teneurs en lipides et en eau, importance de l'armature collagénique de soutien et composition en AG. Une faible teneur en lipides et corrélativement une teneur élevée en eau entraînent un manque de consistance du tissu adipeux, alors qu'une assise protéique importante assure une certaine fermeté à température ambiante (Lebret et Mourot, 1998). La **nature des AG** constitutifs joue un rôle essentiel dans la **consistance** des tissus adipeux : le point de fusion des AG étant d'autant plus bas qu'ils sont insaturés (-5°C pour le C18:2 n-6 contre +69°C pour le C18:0, Wood *et al*. (2008)), plus les tissus sont riches en AGPI, plus ils sont mous à une température donnée. Plusieurs études ont montré le rôle prépondérant de la proportion en AGS (surtout C16:0 et C18:0) par rapport aux AGMI ou AGPI (qui ont un effet opposé) dans la fermeté des tissus adipeux, évaluée par résistance mécanique (pénétromètre) ou par le taux de solide de la matière grasse (revues de Lebret et Mourot (1998) et Hugo et Roodt, (2007)). Toutefois, dans certaines conditions expérimentales, un rôle prépondérant (défavorable) est attribué au C18:2 par rapport à l'effet favorable de la proportion de C18:0 dans la détermination de la fermeté du gras (Wood *et al.*, 2008). La **durée de conservation** des tissus adipeux est limitée par le développement des réactions de peroxydation lipidique, favorisées par des teneurs en eau et en AGI élevées, associées à l'absence d'agents antioxydants (voir aussi volets caractéristiques organoleptiques et nutritionnelles). Ces réactions d'oxydation peuvent aussi se produire à l'état congelé (Hugo et Roodt, 2007 ; IFIP, 2018a).

Ainsi, les qualités technologiques des tissus adipeux du porc impliquent une proportion d'AGS et une teneur en lipides élevées (faible teneur en eau). Les caractéristiques des tissus adipeux sont déterminées à l'abattage et ne peuvent évoluer ensuite, hormis la peroxydation lipidique lors de la conservation. En conséquence, **tout facteur génétique ou d'élevage influençant l'adiposité corporelle et le profil en AG des dépôts adipeux influencera aussi la qualité technologique des tissus gras** (Hugo et Roodt, 2007 ; Lebret et Mourot, 1998 ; Wood *et al.*, 2008). Les effets de ces différents facteurs sont précisés ci-dessus (volets caractéristiques commerciales, organoleptiques et nutritionnelles) et ne seront pas détaillés ici. Ajoutons cependant que dans un **objectif de qualité technologique des tissus gras**, des exigences relatives à l'alimentation (< 1,9% d'acide linoléique dans la ration pour les porcs de plus de 12 semaines) et aux caractéristiques des tissus (« gras de bardière blanc et ferme ») figurent dans l'arrêté fixant les conditions de production en Label Rouge « porc » (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a) ainsi que d'autres productions sous SIQO. Ces objectifs sont aussi **favorables aux qualités organoleptiques** (limitation de l'oxydation) mais vont **à l'encontre de la qualité nutritionnelle**. Il semble donc que la gestion de ces compromis consisterait à orienter les tissus gras vers différentes utilisations selon leurs caractéristiques physiques et biochimiques.

Parmi les **facteurs de variation des caractéristiques technologique de la viande**, le **type génétique** des porcs constitue un des **déterminants majeurs** (Ciobanu *et al.*, 2011; Sellier, 1998). Vu l'importance des produits transformés en filière porcine, et suite à la mise en évidence d'effets défavorables sur la qualité de viande de la sélection génétique visant l'amélioration des performances de production, un indice de qualité technologique de la viande (IQV) a été inclus dans les objectifs de sélection des populations porcines collectives françaises au début des années 80 (Bidanel *et al.*, 2018). Cet indice IQV combine des mesures de pH, de couleur et de rétention d'eau mesurées le lendemain de l'abattage sur les muscles du jambon. La contrainte en sélection est de ne pas dégrader cet indicateur tout en augmentant la vitesse de croissance et l'efficacité alimentaire et en réduisant l'adiposité des carcasses. Les relations génétiques sont en effet globalement défavorables entre les caractéristiques technologiques ou sensorielles d'une part, et les caractères de croissance ou les caractéristiques des carcasses (valeur commerciale) d'autre part (Lebret, 2004; Sellier, 1998). Jusqu'à récemment, les programmes de sélection des populations porcines collectives ne visaient pas à améliorer les paramètres de qualité technologique de la viande, mais seulement à éviter leur dégradation. Depuis quelques années, la situation évolue avec la prise en considération du pH et de la perte en eau dans les objectifs de sélection en race Piétrain, dans le but d'améliorer ces caractères. Le développement de lignées Piétrain NN s'inscrit aussi dans l'objectif d'amélioration de la qualité de viande.

De nombreuses études comparatives et synthèses faisant le point sur l'influence de différentes races pures, lignées ou croisements sur les caractères de qualité technologique (et sensorielle) de la viande ont été publiées depuis les années 80 (Ciobanu *et al.*, 2011; Sellier, 1988). Ainsi, comparées aux moyennes calculées pour les races Large White et Landrace, (Sellier, 1998)qui peut être associée à la présence de l'allèle n) et une valeur de pH à 24 h supérieure en race Duroc et inférieure en race Hampshire (qui peut être associée à l'allèle RN^-). Plastow *et al*. (2005) rapportent de moindres pertes en eau pendant la maturation et une moindre luminance de la viande de porcs de race Duroc relativement à des porcs Piétrain (NN), Large White ou Landrace. Comparées aux races sélectionnées utilisées en production « conventionnelle », les races porcines locales présentent des pertes en eau réduites, associées à des valeurs de pH à 45 minutes et 24 h plus élevées (Labroue *et al.*, 2000 ; Lebret *et al.*, 2015a ; Lebret *et al.*, 2019a).

Comme décrit précédemment, deux gènes responsables de défauts majeurs de la qualité technologique de la viande, les gènes Halothane (RYR1) et RN (PRKAG3) ont été identifiés et sont pris en considération dans les programmes de sélection. **L'allèle n au locus RYR1** a pour effet une accélération de la vitesse de chute du pH p.m. qui peut être très importante : elle peut varier dans des proportions de 1 à 10 entre des porcs Piétrain de génotype nn vs NN (les hétérozygotes Nn étant intermédiaires) provenant du même élevage et abattus le même jour (Monin, 2003). Dans les minutes à l'heure suivant l'abattage, la combinaison d'un pH bas et d'une température élevée dans le muscle entraîne une dénaturation excessive des protéines musculaires (myosine) et un rétrécissement du volume des myofibrilles, favorisant l'écoulement de l'eau vers les espaces intra puis intercellulaires : la viande est exsudative ou « pisseuse » en jargon professionnel, pâle et flasque (PSE). Il s'agit d'un défaut de qualité technologique majeur en particulier pour la transformation en produits cuits, puisque le rendement à la cuisson et le pouvoir émulsifiant de ces muscles sont notablement diminués (Monin, 1988). Une méta-analyse de 23 publications sur les effets du gène RYR1 (incluant les 3 génotypes NN, Nn et nn) a confirmé l'effet délétère de l'allèle n sur de nombreux caractères de qualité (réduction des pH à 45 minutes et 24 h, augmentation de la luminance et de la perte en eau) et ceci y compris pour le génotype Nn comparé au NN, alors que ce point a fait l'objet de controverses dans la littérature (Salmi *et al.*, 2010). Par ailleurs, il est bien établi que la fréquence du défaut de déstructuration de la viande est plus élevée chez les animaux porteurs de l'allèle n (Schwob *et al.*, 2018). L'allèle **RN^- au locus PRKAG3** (désormais éradiqué en France et dans la plupart des bassins de production, *cf.* volet caractéristiques sensorielles) entraîne quant à lui un pH

ultime bas (mais ne modifie pas la vitesse de chute du pH), en raison de réserves en glycogène musculaire élevées à l'abattage, ceci surtout dans les muscles de la longe et du jambon (muscles « blancs »). En conséquence, les viandes présentent une faible capacité de rétention d'eau et des rendements à la cuisson réduits (Monin, 2003) : le rendement technologique de fabrication de jambon cuit est diminué de près de 3% entre porteurs de l'allèle RN$^-$ (homozygotes ou hétérozygotes) et non porteurs (Le Roy *et al.*, 2000), ce qui représente une perte économique importante en production. On peut supposer que la réduction du rendement de fabrication serait encore plus importante aujourd'hui en raison de la moindre utilisation d'ingrédients fonctionnels (sels, phosphates) dans la fabrication des charcuteries cuites. Il est à noter que, **à l'inverse de la mutation RN, d'autres mutations du gène PRKAG3 ont une influence favorable sur les propriétés technologiques de la viande** (pHu plus élevé et pertes en eau plus faibles) en raison d'une teneur en glycogène réduite (Ciobanu *et al.*, 2011).

L'influence du **type sexuel** sur les caractéristiques technologiques de la viande de porc est globalement relativement limitée, surtout lorsqu'on compare les mâles castrés et les femelles, la plupart des études ne montrant pas de différence significative de valeurs de pH ou de perte en eau (Lebret *et al.*, 1999). Toutefois, la teneur en maigre plus élevée des carcasses de porcs femelles relativement aux mâles castrés les prédisposent à un risque plus élevé de viande déstructurée (Schwob *et al.*, 2018). Pour des raisons de bien-être animal évoquées plus haut, la production de mâles entiers progresse en France et d'autres pays Européens. Or, une réactivité physique plus importante des mâles entiers que des mâles castrés ou des femelles aux manipulations en phase pré-abattage, pouvant modifier le métabolisme musculaire péri et post-mortem et consécutivement les indicateurs de qualité technologique, n'est pas à exclure. Une méta-analyse visant à quantifier les effets globaux du type sexuel (mâle entier, mâle castré, mâle immunocastré, femelle) portant sur 43 publications a conclu à l'absence de différence sur le pH à 45 min, le pH à 24 h et les pertes en eau de la longe entre ces quatre types sexuels (Trefan *et al.*, 2013) confirmant les résultats de la méta-analyse de Pauly *et al.* (2012). Toutefois, l'effet peut différer selon le muscle considéré : Trefan *et al.* (2013) mettent en évidence, dans le muscle Semimembranosus (jambon), un pH à 24 h un peu plus élevé chez les mâles entiers relativement aux mâles castrés ou aux femelles. Afin d'évaluer la réactivité au stress pré-abattage et l'impact sur la qualité selon le type sexuel, une étude a comparé les réponses physiologiques et comportementales de porcs mâles entiers, castrés et immunocastrés suite à l'application ou non d'un stress social (mélange avec des porcs inconnus) pendant cette période. Le mélange provoque comme attendu des comportements agonistiques, mais de manière équivalente entre les 3 types sexuels, les mâles entiers n'étant pas ici plus agressifs que les autres ; la qualité de viande (pH, couleur, perte en eau de la longe) était équivalente entre les mâles entiers, immunocastrés et castrés (Terlouw *et al.*, 2015).

Au sein d'un même type génétique ou sexuel ou à conditions de production et d'abattage similaires, des revues ou méta-analyses concluent que **l'âge et le poids à l'abattage** n'affectent pas les caractéristiques technologiques de la viande (Lebret *et al.*, 1999 ; Trefan *et al.*, 2013). Il a été suspecté que l'augmentation de la vitesse de croissance des animaux ces dernières décennies, obtenue conjointement par les progrès réalisés en génétique et en nutrition, induit un âge plus jeune des animaux à l'abattage qui pourrait accroître le risque d'apparition du défaut de déstructuration (hypothèse d'une moindre réticulation du tissu conjonctif interfibrillaire chez les animaux plus jeunes, entraînant une altération de la structure du muscle). L'âge à 105 kg est en effet passé de 189 à 165 jours entre 1985 et 2015 ; toutefois, sur la même période, le poids moyen à l'abattage s'est accru d'environ 17 kg, ce qui correspond à un accroissement de la durée d'élevage d'environ 15 j compte tenu de la vitesse de croissance moyenne (IFIP, 2019)[29]. Au final, l'âge moyen des porcs à l'abattage a donc peu évolué, rendant cette hypothèse assez peu vraisemblable. Toutefois l'influence stricte de l'âge à l'abattage ou de la vitesse de croissance en phase de finition sur l'apparition du défaut de déstructuration n'a pas été déterminée à notre connaissance.

L'influence de **l'alimentation** des animaux en élevage sur les caractéristiques technologiques de la viande varie selon les situations considérées, mais est globalement modérée. Concernant le niveau des apports alimentaires, une restriction même importante (-30% par rapport au niveau à volonté pendant plusieurs semaines) a des effets limités sur les réserves en glycogène musculaire à l'abattage et n'influence pas le pH ou les pertes en eau de la viande (Lebret, 2008). Concernant l'équilibre entre nutriments de la ration, la réduction des niveaux en sucres digestibles au profit des lipides et/ou des protéines pendant les deux à trois dernières semaines de finition, afin de réduire la teneur en glycogène musculaire à l'abattage et améliorer le pH de la viande, est dans la plupart des études sans effet sur les réserves en glycogène musculaire et consécutivement le pH ou les pertes en eau (Rosenvold et Andersen, 2003). Si l'on considère l'ensemble de la phase de croissance-finition, l'équilibre entre acides aminés et énergie du régime semble également sans effet sur les paramètres de qualité technologique (Lebret *et al.*, 1999). Par contre, une étude récente montre qu'une supplémentation en méthionine,

[29] IFIP, 2019. *Gestion Technique et Economique (GTE) : Evolution des résultats moyens nationaux - naisseurs-engraisseurs.* https://www.ifip.asso.fr/fr/resultats-economiques-gttt-graphique.html [Accédé le 30 Avril 2019]

acide aminé constitutif du glutathion (antioxydant cellulaire), au-delà du strict besoin pour la croissance, pendant deux semaines avant l'abattage, est associée à une amélioration du pH ultime (longe et jambon), de la capacité de rétention en eau et de l'IQV, outre l'effet positif observé sur la couleur (Lebret *et al.*, 2018a). Ces résultats peuvent s'expliquer par une augmentation des concentrations en glutathion dans le tissu musculaire à l'abattage, et suggèrent la possibilité d'**améliorer la qualité technologique de la viande par la modulation des capacités antioxydantes du tissu musculaire via la nutrition des animaux**. Ce champ d'études fait actuellement l'objet de nombreuses investigations (Falowo *et al.*, 2014 ; Jiang et Xiong, 2016 ; Li *et al.*, 2017). Outre l'effet protecteur bien établi d'une supplémentation en vitamine E vis-à-vis de l'oxydation des lipides et des protéines (voir caractéristiques sensorielles et nutritionnelles), une réduction des pertes en eau de la viande, résultant d'une moindre altération des membranes des cellules musculaires pendant la conservation, a souvent été rapportée, mais n'est pas systématique. L'effet varie selon le niveau de supplémentation (les effets significatifs étant souvent observés en comparant des régimes supplémentés et déficients), mais pourrait aussi dépendre du génotype halothane des animaux, avec une réponse positive plus marquée chez les porteurs de l'allèle n (Rosenvold et Andersen, 2003). Les nombreuses études portant sur la supplémentation de l'alimentation des porcs en antioxydants d'origine végétale sur les paramètres d'oxydation de la viande (voir paragraphe sur les caractéristiques sensorielles) considèrent rarement les paramètres de qualité technologique, toutefois Cheng *et al*. (2017) rapportent une réduction des pertes en eau de la viande, associée à une augmentation des capacités antioxydantes du tissu musculaire, chez des porcs ayant reçu une supplémentation alimentaire en huile essentielle d'origan. Une supplémentation alimentaire en **magnésium** des porcs pendant la phase d'élevage ou même seulement les quelques jours précédant l'abattage, permet de limiter la réponse au stress des animaux et ses conséquences néfastes sur les propriétés technologiques et sensorielles des viandes (revues de Rosenvold et Andersen (2003) ; Warner et Dunshea (2017)). En effet, le magnésium réduit les teneurs en catécholamines circulantes et la stimulation neuromusculaire, conduisant à une moindre incidence des viandes de type PSE et une amélioration de la capacité de rétention en eau et de la couleur de la viande.

Les **conditions d'élevage** des porcs peuvent influencer les caractéristiques technologiques de la viande, cet effet résultant souvent d'une modification du métabolisme énergétique musculaire selon l'environnement de l'animal. Chez des porcs élevés en bâtiment, l'élevage sur paille associé à une augmentation de la surface disponible par animal ne modifie pas les propriétés technologiques de la viande (pH, perte en eau), comparé à l'élevage sur caillebotis (Geverink *et al.*, 1999). Par contre, la **température ambiante en élevage** et ses fluctuations peuvent impacter les propriétés technologiques de la viande. Ainsi, une réduction de la température ambiante en deçà de la zone de confort thermique des animaux accroît les **réserves en glycogène musculaire**, entraînant une réduction du pH ultime et augmentation des pertes en eau notamment dans les muscles blancs (longe, jambon), alors qu'une diminution modérée de la température est sans conséquence (Lebret *et al.*, 2015b). Le même effet peut être observé en mode d'élevage alternatif sur courette, parcours ou en système extensif en particulier en saison d'hiver, et peut se cumuler avec les conséquences d'une activité physique accrue sur le métabolisme musculaire, notamment dans les muscles du jambon impliqués dans la locomotion ((Bee *et al.*, 2004) ; revue de Lebret (2008) ; Tomažin *et al*. (2019)). Toutefois d'autres études ne rapportent pas cet impact plutôt négatif de l'élevage alternatif (revue de Millet *et al*. (2005) ; (Lebret *et al.*, 2011)), illustrant la **variabilité de réponse des animaux aux conditions d'élevage** selon les conditions climatiques (impact plus fort au froid), associées aux autres facteurs de variation liés à l'animal ou à sa conduite, et *in fine* la **détermination multifactorielle des caractéristiques qualitatives** de la viande.

Par ailleurs, la **réactivité des porcs aux événements pré-abattage**, qui influence fortement le métabolisme musculaire et la **qualité technologique** de la viande, peut dépendre de leurs conditions d'élevage et de leur **expérience antérieure** (revue de Terlouw *et al*. (2015)). Ainsi, le mélange d'animaux en phase pré-abattage suscite moins de combats chez des porcs élevés en extérieur, conduisant à moins de lésions corporelles, une teneur en glycogène musculaire supérieure et par conséquent un pH ultime de la viande plus bas, comparativement à des porcs élevés en système conventionnel (Barton Gade, 2008 ; Terlouw *et al.*, 2009). Autrement dit, le mélange conduit à plus d'agressivité chez les porcs conventionnels, provoquant probablement plus de stress, ceci soulignant l'**antagonisme entre des conditions favorables au bien-être des animaux et des indicateurs de qualité de viande**.

Les **pratiques d'abattage** : transport et stabulation à l'abattoir, puis abattage : étourdissement et saignée, habillage et réfrigération des carcasses (voir la description de ces différentes étapes dans le chapitre 1 et ci-après), ont des **conséquences majeures sur les caractéristiques technologiques, mais aussi sensorielles et sanitaires des viandes,** en raison du **stress que les manipulations pré-abattage peuvent provoquer** chez les animaux, puis de la **cinétique d'évolution du muscle en viande**. Pour faciliter la compréhension des phénomènes, on peut distinguer grossièrement deux niveaux de stress pré-abattage, même si les deux interagissent : le stress de long-terme associé aux manipulations des animaux (chargement, transport, déchargement) qui peut induire les défauts de qualité associés à l'amplitude de chute du pH (faible : viande DFD,

élevée : viande acide et risque accru de déstructuration) et le stress de court-terme : conditions d'attente en stabulation d'abattoir et conduite au poste d'anesthésie, qui peuvent conduire au défaut PSE (Rosenvold et Andersen, 2003).

Avant leur transport, les animaux sont mis à jeun pour éviter des souillures de la carcasse lors de l'éviscération. La **durée de mise à jeun** influence aussi les caractéristiques technologiques de la viande : le jeûne ayant pour effet de réduire le taux de glycogène musculaire avant l'abattage, il tend à augmenter le pH à 24 h et à réduire le taux de viandes déstructurées (IFIP, 2014) ; cependant, ces effets s'observent surtout au-delà de 24 h de mise à jeun, ce qui va à l'encontre du bien-être animal (Rosenvold et Andersen, 2003). Pour concilier bien-être animal, valeur commerciale des carcasses (le rendement de carcasse diminue avec la durée de jeune) et qualité de la viande, il est recommandé de respecter un intervalle de 20 à 24 h entre le dernier repas et l'abattage des porcs (IFIP, 2013; Monin, 2003). Lors des manipulations et du transport des animaux, toutes les dispositions permettant de **limiter les facteurs d'agression susceptibles d'induire des défauts de qualité** des carcasses (griffures) et de la viande (pH ultime trop élevé de la viande : défaut DFD, voir chapitre 1) sont à privilégier : mise à disposition à l'élevage d'un quai d'embarquement pour faciliter le tri puis le chargement des porcs, non mélange d'animaux de cases d'élevage différentes, véhicules de transport adaptés avec planchers élévateurs, respect des densités de chargement, durées et conditions de transport (IFIP, 2013). L'influence des conditions à ces différentes étapes sur les qualités des carcasses et des viandes a été décrite par Monin (Monin, 2003) et Rosenvold et Andersen (2003). Brièvement, concernant le transport, les principaux facteurs de stress sont le chargement dans les véhicules puis le déchargement, alors que la durée du transport a un effet limité s'il est effectué dans de bonnes conditions. Les conditions de transport des animaux sont soumises à la réglementation européenne (règlement CE n°1/2005 (2005b)) au Code Rural et de la Pêche Maritime (articles L.214-12 et R.214-49 à 62). En outre, un projet récent soutenu par la DG Santé de la Commission Européenne a développé et diffusé des Guides de bonnes pratiques pour le transport des animaux dont les porcins[30]. Outre la protection des animaux, l'ensemble de ces dispositions vise à favoriser les caractéristiques qualitatives des viandes.

A l'arrivée à l'abattoir, une durée minimale de **repos** en stabulation est nécessaire pour ne pas dégrader la qualité de la viande. En effet, l'abattage immédiatement après le déchargement se traduit par une fréquence accrue de viandes PSE, en raison d'une augmentation de la température corporelle pendant le transport, que l'attente avant abattage permet de résorber. Un douchage des animaux accélère le retour de la température corporelle à la normale et calme les animaux. A l'inverse, une attente trop longue surtout si les animaux ont été mélangés, est l'occasion d'agressions supplémentaires qui activent la glycogénolyse musculaire et finissent par engendrer des viandes à pH élevé (Monin, 2003). La recommandation est 2 h d'attente minimum, idéalement 4 à 5 heures (IFIP, 2014). La **conduite des animaux** au poste d'abattage est cruciale pour la qualité de la viande : là aussi, il convient de limiter leur excitation (les conduire en petits groupes, minimiser le parcours en file indienne pour ne pas contrarier l'instinct grégaire des porcs, n'utiliser qu'exceptionnellement un aiguillon électrique pour induire le déplacement des animaux), ceci afin de réduire le risque d'incidence des viandes PSE ou déstructurées (IFIP, 2014; Monin, 2003). Il est en effet bien établi qu'un niveau de stress élevé juste avant l'anesthésie induit une élévation de la température musculaire et une acidification rapide du muscle, conduisant à des viandes exsudatives même chez des animaux non porteurs de l'allèle halothane (Rosenvold et Andersen, 2003; Schafer *et al.*, 2002). Chez des animaux porteurs de l'allèle n, le risque de viandes PSE consécutif à de mauvaises manipulations pré-abattage des porcs est encore plus élevé (Warner et Dunshea, 2017). **L'étourdissement** des porcs avant la saignée se pratique par deux méthodes différentes : l'anesthésie électrique, majoritairement utilisée en France, consiste à étourdir l'animal par le passage d'un courant (minimum 1,3 A) au travers du cerveau ; l'avantage est sa facilité d'adaptation à toute cadence d'abattage, faible comme très élevée, avec automatisation complète du système. L'autre méthode est l'anesthésie gazeuse, qui consiste à immerger les porcs dans une fosse enrichie en CO_2 (65 à 80% de CO_2) jusqu'à ce qu'ils perdent conscience. L'avantage essentiel est la possibilité d'anesthésier des petits groupes d'animaux (contrairement au système électrique individuel), cependant ce système a été critiqué du fait de la durée d'induction de la perte de conscience (IFIP, 2014; Monin, 2003). En termes de **qualité de la viande**, l'anesthésie électrique peut engendrer des contractions musculaires violentes sources de pétéchies (points de sang), d'hématomes voire de fractures, qui peuvent être réduits par différents moyens : augmentation du voltage, usage d'un convoyeur, réduction du délai entre anesthésie et saignée, et saignée horizontale qui contribue aussi à réduire la chute p.m. du pH et le risque de viandes PSE (IFIP, 2014; Monin, 2003). L'intérêt de l'anesthésie gazeuse sur la réduction des risques d'ecchymoses et de fractures est bien établi, expliquant sa mise en œuvre dans d'importants abattoirs européens (Monin, 2003 ; Rosenvold et Andersen, 2003 ; Warner et Dunshea, 2017). Par contre, la réduction du taux de viandes PSE par cette méthode relativement à l'anesthésie électrique est controversée : si elle est effective pour plusieurs auteurs (revues de Rosenvold et Andersen (2003), Warner et Dunshea (2017), et de Monin (Monin, 2003)) elle souligne les facteurs confondants et de potentiel biais dans les études comparatives considérées par le fait qu'elles ont été réalisées dans

[30] http://animaltransportguides.eu/

des abattoirs différents. Par ailleurs, les coûts d'acquisition et d'entretien des installations d'anesthésie gazeuse sont plus élevés que pour l'anesthésie électrique (IFIP, 2014). Après la saignée, les **carcasses** sont échaudées (eau chaude par immersion, le plus répandu, douchage vertical, ou vapeur) pour favoriser l'épilation, puis flambées (élimination des derniers poils et réduction de la contamination de surface). L'étape suivante d'**éviscération** (retrait des abats blancs) est cruciale pour la **qualité bactériologique** de la carcasse et constitue le risque majeur de contamination par salmonelles des viandes dans le cas où l'animal est porteur (IFIP, 2014). Les abats rouges sont ensuite ôtés et suivent chaque carcasse en vue de leur inspection visuelle par un **vétérinaire**. Puis la carcasse est fendue et la panne, les gras internes, les reins et la moelle épinière ôtés ; la carcasse ainsi préparée est pesée et classée à partir de mesures des épaisseurs de gras et de muscle (établissement du TMP), base de paiement aux producteurs. Contrairement à d'autres espèces (bovin, ovin…), la **stimulation électrique** des carcasses, qui a pour but d'améliorer la tendreté de la viande en prévenant la contracture au froid des muscles n'est pas appliquée chez le porc : en effet, cette pratique stimule le métabolisme musculaire et accélère la vitesse de chute p.m. du pH, alors qu'on cherche plutôt à ralentir ce phénomène dans les carcasses porcines (Aberle *et al.*, 2012; Rosenvold et Andersen, 2003).

La **réfrigération** des carcasses permet d'allonger la durée de conservation de la viande avant transformation ou consommation en l'état en limitant le développement microbien ; l'objectif est d'atteindre 7°C maximum en tout point en moins de 24 h (IFIP, 2014). La réfrigération influence fortement le rendement en viande, car elle ralentit les pertes de poids par évaporation, ainsi que les qualités de la viande en affectant la cinétique des changements biochimiques dans le muscle (Monin, 2003 ; Rosenvold et Andersen, 2003). Plusieurs systèmes de réfrigération sont utilisés : froid statique (0 à 5°C), froid choc (-10 à -15°C pendant 2 à 3 h) qui permet de limiter les pertes de poids par évaporation et la prolifération bactérienne de surface, froid humide (0 à 1°C, avec brumisation pendant 3 à 5 h) qui réduit l'évaporation et accélère le refroidissement (IFIP, 2014). En termes de **caractéristiques technologiques et sensorielles** de la viande, la réfrigération rapide peut améliorer le pouvoir de rétention d'eau et la couleur, mais pas suffisamment pour empêcher l'apparition du caractère PSE lorsque l'acidification est très rapide, comme chez des animaux sensibles à l'halothane ou fortement perturbés au moment de l'abattage. Cependant, la réfrigération rapide peut avoir un effet négatif sur la tendreté de la viande, surtout si la chute de pH p.m. est lente : il se produit alors une contracture au froid du muscle, entraînant un durcissement marqué de la viande (Monin, 2003 ; Rosenvold et Andersen, 2003). Après refroidissement, les carcasses sont placées en salle réfrigérée et triées selon leur poids, TMP, cahier des charges éventuel (LR, Bio, démarches régionales…) afin de préparer leur orientation commerciale.

2.4.2.6. Propriétés d'usage

Parmi les caractéristiques d'usage, la **durée de conservation** des viandes porcines comme des autres viandes dépend en grande partie du **mode de conditionnement**. Avec le développement du rayon libre-service pour les produits carnés, l'**emballage** joue un rôle croissant. En plus d'assurer une **protection** pendant le stockage et le transport contre les contaminations environnementales ou de favoriser la conservation, il contribue à mieux valoriser les produits en incluant des **informations à destination des consommateurs** concernant l'origine et le mode de production des viandes, ou des conseils de préparation.

Le développement microbien et l'oxydation lipidique sont les premières causes d'altération de la viande, ils déterminent donc sa durée de conservation (Rosenvold et Andersen, 2003). Ces paramètres dépendent de facteurs amont (type génétique, mode d'élevage, conduite alimentaire, procédés d'abattage et de refroidissement des carcasses…) dont les effets sont décrits ci-dessus, ainsi que de la durée et du mode de conditionnement. L'objectif premier de l'emballage est de protéger la viande contre des 'agressions' de nature physique, chimique ou microbiologique ; pour prolonger la conservation et la fraîcheur, les emballages sont de plus en plus élaborés, dans un contexte environnemental visant à réduire leur quantité (taille des barquettes, épaisseur des films) (IFIP, 2014). Différents modes de conditionnement de la viande de porc existent, présentant chacun des avantages et des inconvénients. Le **conditionnement sous film** est une technique simple consistant à placer la viande dans une barquette de type polystyrène expansé qui apporte une protection mécanique et préserve la fraîcheur grâce à ses propriétés isothermes, et à positionner dessus, de façon manuelle ou automatique, un film étirable. Celui-ci étant perméable à l'air, les viandes sont conditionnées sous air ambiant et peuvent se conserver entre 4 et 7 jours à 4°C. Il est très utilisé pour le conditionnement de la viande de porc en unités de vente consommateur pour la vente en libre-service (IFIP, 2014). En **conditionnement sous atmosphère modifiée (MAP)**, l'air entourant le produit est remplacé par un gaz (généralement pour la viande de porc un mélange de 30% de CO_2 ayant un effet bactériostatique, et de 70% d'oxygène permettant préserver la couleur rouge vif de la viande) ; la durée de conservation varie alors de 10 à 12 jours selon le procédé : balayage gazeux, ou vide avec réinjection de gaz (IFIP, 2014). L'inconvénient du MAP est qu'il entraîne des réactions d'oxydation. L'ajout d'un **suremballage** au conditionnement sous film ou MAP protégeant le produit de la lumière, permet

de limiter la photo-oxydation. Le **conditionnement sous vide**, dans un sac hautement imperméable aux gaz, prive la viande d'oxygène et lui donne une couleur rouge pourpre, inhabituelle pour le consommateur qui peut donc la percevoir comme défavorable. Cette décoloration est réversible dès que le produit est réoxygéné à l'air ambiant. Deux technologies sont utilisées : vide sous cloche du produit inséré dans un sachet, ou déformation par la chaleur du film supérieur du conditionnement permettant d'éviter la déformation du produit et la formation d'exsudat (IFIP, 2014). Le conditionnement sous vide protège la viande de l'oxydation et est favorable à la maturation et à la qualité sensorielle de la viande. Il est plus fréquemment utilisé pour la viande bovine que la viande porcine pour la commercialisation dans les linéaires de GMS, et est surtout utilisé par les industriels de la filière porcine pour la commercialisation de la viande à destination de la restauration hors foyer (IFIP, 2014). Associé à une basse température, le conditionnement sous vide permet d'augmenter la durée de conservation de la viande. Afin **d'associer durée de conservation et praticité de préparation**, des procédés de conditionnement sous vide de viande de porc marinée permettent la cuisson au micro-ondes dans l'emballage (IFIP, 2014).

Pour apporter plus de fonctionnalités aux consommateurs, les emballages deviennent de plus en plus sophistiqués. Les **emballages 'actifs'** sont conçus pour interagir avec le contenu et/ou l'environnement : ils changent les conditions de conservation du produit afin d'améliorer sa durée de vie et sa sûreté, en incluant par exemple des absorbeurs d'oxygène, de CO_2 ou d'humidité, des absorbeurs ou agents de libération des arômes et des odeurs, ou des bactéricides (IFIP, 2014). Les **emballages 'intelligents'** se caractérisent par leur capacité à surveiller l'état des aliments emballés ou de l'environnement en intégrant des indicateurs temps-température, des détecteurs de gaz (détection de fuites) et des indicateurs de fraîcheur ou de maturation. L'utilisation de ces emballages technologiques est soumise à un règlement européen (Commission européenne, 2009) qui inclut une **liste positive de matériaux** pouvant être utilisés. Les progrès dans les domaines des nanotechnologies et des nanomatériaux permettront de développer de nouveaux emballages actifs et intelligents, pour continuer à améliorer la fraîcheur et la durée de conservation des aliments par un meilleur contrôle des conditions de stockage depuis le lieu de production jusqu'au consommateur final (Pereira de Abreu *et al.*, 2012).

La **praticité de conservation** (température) et de **transport** des produits carnés étant une qualité d'usage de plus en plus importante pour les consommateurs (consommation nomade), l'importance de l'offre de **produits de charcuterie secs** pouvant se conserver à température ambiante (saucissons, saucisses sèches, …) est un atout pour la filière porcine et le maintien d'une consommation adaptée aux nouveaux modes de vie (voir volet produits transformés).

2.4.2.7.Propriétés d'image

Les caractéristiques d'image correspondent à la perception qu'ont les consommateurs des **attributs que présente le produit, ou son processus de production** (voir chapitre 1). Les systèmes de production 'conventionnels' ou 'intensifs' sont de plus en plus décriés par les consommateurs et les citoyens, notamment concernant l'élevage des monogastriques. Ceci se traduit par un changement de comportement des consommateurs dans leurs actes d'achat (et pas seulement dans leurs revendications), avec une réduction de la consommation individuelle de viande de porc et une augmentation en part relative mais aussi en volume des produits de porc sous SIQO en France (voir partie 1 ; IFIP (2018b). Cette évolution révèle que la considération des caractéristiques d'image (ou 'qualités extrinsèques') des produits par les consommateurs et par conséquent par les acteurs de la filière constitue un facteur d'évolution des systèmes de production afin de concilier durablement l'ensemble des attentes qualitatives (Dourmad *et al.*, 2006). En production porcine, l'amélioration du bien-être animal, un moindre recours aux intrants (médicaments en particulier) et la réduction de l'impact environnemental constituent des enjeux majeurs relevant de ces caractéristiques d'image ; leur importance relative a évolué depuis une vingtaine d'années en Europe et notamment en France, où la considération du bien-être animal est plus récente que dans d'autres pays européens, mais devient un enjeu majeur pour les professionnels de la filière (Carpentier *et al.*, 2003 ; INAPORC, 2018; Krystallis *et al.*, 2009).

Comme dans l'ensemble des filières de productions animales, l'utilisation des antibiotiques dans l'alimentation des porcs comme facteurs de croissance a été interdite dans l'UE depuis 2006 pour des enjeux de santé publique liés au développement de l'antibiorésistance (Sanders *et al.*, 2011). Ainsi, le niveau d'exposition des porcs aux antibiotiques, estimé par l'indicateur ALEA (Animal Level of Exposure to Antimicrobials) à partir des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques, a baissé de 52,1% en France de 1999 à 2018 (Anses, 2019), avec une réduction de l'exposition plus marquée sur les dernières années. Le **plan Ecoantibio**, présenté par le ministère de l'Agriculture en 2011, a été un succès : le niveau d'exposition des porcs aux antibiotiques (ALEA) a été réduit de 41% sur la période 2012-2016 pour un objectif initial de –25% (Anses, 2017e), et cette réduction se poursuit.

La mise en place par l'interprofession porcine (INAPORC) en 2010 de suivi des usages des antibiotiques au travers d'enquêtes dans un panel d'élevages permet d'affiner ces données en se basant sur l'utilisation et non la vente des antibiotiques, et en

détaillant les catégories d'animaux destinataires (truies, porcelets, porcs en engraissement) (Hémonic *et al*., 2019). Ces données confirment l'amplitude de réduction de l'exposition des porcs aux antibiotiques et révèlent que les plus fortes réductions concernent les porcs en post-sevrage et en engraissement (-70%) et portent sur les antibiotiques d'importance critique, à réserver en priorité pour la médecine humaine (Hémonic *et al*., 2019). L'ensemble de ces données témoigne des efforts engagés par la filière, soutenue par la recherche-développement, pour améliorer les pratiques : développement de méthodes préventives basées sur les bonnes pratiques en élevage et la biosécurité, recherche d'alternatives aux antibiotiques (voir par exemple le projet européen PROHEALTH http://www.fp7-prohealth.eu/).

Les **attentes, perceptions et comportements des consommateurs** envers la viande et les produits du porc sont **essentiels** à appréhender car ils **influencent l'acte d'achat et de ré-achat**; ils sont cependant évolutifs et variables entre segments de consommateurs (Font-i-Furnols et Guerrero, 2014), voire au niveau d'un même consommateur selon les circonstances de consommation.

L'acceptabilité par les consommateurs de la viande de porc issue d'élevage conventionnel ou de **modes de production « alternatifs »** et **l'effet de l'information relative au mode de production** sur leur perception par les consommateurs, ont fait l'objet de plusieurs études en Europe. Dans une étude menée conjointement en France, au Danemark, en Suède et au Royaume Uni, Dransfield *et al*. (2005) ont montré qu'en présence d'information sur le mode d'élevage (étiquette « élevé en extérieur » ou « élevé en intérieur »), les consommateurs questionnés à partir d'images de produits préféraient la viande d'animaux élevés en extérieur, en particulier en France, alors que des tests sensoriels réalisés par des consommateurs français et anglais ne montraient pas de différence de qualité perçue entre les deux modes de production. L'information sur l'origine de la viande (mention du pays, par exemple « France » vs. « importé ») conduisait à des différences plus marquées par rapport à l'information sur le mode de production, une grande majorité des consommateurs de chaque pays préférant la viande issue de leur pays d'origine. Cette étude illustre l'écart qui peut exister entre la qualité intrinsèque et la qualité perçue (Edwards, 2005) et renseigne sur la hiérarchisation des critères sur lesquels les consommateurs se basent pour établir leurs préférences. Casal *et al*. (2018) ont également mis en évidence une préférence des consommateurs espagnols pour la viande de porcs élevés en système conventionnel avec « amélioration du bien-être animal » (via l'enrichissement de l'environnement), suivi des viandes de porcs ayant reçu une « supplémentation alimentaire de plantes naturelles » (visant une réduction du stress en élevage), comparé au système d'élevage non enrichi, ou à une alimentation conventionnelle, respectivement. Ici aussi, ces préférences n'étaient pas associées à des différences sensorielles, l'acceptabilité 'en aveugle' des viandes par les mêmes consommateurs étant équivalente entre les différents groupes expérimentaux. Dans la même étude, les auteurs ont évalué l'effet du prix de la viande sur les préférences des consommateurs : s'il était en moyenne le facteur de choix le moins important (relativement à l'amélioration du bien-être ou à la supplémentation alimentaire), un prix bas était le premier critère de choix pour 26% d'entre eux, illustrant la segmentation des consommateurs sur les différents attributs de la viande (Casal *et al.*, 2018).

Les systèmes d'élevage de porcs visant une **amélioration du bien-être** incluent généralement un enrichissement des conditions de vie des animaux, leur permettant de mieux exprimer leurs comportements, en particulier leur comportement exploratoire : augmentation de la surface allouée en élevage, mise à disposition de matériaux manipulables, élevage sur paille, accès à une courette extérieure, ou élevage en plein air, etc. (Bonneau et Lebret, 2010). Ces systèmes sont perçus favorablement par les consommateurs (Casal *et al.*, 2018; Dransfield *et al.*, 2005), toutefois leur impact sur les autres caractéristiques qualitatives, notamment sensorielles, est très variable selon les génotypes et les conditions d'élevage considérées (voir volet Caractéristiques sensorielles ; Edwards (2005) ; Bonneau et Lebret (2010)). Une autre voie d'amélioration du bien-être des porcs concerne les méthodes de castration des porcs mâles, et en particulier les alternatives à la castration chirurgicale. L'interdiction de la castration à vif partir de 2022 en France, seule la castratrion chirurgicale avec anesthésie et analgésie devenant alors autorisée, s'inscrit pleinement dans cet objectif.

Les **impacts environnementaux** (locaux et globaux) des productions animales occupent une part croissante dans les attributs d'image (plutôt négatifs) associés à la viande. Concernant la production de viande porcine, bien que les systèmes alternatifs d'élevage soient généralement perçus comme plus durables par la société, leur intérêt réel pour l'environnement est parfois controversé (Basset-Mens et van der Werf, 2005 ; Degre *et al.*, 2007). A titre d'illustration de cette controverse, une évaluation de la durabilité environnementale de différents systèmes de production de porcs a été réalisée dans cinq pays européens (Danemark, Pays Bas, Espagne, Allemagne et France) par la méthode d'analyse de cycle de vie (Dourmad *et al.*, 2014). A partir d'un inventaire des systèmes de production en Europe, quatre type d'élevages ont été identifiés : conventionnel, conventionnel adapté (différences limitées par rapport au conventionnel et visant à améliorer le bien-être, la

qualité des produits (par exemple Label Rouge) ou l'environnement), biologique et traditionnel (souvent basé sur l'utilisation de races locales et l'élevage en plein air des porcs) (Bonneau *et al.*, 2011). Dans chaque pays, trois de ces systèmes (le conventionnel et deux différenciés) ont été inclus dans l'étude. Les impacts environnementaux varient fortement selon les systèmes, toutefois leur « classement » est largement dépendant de l'unité fonctionnelle retenue. Ainsi, les systèmes conventionnels présentent des impacts globaux (changement climatique, utilisation d'énergie, utilisation de surface), exprimés par kg de porc, plus faibles, alors que pour les impacts locaux (acidification, eutrophisation), exprimés par hectare, ce sont les systèmes différenciés qui ont les impacts les plus faibles (Dourmad *et al.*, 2014). Ceci montre que l'impact environnemental d'un système de production varie considérablement selon l'indicateur et l'unité d'expression considérés. Ces impacts sont bien sûr à mettre en regard des autres impacts et services : intrants, marchés, travail et emploi, enjeux sociaux et culturels des systèmes de production animaux (Dumont *et al.*, 2016 ; Duru *et al.*, 2017b).

2.4.3. Produits transformés

Comme décrit précédemment, plus des trois-quarts des volumes de viande de porc sont consommés en France sous forme de produits transformés, issus de pièces anatomiques mais aussi de procédés de transformation très divers : produits entiers ou divisés, crus et séchés, fermentés, ou cuits. La part prépondérante des produits transformés dans la consommation totale de viande et produits de porc et leur grande diversité se retrouve également au niveau européen. Dans ce volet traitant de l'influence des facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits transformés de porc depuis l'élevage jusqu'à la consommation et de leurs effets, nous avons fait le choix de considérer **deux produits contrastés en termes de volume de consommation (en France) mais aussi de procédés de transformation et d'image auprès des consommateurs** : le **jambon cuit supérieur** (qui représente, avec l'épaule, le premier produit de charcuterie-salaison consommé avec 21% des volumes), et le **jambon sec**, produit cru souvent associé à une image festive voire gastronomique (4% des volumes des produits de charcuterie) (IFIP, 2019). En outre, et contrairement au jambon cuit, le jambon sec est emblématique des produits ou **l'élaboration de la qualité est conçue dès l'amont** en intégrant l'ensemble des facteurs de production et les procédés de transformation

Pour chacun de ces produits, nous décrirons le procédé de transformation et indiquerons les principaux facteurs de variation de leurs caractéristiques qualitatives, relevant i) des caractéristiques de la **matière première** utilisée (viande, tissu gras, …) en s'appuyant sur le volet précédent décrivant l'influence des facteurs de production sur les dimensions qualitatives de la viande fraîche et des tissus gras du porc, ou ii) des procédés technologiques et de leurs interactions.

De façon générale, hormis pour des systèmes de production et leurs produits spécifiques (voir ci-dessous des exemples dans le volet sur le jambon sec), les travaux « longitudinaux » visant à faire le lien entre la variabilité de la matière première résultant de contraintes (subies) ou de leviers d'action au niveau de la production des animaux et celle des produits transformés, sont moins nombreux par rapport aux travaux portant sur les propriétés qualitatives des viandes consommées « en frais ». Une des principales raisons est que **dans l'industrie de la viande, l'un des objectifs majeurs est de gommer cette variabilité** et d'adapter, souvent par la formulation, les procédés pour qu'un produit dit standard et de qualité constante soit commercialisé, quelle que soit la saison, l'origine génétique… Cependant, des questions de consommation de viande en lien avec la santé (maladies cardiovasculaires, cancer colorectal…) ou l'intérêt croissant des consommateurs envers la production des animaux (origine, authenticité, respect du bien-être animal) ont conduit à développer des recherches sur des déterminants amont et aval des qualités des produits carnés.

2.4.3.1. Jambon cuit

Procédé de fabrication

La fabrication des pièces cuites inclut un ensemble d'opérations complexes pour aboutir à un produit fini de qualité optimale (aspect, couleur, texture, goût, stabilité (conservation), hygiène), tout en assurant une maîtrise économique (rendements) grâce à une bonne maîtrise des procédés technologiques.

Les principales étapes de fabrication du jambon cuit sont décrites dans le Mémento viandes et charcuteries, Cahier Technologie des pièces cuites (IFIP, 2014) ainsi que dans le Code des Usages de la Charcuterie (IFIP, 2016 ; 2017). Elles sont résumées en Figure 2.4.4. et décrites ci-dessous. La description précise des produits : jambon cuit standard, choix et supérieur, incluant les ingrédients et additifs autorisés pour leur fabrication est indiquée dans le Code des Usages et résumée dans le tableau récapitulatif.

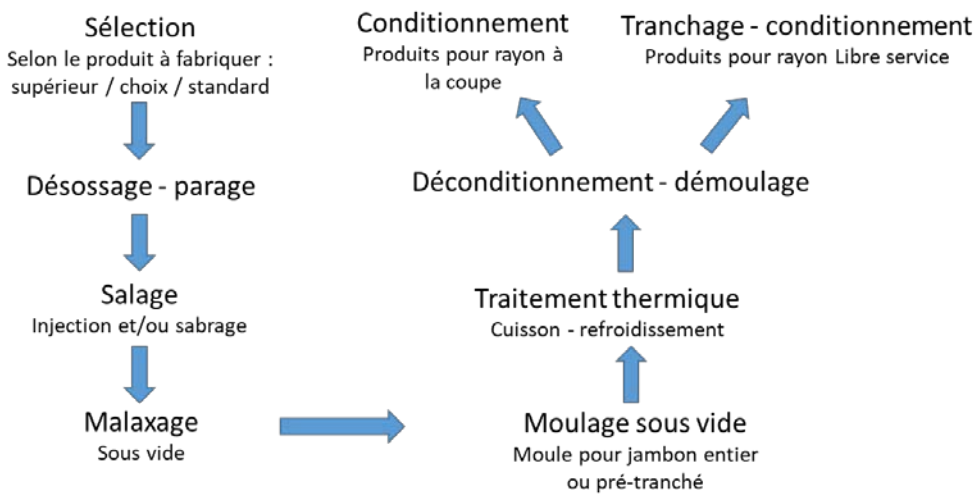


Figure 2.4.4. Schéma du procédé technologique de production du jambon cuit (d'après IFIP (2014))

1) **Sélection et préparation du produit** : les niveaux de préparation et de qualité du produit brut exigés par le transformateur à ses fournisseurs (cahiers des charges) dépendent du produit visé : jambon cuit standard, choix, supérieur…

- Les **niveaux d'élaboration** par le fournisseur vont de la pièce brute avec os et couenne, au jambon désossé avec couenne, jambon découenné désossé dégraissé, et jusqu'à la noix de jambon (jambon 5D : désossé, découenné, sans jarret, dégraissé, dénervé, dépiécé pour l'élaboration de produits prétranchés). Les **matières premières autorisées** sont le « membre supérieur du porc » pouvant inclure la couenne et le gras sous-cutané ; les muscles devant entrer dans la composition dépendent du produit : standard, choix, supérieur

- Les **niveaux de qualité exigés** sont plus élevés pour les produits de « qualité supérieure » relativement aux produits « choix » ou « standard », car les ingrédients et additifs autorisés sont plus limités en nombre et en teneur, et certains ingrédients fonctionnels (fixateurs d'eau, gélifiants) ne sont pas autorisés pour les premiers (ci-dessous ; IFIP (2014 ; 2016)). Une matière première de qualité élevée est également requise pour la fabrication de produits prétranchés.

- Les **critères de sélection** de la matière première incluent :

    - le poids des pièces, pour la fabrication de jambons entiers commercialisés à la coupe
    - les défauts de présentation : présence de pétéchies (tache rouge à violacée liée à une hémorragie mineure) ou d'hématomes
    - l'épaisseur du gras de couverture, qui doit être la plus fine possible pour les jambons cuits découennés et dégraissés (afin de limiter les pertes matière), homogène pour les jambons cuits avec couenne, et de couleur blanche,
    - la couleur des muscles : plus elle est pâle plus la capacité de rétention en eau est faible ; à l'inverse, les muscles trop foncés (viande DFD) présentent un risque microbiologique accru ; par ailleurs la couleur du jambon cuit dépend directement de celle du jambon frais et une hétérogénéité de couleur entre muscles est défavorable pour l'aspect du produit fini
    - le pH ultime, qui reste le meilleur prédicteur de la qualité technologique des viandes. Pour du jambon de qualité supérieure le pH du muscle semi membraneux doit être supérieur à 5,60, alors que des valeurs comprises entre 5,20 et 5,60 sont acceptées pour les jambons « choix » ou « standards »
    - le niveau de déstructuration de la viande (visible uniquement après désossage)

2) **Salage** : il est réalisé par ajout de saumure plus ou moins concentrée (salage « humide » ou « à sec » si le mélange est très concentré) ; la quantité maximale d'eau apportée est d'autant plus faible que le produit visé est d'un niveau de qualité élevé (supérieur vs. choix vs. standard).

- La **saumure** est un mélange homogène dans l'eau d'**ingrédients** fonctionnels :

    - **Sel** : le **chlorure de sodium** est l'ingrédient le plus important quantitativement et qualitativement. Le sodium apporte le goût salé ; les ions chlorures permettent la solubilisation des protéines musculaires et favorisent leur rétention de l'eau constitutive du muscle (pouvoir de rétention d'eau) assurant un bon rendement

technologique au cuisson et au tranchage. Les **sels de substitution** autorisés par le Code des usages (IFIP, 2016) sont le chlorure de potassium, de calcium et de magnésium ; ils doivent être étiquetés en tant qu'**additifs**. La **teneur maximale en sodium** dépend du produit : standard, choix, supérieur ; (IFIP, 2017).

- **Sel nitrité** (**additif**) : outre le rôle technologique du sel, le nitrite exerce un rôle conservateur et contribue à la couleur caractéristique des produits de salaison et à l'arôme. La dose d'emploi maximale est la même pour les 3 types de jambon
- **Sucres** (dextrose, saccharose, lactose…) : ils influencent le développement de la couleur et de la flaveur. La teneur maximale autorisée varie selon le produit
- **Phosphates** (**additifs**) : leur incorporation n'est autorisée que dans le jambon standard (0,5%) et choix (0,2%)
- **Réducteurs et antioxydants (additifs) :** acide ascorbique, acide érythorbique, ascorbate ou érythorbate de sodium ou de potassium. Ils favorisent la formation de nitrosomyoglobine (à partir du sel nitrité), pigment rose caractéristique stabilisé ensuite par le chauffage ; sur les produits cuits, ils limitent les réactions d'oxydation responsables de la dégradation de la couleur et du goût lors de la conservation
- **Aromates, épices, condiments, exhausteurs de goût, arômes, arômes de fumée** : les produits autorisés et teneurs maximales dépendent du type de jambon
- **Les autres ingrédients autorisés** incluent pour le jambon **standard** : la **gélatine** (et couennes), les **protéines de sang de porc** et des **gélifiants (additifs)** .

- L'ordre d'incorporation des ingrédients et le contrôle des **propriétés** (densité, composition, température, pH) de la saumure sont importants pour la bonne réalisation l'étape de salage

- Le salage se réalise selon **différentes méthodes** :

  - Par **immersion** : permet d'utiliser les mentions « à l'ancienne » ou « comme autrefois » pour les jambons de qualité supérieure uniquement ; de longue durée et difficile à maîtriser, elle est réservée à des produits visant une différenciation
  - Par **injection** : la saumure est injectée dans les muscles via des aiguilles creuses ; des injecteurs automatiques multi-aiguilles permettent des productions industrielles
  - Par **sabrage** : les masses musculaires sont perforées pour faciliter la pénétration de la saumure. Adaptée aux muscles de petite taille et au salage à sec, cette méthode est utilisée surtout pour les jambons de qualité supérieure et peut être couplée à l'injection

3) **Malaxage** : il remplace la phase de maturation obtenue en fabrication « traditionnelle » par l'immersion en saumure. Réalisé dans des cuves cylindriques rotatives pendant plusieurs heures (15 à 40 h selon la concentration de la saumure, avec des alternances de phases de rotation et de repos) et au froid (5 à 7°C), il permet de :

   - Favoriser l'**intégration de la saumure** dans les muscles (pénétration du sel dans les fibres musculaires) et la formation de « **limon de malaxage** » (eau, sel, protéines solubilisées) qui va coaguler lors de la cuisson puis former un gel assurant une bonne **tenue de tranche** du produit,
   - Assouplir les muscles, ce qui facilitera le moulage et évitera la formation de trous liés à des poches de gelée dans les tranches,
   - Améliorer les **propriétés sensorielles** des produits : outre l'aspect des produits (aspect et tenue des tranches), le malaxage réalisé sous-vide favorise les réactions du nitrite et de ses dérivés donc la formation de la couleur

4) **Moulage** : la viande malaxée est conditionnée sous-vide puis disposée en moule rigide de taille variable (pièces commercialisées entières ou « barres » de 20 à 25 kg de jambon).

5) **Traitement thermique** : les objectifs sont :

   - la **stabilisation microbiologique** qui dépend du barème de chauffage (temps/ température)
   - la **maîtrise des pertes matière** au chauffage (jus composé d'eau, d'ingrédients ajoutés et de gelée) qui augmentent avec la température et la durée de chauffage
   - la **stabilisation de la tenue de tranche** obtenue par la gélification des protéines musculaires (extraites par le sel et le malaxage) à partir de 65°C, elle s'accroit avec la température
   - le **développement et la stabilisation de la couleur** : la formation de nitrosomyoglobine se poursuit avec l'élévation de la température (toutefois une stabilisation maximale n'est atteinte qu'à partir de 80°C)

- le **développement et la stabilisation de la flaveur** : le chauffage favorise la poursuite des réactions entre composés de la viande et dérivés du nitrite puis leur stabilisation en composés caractéristiques de la flaveur, toutefois celle-ci dépend surtout de la durée de salage (flaveur supérieure pour les produits salés par immersion).

La **cuisson** est réalisée à l'eau, ou par vapeur. Un **fumage** peut être réalisé avant cuisson (mais implique plusieurs manipulations) ou après cuisson (plus aisé mais donne un goût moins marqué). Le **barème de chauffage** (temps/température) dépend de valeur pasteurisatrice cible ainsi que des composants du produit : la température à cœur visée est plus faible pour des pièces sans polyphosphates ou gélifiant (65-66°C) que pour celles qui en contiennent (70°C). La cuisson se fait à température constante ou par paliers

Le **refroidissement** est aussi une phase importante : il doit permettre à la fois la finalisation de l'effet pasteurisateur et la stabilisation de la tenue de tranche, obtenues par une réduction lente de la température jusqu'à environ 30°C, puis plus rapide pour éviter les développements microbiens ; un stockage à 4°C améliore la tenue de tranche et la couleur.

6) **Traitement des jambons cuits** :

- **Jambons entiers** commercialisés au **rayon coupe**: après cuisson ils sont démoulés, l'emballage et les pertes de cuisson ôtés, puis ils sont reconditionnés sous-vide et stockés en chambre froide avant commercialisation
- **Jambons commercialisés tranchés** : en sortie de cuisson les emballages sont percés pour favoriser l'écoulement du jus de cuisson avant sa gélification ; les barres de jambon sont conservées en chambre froide jusqu'à 7 j pour stabiliser la couleur et la tenue de tranche, puis démoulées et refroidies superficiellement pour favoriser le tranchage à haute cadence, réalisé dans une salle à environnement maîtrisé. Le poids des unités de vente consommateurs est contrôlé et les produits conditionnés sous mélange d'azote et de CO_2 pour assurer leur conservation et limiter l'oxydation.

Propriétés commerciales du produit brut

Les **caractéristiques commerciales** de la matière première destinée à la fabrication de jambon cuit dépendent du **niveau d'élaboration des produits** par le fournisseur, ainsi que des **exigences de qualité** des produits définies par le fabricant dans son cahier des charges (critères et valeurs seuil d'acceptation ou de rejet).

Les critères majeurs de sélection de la matière première cités ci-dessus : poids de la pièce, défauts de présentation, épaisseur de gras de couverture, couleur des muscles, pH ultime, niveau de déstructuration, sont déterminés par de nombreux facteurs de production liés à l'animal lui-même, sa conduite d'élevage et l'ensemble des conditions d'abattage et de transformation du muscle en viande, comme décrit précédemment. Ces principales relations sont représentées en figure 2.4.4.

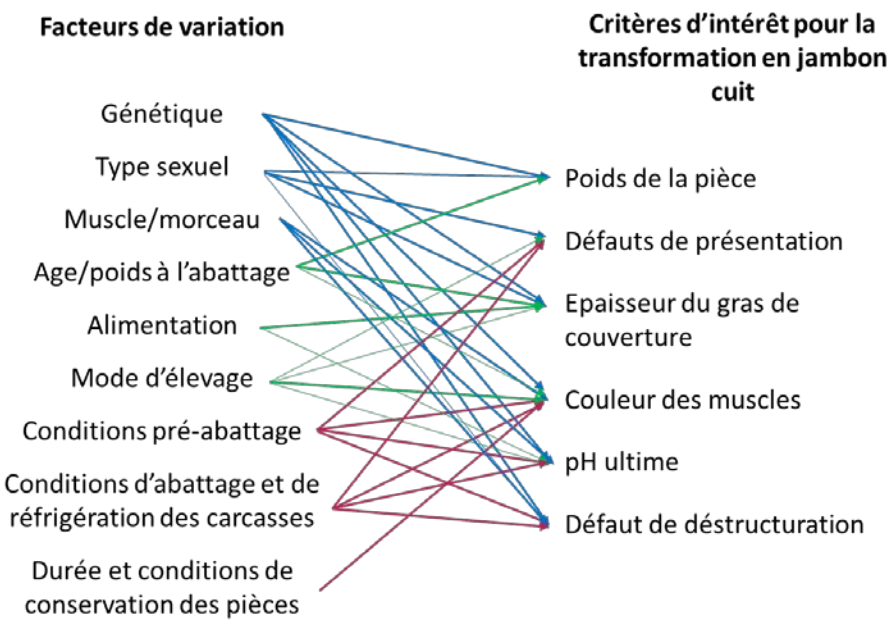


Figure 2.4.5. Influence des facteurs de variation sur les caractéristiques majeures de la matière première destinée à la fabrication de jambon cuit. Facteurs liés à l'animal (bleu), aux pratiques d'élevage (vert) ou d'abattage et élaboration des carcasses et des viandes (rouge), effet modéré (trait fin) ou élevé (trait épais)

Propriétés du produit fini

Les caractéristiques technologiques, organoleptiques (aspect, couleur, texture, flaveur) nutritionnelles, sanitaires, d'usage et d'image du jambon cuit résultent des **caractéristiques de la matière première**, déterminées par les facteurs de production depuis l'origine génétique de l'animal jusqu'à la l'obtention du produit viande et des **procédés de transformation** dont les étapes sont décrites ci-dessus. Les effets de ces différents facteurs sont synthétisés en figure 2.4.5, et certains d'entre eux seront développés ci-dessous.

Comme décrit dans le volet « Caractéristiques technologiques de la viande de porc », les déterminants essentiels des **rendements de fabrication et de tranchage** du jambon cuit sont le **pouvoir de rétention en eau** (dégradé en présence du défaut PSE) et l'absence de **déstructuration** des muscles. Ces paramètres, en partie associés, dépendent étroitement de la vitesse et de l'amplitude de chute du pH post mortem, eux-mêmes sous la dépendance de nombreux facteurs amont, notamment le type génétique et les conditions de pré-abattage et d'abattage des animaux puis de refroidissement des carcasses (Monin, 2003). Concernant la déstructuration, discernable seulement lors du désossage, de nouvelles méthodes spectrales de prédiction du défaut sont actuellement développées dans l'optique de **trier en amont la matière première** et d'appliquer en transformation des **formulations qui tiendraient compte de la variabilité** de la matière première. La **spectroscopie proche infra-rouge (SPIR)** permet, à partir d'une mesure réalisée en surface du muscle Semimembranosus, de prédire sur jambon désossé la présence des défauts déstructuré ou PSE de façon plus objective et précise que l'évaluation visuelle, ainsi que l'altération consécutive des rendements de tranchage et d'aspect de tranche (trous, texture « pommade ») du produit cuit (voir figure 2.4.6) avec un taux de bon classement de 84 à 90% (Neyrinck *et al.*, 2015; Vautier *et al.*, 2013). La détection sur jambon non désossé, plus intéressante pour les industriels, est aussi possible toutefois le taux de bon classement (60 à 70%) doit encore être amélioré, ce qui pourrait être obtenu en élargissant le spectre à la région visible, afin de pouvoir être utilisée en industrie (Neyrinck *et al.*, 2015 ; Vautier *et al.*, 2017).

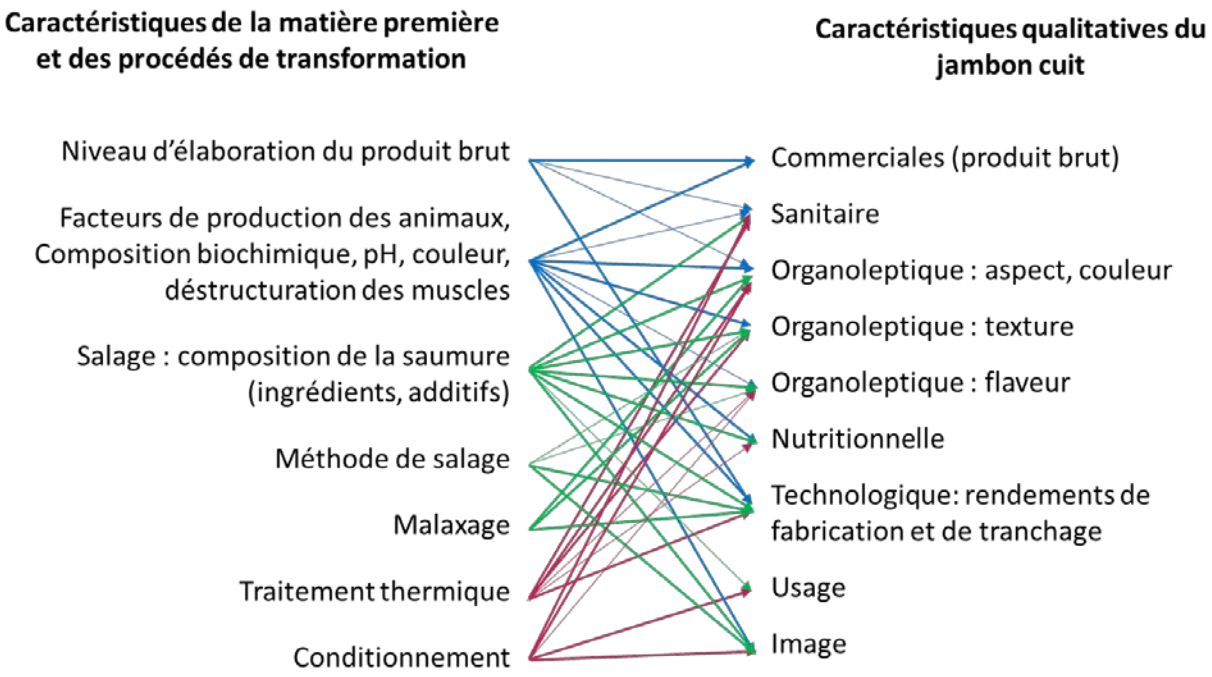


Figure 2.4.5. Influence des caractéristiques de la matière première (en bleu) et des procédés de transformation (vert et rouge) sur les caractéristiques qualitatives du jambon cuit (sauf caractéristiques commerciales : sur produit brut), effet modéré (trait fin) ou élevé (trait épais)

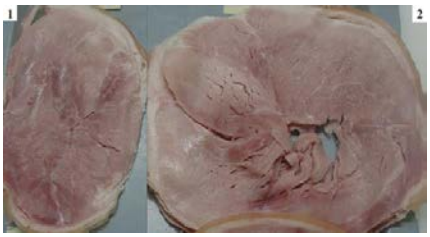


Figure 2.4.6. 1 : jambon cuit normal, 2 : jambon cuit présentant des défauts de tranche (Neyrinck *et al.*, 2015)

Outre les caractéristiques de la matière première, les **rendements de fabrication et de tranchage du jambon cuit** sont déterminés par les **paramètres technologiques lors des étapes successives d'élaboration du produit** : salage, malaxage, traitement thermique. En particulier, la nature et la teneur des ingrédients et additifs inclus lors du saumurage, qui dépendent des produits visés (jambon cuit standard, choix ou supérieur), jouent un rôle essentiel pour retenir l'eau dans le produit lors de la cuisson et augmenter les rendements de fabrication. L'étape de malaxage est également cruciale pour l'obtention de bons rendements de cuisson et de tranchage (rôle du « limon de malaxage »). Le traitement thermique (durée/température) doit être optimisé pour limiter les pertes matière, tout en garantissant un bon niveau hygiénique (stabilisation microbienne) et une bonne tenue des tranches en particulier en vue du tranchage industriel.

Les **propriétés sensorielles** du jambon cuit : aspect (couleur, tenue de tranche), texture et flaveur, résultent également des interactions entre les propriétés de la matière première et les procédés de transformation, ainsi que du mode et de la durée de conditionnement des produits. De façon générale, **de bonnes aptitudes technologiques** (bon pouvoir de rétention en eau, absence de déstructuration) **sont associées à un aspect et une texture du produit favorables pour le consommateur** : couleur rose, absence de défauts de tranche (trous, zones « pommade »), texture moelleuse et perception des fibres de la viande. Les facteurs de production agissant sur les paramètres tels que la couleur, le pH, la rétention en eau, etc. de la viande fraîche influencent donc également les propriétés sensorielles du jambon cuit. Les autres facteurs de variation de ces dimensions sensorielles sont bien sûr le **type de matière première utilisée,** l'ajout éventuel d'**ingrédients** et **additifs** qui varient selon les catégories de jambon cuit , les paramètres des étapes de salage, malaxage, cuisson, et le mode de conditionnement. La flaveur du jambon cuit est globalement assez peu intense relativement à des produits cuits consommés chauds ou des produits de charcuterie secs, et dépend surtout des procédés de transformation notamment les ingrédients et additifs utilisés. Les facteurs « amont » de production des animaux jouent très peu, et le risque d'odeurs de viande de mâle entier est faible sur ce produit qui est acheté déjà cuit, consommé froid, et qui contient peu de lipides. Chevillon *et al*. (2010) rapportent ainsi des niveaux élevés d'acceptabilité par des consommateurs (goût, odeur, appréciation globale, intention de reconsommation), et équivalents entre des jambons cuits issus de viandes de porcs mâles entiers (à risque élevé d'odeur pour l'androsténone dans leur étude), femelles ou mâles castrés, malgré l'odeur à l'ouverture du conditionnement jugée moins agréable pour les jambons de mâles entiers. Par ailleurs, la flaveur du jambon cuit peut être altérée en raison d'une oxydation des lipides favorisée par une durée et des conditions de conservation non optimales.

Tableau 2.4.2. Les différentes catégories de jambon cuit d'après le Code des Usages de la Charcuterie et des Conserves de Viande (IFIP, 2016 ; 2017)[a]

Produit	Standard	Choix	Supérieur
Matière première : membre postérieur du porc (avec couenne et gras sous-cutané)	+	au moins une noix [b]	une ou les trois noix [c]
Ingrédients : teneur (ou dose d'emploi) maximale dans le produit tel que commercialisé, %			
Sel	3,0	2,5	2,0
Eau, glace, bouillon, saumure	+	+	+
Sucres (y compris lactose)	3,0	2,0	0,5
Gélatine G ou F, couennes en l'état ou déshydratées [d]	3,0	-	-

Gélatine G		+	+
Protéines de sang de porc [d]	3,0	-	-
Ferments	+	+	+
Aromates, épices, vins, alcools, liqueurs, condiments, arômes, arômes de fumée (dose maximale de l'ensemble incluant éventuels exhausteurs de goût) [d]	+	+ (1,0)	+ (0,5)
Additifs : dose maximale d'emploi			
Nitrite (de sodium ou potassium), mg/kg	120	120	120
Acide ascorbique, acide érythorbique, ascorbate et érythorbate de sodium	+	+	+
Extrait de romarin	+	+	+
Phosphates, %	0,5	0,2	-
Acide acétique, lactique, citrique, tartrique	+	+	-
Acétate de sodium, potassium, calcium	+	+	-
Lactate de sodium, potassium	+	+	-
Citrate de sodium, potassium, calcium	+	+	-
Gélifiants: carraghénanes, algues Euchema transformées, farine de caroube, gomme xanthane	0,8	-	-
Exhausteurs de goût : acide glutamique et sels	+	+	-
acide guanylique, inosinique et sels	+	-	-
Caractéristiques physiques et sensorielles	Bloc à trancher ou tranches de tenue suffisante, de couleur rose		
Description complémentaire		Goût non masqué par assaisonnement, peu salé, pas de goût acide ou d'âcreté, texture moelleuse, perception fibre de viande	
Caractéristiques chimiques minimales ou maximales, % [e]			
Humidité du produit dégraissé	≤ 78		
PCL: protéines non collagéniques du produit délipidé		≥ 17	≥ 20
Sucres solubles totaux	≤ 3,5	≤ 2,5	≤ 1,0
Phosphates ajoutés		≤ 0,2	0
Critères nutritionnels			
Matière grasse totale, g/100 g	≤ 8,5	≤ 6,0	≤ 4,0
Sodium, mg/100 g	≤ 1 200	≤ 1 000	≤ 830

[a] Voir le Code des Usages pour le descriptif exhaustif de chaque produit
[b] Noix : pièces de jambon préparées à partir des muscles : couturier, pectiné, adducteur, demi-membraneux, droit interne, long vaste, semitendineux, vaste externe, vaste interne et droit antérieur
[c] Les 3 noix si d'autres muscles du membre postérieur sont utilisés
[d] Exprimé en matière sèche sur le produit tel quel commercialisé
[e] Le mode de préparation des échantillons pour l'analyse est décrit dans le code des usages

Les **caractéristiques nutritionnelles** du jambon cuit dépendent essentiellement de la **composition de la matière première** ainsi que des **ingrédients et additifs** utilisés lors de la fabrication du produit. Les propriétés nutritionnelles de la matière première : teneur et nature des lipides, vitamines et minéraux antioxydants contenus dans les muscles du jambon (et le tissu gras dans le cas des jambons commercialisés avec couenne) sont déterminées par plusieurs facteurs de production, dont majoritairement la conduite alimentaire en ce qui concerne le profil en acides gras et les teneurs en antioxydants. Les stratégies **d'augmentation des teneurs en AGPI n-3** des produits de porc sont bien valorisées sur un produit comme le jambon cuit, où le risque d'altération de la flaveur des produits suite à l'oxydation lipidique est plus limité comparativement aux charcuteries sèches.

Comme indiqué en tableau 2.4.1, les **ingrédients et additifs utilisés**, ainsi que la **composition chimique réglementaire** et par conséquent les propriétés nutritionnelles du jambon cuit varient fortement selon les catégories de produit : standard, choix, supérieur. Ainsi, les teneurs maximales en matières grasses varient entre 8,5 et 4%, en sucres entre 3,5 et 1%, et en sel entre 3,0 et 2,0%, entre le jambon cuit standard et supérieur, le jambon choix étant intermédiaire. Les objectifs nutritionnels de **réduction de la teneur en sel** des produits alimentaires qui concerne fortement les charcuteries a fait évoluer les pratiques des transformateurs qui proposent une offre croissante en jambons cuit (généralement de qualité supérieure) à teneur en sel réduite (-25%). L'élaboration de ce type de produit nécessite une matière première aux propriétés technologiques élevées et une maîtrise encore plus importante par l'industriel des différentes étapes de transformation afin de conserver des rendements de fabrication satisfaisants.

En termes de **caractéristiques sanitaires**, une question croissante concernant le jambon cuit comme les produits de charcuterie en général, est l'impact des nitrites sur la santé (voir chapitre 3) et les possibilités de réduire leur teneur dans les produits de charcuterie. Le nitrite est utilisé de très longue date dans les charcuteries pour i) limiter le risque de développement de bactéries pathogènes notamment *Clostridium botulinum* (Petit *et al.*, 2019) et *Clostridium perfringens* (Redondo-Solano *et al.*, 2013), cette fonction bactériostatique d'intérêt majeur étant reconnue par la réglementation européenne qui classe le nitrite comme conservateur, ii) contribuer à développer et stabiliser la couleur, par son action antioxydante et la formation de nitrosomyoglobine, et iii) contribuer à la flaveur des charcuteries et à la note aromatique spécifique du jambon cuit (Honikel, 2008 ; Sebranek et Bacus, 2007 ; Sindelar et Milkowski, 2011 ; Thomas *et al.*, 2013). Cependant, le nitrite résiduel en interaction avec le fer héminique des charcuteries génère des composés N-nitrosés (NOC) dont la plupart sont cancérigènes. La néoformation fécale des NOC lors de consommation de charcuterie riche en fer héminique serait associée à la promotion de lésions précancéreuses coliques dans un modèle animal de carcinogenèse colorectale (Santarelli *et al.*, 2008). Ces effets néfastes pourraient toutefois être limités par l'ajout de calcium ou d'antioxydants (vitamine E, polyphénols) dans l'alimentation de ces animaux (Bastide *et al.*, 2017; Pierre *et al.*, 2013).

La **réduction des apports en nitrites** dans les charcuteries à 40 à 60 mg/kg, voire leur suppression, afin de réduire les risques associés à l'apparition des NOC dans les produits et pendant la digestion, constitue un enjeu majeur pour les industriels, qui doivent maîtriser en premier lieu la qualité microbiologique des produits (en particulier, absence de *Clostridium botulinum, Bacillus cereus* et *Listeria monocytogenes* dans le jambon cuit). Des **jambons cuits « sans sel nitrité », « conservation sans nitrite »** ou **« zéro nitrite »** sont dorénavant commercialisés par les industriels : il s'agit de produits sans ajout de nitrites lors de leur fabrication, « ultra-frais », qui se conservent donc moins longtemps après fabrication. Toutefois, certaines recettes incluent des bouillons ou jus de légumes (céleri…) et des ferments lactiques ajoutés pour leur rôle biochimique de réduction des nitrates contenus dans le bouillon de légumes en nitrites. Ces jambons ne sont donc pas exempts de nitrites, et présentent une couleur rose caractéristique. Les produits « zéro nitrite », élaborés sans addition de nitrites ou de nitrates via des bouillons ou jus de légumes, ont une couleur plus grise (se rapprochant de celle de la viande de porc cuite) et se conservent moins longtemps (une dizaine de jours, contre 3 à 4 semaines lors d'ajout de sel nitrité). Ces **nouveaux produits**, apparus progressivement sur le marché depuis 2015, relèvent d'**initiatives privées**. Pour ces produits, il est important de développer des programmes de recherche pour évaluer les conséquences sur la formation des NOC. Conformément au droit de la consommation, ces allégations relatives aux nitrites ne doivent pas induire les consommateurs en erreur. Cependant, la réglementation n'encadre pas précisément ces allégations, en particulier sur ce que cela implique en termes de teneur en nitrite des produits consommés. Dans l'intérêt des consommateurs, une clarification de cet encadrement par les pouvoirs publics pourrait être opportune.

Le jambon cuit peut également être à l'origine de cas listérioses (Hachler *et al.*, 2013). La réduction en sel des produits augmente la vitesse de ce pathogène (Duret *et al.*, 2014) ainsi que des flores d'altération (Duret *et al.*, 2019). Cette augmentation de la croissance de *L. monocytogenes* amène les industriels à utiliser d'autres mesures de maitrise (atmosphère modifiée, réduction de la durée de vie) afin de garantir le niveau de sécurité des produits à teneur en sel réduite (Afssa, 2010).

Par ailleurs, les produits de charcuterie sont utilisés comme ingrédients pour la fabrication de pizza. Or des **amines hétérocycliques** (HA) sont formées sous forme de produits de réaction de Maillard dans la croûte de produits carnés au cours de processus de chauffage. Les travaux de Gibis et Weiss (2013) ont porté sur la production d'amines hétérocycliques dans deux garnitures de pizza typiques - du salami et du jambon cuit - après la cuisson de pizzas surgelées à des températures maximales et minimales de 250 et 230°C, respectivement. Après la cuisson pendant 12 min, différentes amines hétérocycliques ont été trouvées dans le **jambon surcuit :** quinoxalines (MeIQx, DiMeIQx), pyridine (PhIP), beta-carbolines. Dans le salami surcuit, seuls les bêta-carbolines ont été détectés, à des doses toutefois supérieures à celles du jambon surcuit. Les teneurs en MeIQx et en DiMeIQx ont été augmentées lorsque le temps de cuisson à 230°C a été augmenté de 15 (recommandation du fabricant) à 18 minutes. La MeIQx s'est formée dans le salami lorsque le temps de chauffage a été prolongé à 18 min. De plus, des concentrations plus élevées de PhIP dans des tranches de **salami ou de jambon** ont été observées lorsque la température de cuisson était de 250°C au lieu de 230°C, pour un temps de cuisson de 12 minutes. Cependant, des tests sensoriels ont montré que les dégustateurs préféraient les pizzas cuites plus longtemps en raison d'une croustillance accrue. Ainsi, ces résultats montrent que les garnitures de pizza, telles que le jambon et le salami, peuvent conduire à une formation importante d'amines hétérocycliques, le jambon étant particulièrement vulnérable par rapport au salami. La formation de ces composés augmente avec la durée de cuisson et de la température. Ces données sont importantes pour apporter des recommandations en lien avec la santé des consommateurs (voir chapitre 3).

Pour les consommateurs, le jambon cuit présente deux **propriétés d'usage** d'intérêt majeur : la **praticité d'utilisation** (rien à préparer !) et la **durée de conservation** : après achat, jusqu'à près de 4 semaines à +4°C pour un produit conditionné sous atmosphère modifiée. La durée de conservation du produit dépend fortement de l'éclairage et des conditions d'emballage. Des travaux ont été conduits par Haile *et al*. (2013) sur la stabilité de la couleur du jambon cuit et sa stabilité oxydative lipidique, une fois tranché et stocké à 4°°C pendant 21 ou 35 jours. La perte de couleur, estimée par la réduction de l'indice de rouge a* et de la teneur en nitrosomyoglobine et l'augmentation de la luminosité (L*) et de la teneur en myoglobine oxydée, était plus importante pour les produits emballés sous film transparent et perméable aux gaz et maintenus à la lumière que les produits emballés de la même façon et conservés à l'obscurité. La décoloration dépendait davantage de processus photochimiques que de la durée de stockage à l'obscurité et des types d'emballage. La stabilité de la couleur était accrue pour les produits emballés sous atmosphère modifiée, avec peu d'oxygène résiduel. Par ailleurs, l'oxydation des lipides n'était pas modifiée significativement par l'exposition à la lumière, mais était augmentée avec la durée de stockage dans l'obscurité, même pour une courte durée de conservation (Haile *et al.*, 2013).

Concernant les **caractéristiques d'image**, **l'évolution de l'offre** en produits de charcuterie dont le jambon cuit montre que la filière et en particulier les industriels du secteur de la transformation prennent en compte les **attentes des consommateurs** concernant le **mode de production des animaux et d'élaboration des produits** et sont assez dynamiques pour y répondre : ils proposent des jambons bio, de porcs élevés sans antibiotique (après le sevrage), ou des produits à teneur réduite en sel ou, plus récemment, sans nitrites ajoutés. La forte concurrence entre les industriels du secteur et la réduction récente (depuis 2015) mais significative de consommation de jambon cuit en France (Agreste, 2018a) stimule l'innovation. Par ailleurs, l'évolution dans le domaine des emballages des produits alimentaires concerne fortement le jambon cuit, produit acheté majoritairement sous forme préemballée en barquettes de 2, 4 ou 6 tranches, avec la recherche d'emballages moins épais et l'utilisation de matériaux recyclables.

2.4.3.2. Jambon sec

Historiquement, le salage et le séchage des jambons avaient pour objectif principal de conserver la viande lorsque le froid n'existait pas. Avec le développement des modes de conservation, les procédés de fabrication ont évolué dans l'optique d'améliorer les qualités organoleptiques et nutritionnelles des produits. En Europe, l'Espagne et l'Italie (à parts égales) ainsi que la France dans une moindre mesure, sont les principaux producteurs et consommateurs de jambon sec.

Procédé de fabrication

La fabrication du jambon sec inclut différentes étapes mais requiert un nombre limité d'ingrédients et peu de technologie contrairement au jambon cuit, et fait encore beaucoup appel au savoir-faire des transformateurs aux différentes étapes de son élaboration. Plus encore que pour la majorité des produits de salaisons, la qualité du jambon sec dépend de la **qualité de la matière première**, ainsi que du **procédé de transformation**, en particulier le **mélange salant** utilisé et les **durées et**

conditions d'ambiance aux différentes étapes du procédé (Arnau et Picouet, 2007 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012 ; Petrova *et al.*, 2015; Virgili et Schivazappa, 2002). Les ingrédients classiquement utilisés que sont le sel sec (absence réglementaire d'utilisation de saumure) et le nitrate ont pour fonction de **stabiliser le produit au niveau microbiologique**, d'autant plus que ce type de transformation ne fait appel à **aucune autre opération assainissante** telle que la cuisson ou l'acidification par fermentation (comme pour le saucisson sec). La **conservation** du jambon sec repose sur **l'abaissement de l'activité de l'eau** (**aw**) obtenue par la pénétration du sel dans les masses musculaires et la **perte d'eau par séchage**. L'objectif de la transformation est d'obtenir un produit qui puisse être maintenu à température ambiante sans compromettre la santé des consommateurs, et qui présente des caractéristiques sensorielles (couleur, texture, flaveur) désirées : en effet ces propriétés, en particulier la texture et le goût, sont des déterminants majeurs de la satisfaction des consommateurs de jambon sec, comparé à la valeur nutritionnelle, au prix ou la praticité du produit (Resano *et al.*, 2011).

Les différentes étapes de l'élaboration du jambon sec sont décrites dans le Mémento viandes et charcuteries, Cahier Technologie du jambon sec (IFIP, 2014) qui s'appuie sur la synthèse de Arnau et Picouet (2007) ainsi que dans le Code des Usages de la Charcuterie (IFIP, 2016 ; 2017). Elles sont résumées en Figure 27 et explicitées ci-dessous.

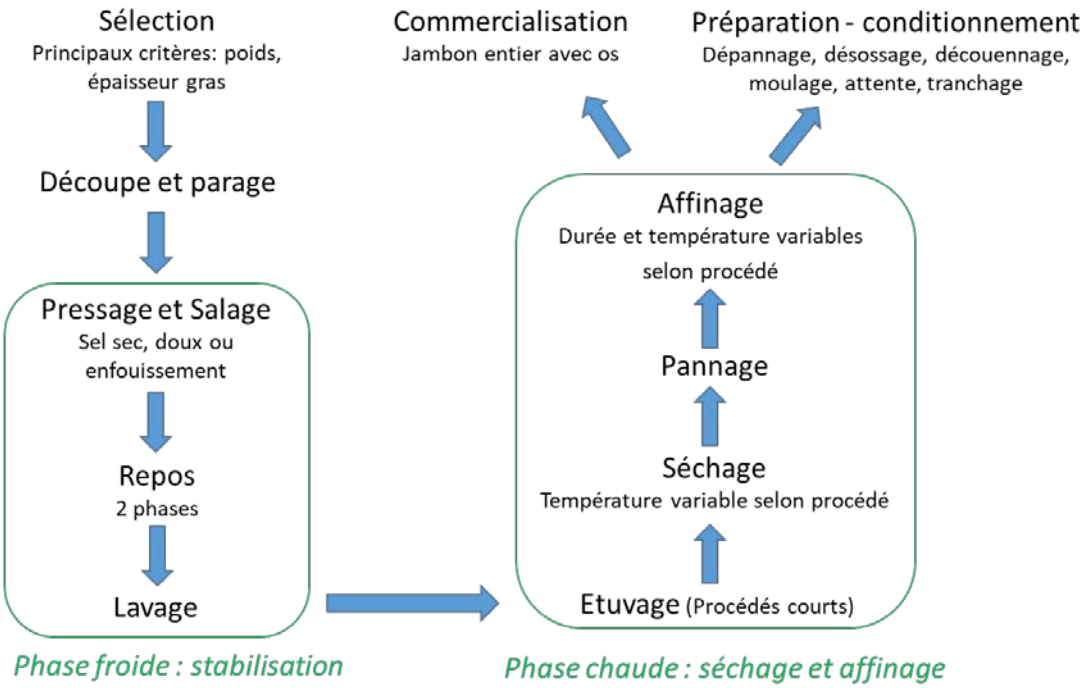


Figure 2.4.7. Schéma du procédé technologique de production du jambon sec (d'après Arnau et Picouet (2007) et IFIP (2014))

Au niveau réglementaire (Code des Usages), trois catégories de jambon sec : cru (ou cru de pays), sec (ou sel sec), et sec (ou sel sec) supérieur ou traditionnel, se distinguent en France ; leurs principales caractéristiques sont résumées dans le Tableau 2.4.3.

1) Sélection et préparation (découpe et parage) du produit

Les niveaux de qualité et de préparation du produit brut exigés par les transformateurs des fournisseurs dépendent du produit visé : jambon cru, sec, sec supérieur, de **spécifications de cahiers des charges de SIQO** le cas échéant, et des compétences disponibles en entreprise (main d'œuvre qualifiée pour le parage).

- **Critères de sélection de la matière première** généralement considérés :
  - Le **poids** minimum au salage (= du jambon paré) est généralement défini, et réglementaire pour les catégories « sec » et « sec supérieur » (Tableau 2.4.3.) ; les jambons sont triés par catégorie de poids pour définir des **classes de salage** (quantité de sel / durée)
  - **Epaisseur de gras** généralement ≥ 15 mm (parfois ≥ 10 mm). Le poids et l'épaisseur de gras sont les critères **les plus importants** car ils conditionnent la **durée** des différentes phases du procédé, le **rendement** de fabrication (séchage, parage) et les **caractéristiques organoleptiques** du produit final.
  - **Défauts d'aspect** (pétéchies, hématomes sur couenne ou maigre, trous et déchirures, défauts d'épilation…) : ils sont importants à déceler car se retrouvent généralement sur le produit fini.

- **Qualité technologique de la viande** : les principaux critères sont le **pH,** qui influence le pouvoir de rétention en eau (voir 2.4.2.5) ainsi l'activité des enzymes protéolytiques et lipolytiques lors de la transformation, et la **couleur**. Un pH trop élevé (≥ 6,10) a pour conséquence moins d'eau libre en surface pour solubiliser le sel et favoriser sa pénétration, une faible propension à libérer l'eau lors du séchage, et un risque accru de développement de flore microbienne indésirable (putréfaction autour de l'os par exemple). A l'inverse les viandes acides (pH ≤ 5,50) risquent d'entraîner un excès de salage, des défauts de texture (produits mous) en raison d'une protéolyse trop importante et une couleur pâle et hétérogène (Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Virgili et Schivazappa, 2002). Un pH bas peut aussi favoriser le décollement entre masses musculaires et l'infiltration de flores putréfiantes ou de moisissures. Selon les auteurs, la **gamme idéale de pH est 5,50 à 6,10** (IFIP, 2014) ou **5,60 à 6,20** (Candek-Potokar et Skrlep, 2012) dans le muscle semi-membraneux. Le tri des jambons se fait sur le pH, ou plus simplement sur la couleur (réglette japonaise) considérant la forte corrélation entre ces deux caractères.
- **Qualité technologique du gras** : elle joue un rôle majeur sur les propriétés organoleptiques du produit fini. Le gras doit être ferme, peu fondant aux températures de traitement, de couleur blanche, sans odeur anormale et sans risque de rancissement : sa **composition en AG** est donc essentielle, il doit être riche en AGS et pauvre en AGPI (Hugo et Roodt, 2007 ; Schwob *et al.*, 2020). Certains cahiers des charges pour la production de jambons secs imposent une apport maximal d'acide linoléique dans l'alimentation ou interdisent l'utilisation de certaines matières premières qui en sont riches (maïs ; voir parties 2.4.2.5 et 2.8).
- **Indicateurs de qualité sensorielle du produit fini :** La teneur en lipides intramusculaires, qui influence favorablement la texture et la flaveur ainsi que le potentiel protéolytique qui affecte la texture s'il est trop élevé, constituent des indicateurs d'intérêt des propriétés sensorielles (Arnau et Picouet, 2007 ; Morales *et al.*, 2013), mais ne sont pas déterminés en routine sur le produit frais pour trier les jambons.
- **Conditionnement et délai de livraison** : l'acheminement des jambons à plat est à privilégier pour limiter l'écrasement, et dans un délai court afin de permettre un salage moins de 72 h post-mortem, idéalement 48 h. Le maintien des pièces à basse température est essentiel pour limiter les risques microbiens ultérieurs, avec un objectif de température à cœur ≤ 3°C à la mise au sel.
- **Les viandes congelées** rapidement après abattage peuvent être utilisées mais nécessitent d'adapter les paramètres de salage (durée plus courte en raison de la plus grande solubilisation et diffusion du sel dans la viande congelée).

- **Découpe et parage** : l'approvisionnement est réalisé en jambons de coupe « sel-sec » (coupe brute sans le pied sauf cas particulier) qui nécessite du transformateur un parage en coupe « Parme » plus élaborée (ablation de certaines parties osseuses et coupe arrondie) avant salage, ou bien directement en coupe Parme. Pour le salaisonnier les intérêts de la coupe sel-sec sont d'ordre qualitatif : salage immédiat après parage (meilleure cohésion et moindre dessèchement ou exsudation des masses musculaires) et maîtrise de la régularité du parage ; toutefois cela implique de disposer de la main d'œuvre qualifiée et de pouvoir valoriser les coproduits.

2) Salage

- Avant salage le jambon est **pressé** (généralement de façon mécanique) afin d'éliminer le sang résiduel de l'artère et de la veine fémorale et éviter le développement de flore indésirable ; il permet aussi de réduire l'épaisseur du jambon et de favoriser la pénétration du sel.

- L'objectif du **salage** est de permettre au jambon d'absorber au niveau des muscles superficiels la quantité de sel nécessaire à sa stabilisation, à basse température. Il existe deux techniques :
    - **Salage doux** (technique italienne, la plus utilisée en France notamment pour le Jambon de Bayonne) : on apporte en une ou deux fois une quantité de sel proportionnelle au poids du jambon frais (50 à 60 g/kg). Le jambon est d'abord frotté mécaniquement avec un mélange salant puis le sel est déposé sur les masses musculaires ainsi que dans la tête du fémur pour éviter la putréfaction. Les jambons sont entreposés à plat dans un saloir (température ≤ 3°C, humidité relative 85 à 95%) pendant 14 à 21 jours selon leur taille.
    - **Salage par enfouissement** (technique espagnole utilisée pour les jambons STG Serrano et AOP Ibériques) : cette technique consiste à recouvrir, partiellement ou complètement, les jambons par le sel. Ils sont d'abord frottés d'un mélange de sel, sucre et salpêtre avant d'être empilés par couches successives, pendant une durée d'environ 1 à 1,5 jour/kg.

- **Ingrédients et additifs autorisés** :

- **Sel** (certains SIQO précisent l'origine du sel),
- **Sucres** : exclusivement du saccharose et/ou dextrose pour les catégories sec et supérieur, autorisation du lactose pour le jambon cru (voir Tableau 2.4.3.). Le sucre est utilisé surtout pour les jambons de transformation courte (≤ 7 mois) et subissant un étuvage ; il apporte une douceur gustative et favorise la formation de nitrosomyoglobine qui donne une couleur rose au produit fini.
- Aromates, épices, vins, alcools, liqueurs, condiments, arômes, arômes de fumée, ferments : autorisés dans les trois catégories de jambon cru / sec.
- **Nitrate de sodium (Na) ou de potassium (K) (additif - conservateur)** : autorisé dans les trois catégories de jambon cru/sec (dose résiduelle ≤ 200 mg/kg nitrate Na) et en absence d'ajout de nitrite. Le nitrate est transformé en nitrite par l'action bactérienne. Il est utilisé pour sa fonction bactériostatique (important notamment vis-à-vis de *Clostridium botulinum*) et le développement et la stabilisation de la couleur (nitrosomyoglobine).
- **Nitrite de sodium ou de potassium :** autorisé seulement pour l'élaboration du « jambon cru » (≤ 120 mg/kg) en association avec du nitrate de sodium (≤ 120 mg/kg ; Tableau 2.4.3.). **La réglementation française (Code des Usages) est plus stricte que la réglementation européenne** qui autorise l'incorporation de nitrite jusqu'à 150 mg/kg de nitrite de sodium.
- **Chlorure** de potassium, calcium ou magnésium **(additif)**
- **Aucun autre additif** n'est autorisé pour les catégories sec et supérieur. Pour le jambon cru les acides **ascorbique** (qui accélère la transformation du nitrite en oxyde nitrique et limite la formation de nitrosamines), érythorbique, des acides organiques, extraits de romarin, acétate, citrate, lactate (additifs) sont autorisés (Tableau 2.4.3.).

- **Le mélange salant** est généralement humidifié pour favoriser sa diffusion ; il contient classiquement en France 89% de sel grené, 1% de nitrate de potassium et 10% d'eau.

- En **sortie de saloir** les jambons sont brossés pour enlever le sel résiduel. Un **lavage** peut être pratiqué à ce stade pour les jambons salés par enfouissement.

3) **Repos** : cette phase permet **la diffusion et l'homogénéisation du sel** absorbé par la « grosse noix » (semi-membraneux) dans les différentes masses musculaires et constitue une étape de **dessiccation** importante : pour les techniques de salage doux (italienne ou française) le jambon perd alors la moitié de sa perte totale d'eau, soit 15 à 17% de son poids initial. Avec la **diminution du taux de sel** dans les jambons secs, le repos est devenu la **phase la plus importante de l'élaboration du produit**. Le repos comprend deux phases :

- **Pré-repos ou premier repos**: l'objectif est une déshydratation assez forte, le produit contenant encore beaucoup d'eau, pour limiter la croissance des micro-organismes indésirables; cette phase est limitée en durée (environ 2 semaines) afin d'éviter un croûtage en surface.

- **Repos ou 2ème repos**: le rythme de dessiccation est ralenti (humidité relative plus élevée, coefficient de brassage réduit). La maîtrise de cette étape conditionne fortement la réussite du procédé. Cette phase dure 5 à 10 semaines ou plus (jusqu'à 3 mois de repos au total pour les jambons ibériques ou de Parme) : la durée de repos dépend du poids du jambon, de la surface de la partie maigre extérieure, de la teneur en gras inter et intramusculaire (qui gêne la diffusion du sel) et de la teneur en sel, dont la réduction implique une plus grande baisse d'humidité pendant cette phase « froide » de la transformation, obtenue par allongement du repos (voir Figure 27)

- Les jambons sont **lavés** en fin de repos (s'ils n'ont pas été lavés en fin de salage) pour enlever les cristaux de sel et les éventuelles traces de moisissure sur la couenne.

4) **Etuvage.** Facultatif, il est surtout pratiqué en France pour les produits de transformation inférieure à 9 mois afin d'accélérer les phénomènes enzymatiques responsables du développement de la **flaveur** et le développement et la stabilisation de la **couleur**. L'étuvage se fait généralement à 20-22°C pendant une semaine. La perte de poids est limitée à 2%-3%.

5) **Séchage.** L'objectif est de poursuivre la dessiccation du produit afin de réduire son aw, laissant se poursuivre les phénomènes de protéolyse et de lipolyse (voir ci-dessous) qui conditionnent la flaveur du produit. Le séchage est réalisé à une **humidité relative** (HR) assez élevée (généralement 65 à 80%) et une **vitesse d'air** modérée pour empêcher un séchage excessif en surface (croûtage) qui ralentirait ensuite le séchage des masses profondes ; la circulation de l'air doit

assurer une température et HR homogènes dans le séchoir. L'**évolution de la température** au cours du séchage diffère selon les techniques de transformation :

- **La technique espagnole** consiste à placer les jambons pendant 10 jours à 10°C puis à élever la température des séchoirs de quelques degrés tous les mois jusqu'à 28 à 34°C, pour une durée totale de séchage ≥ 110 j pour le jambon Serrano. Ces paramètres influencent fortement la couleur et la flaveur des produits finis (voir ci-dessous).
- A l'inverse dans les procédés de fabrication **Parme ou Bayonne** les jambons subissent un étuvage (20°C) puis sont séchés à une température relativement constante d'environ 13-15°C.

6) **Pannage**. Il est effectué sur les jambons de cycle long (≥ 9 mois) après environ 25% de perte de poids (environ 20 semaines). Il s'agit de recouvrir en partie ou totalement et souvent en plusieurs fois (selon la durée d'affinage) la surface musculaire avec un mélange de panne (tissu adipeux interne du porc) éventuellement assaisonnée, afin de **ralentir la dessiccation,** éviter le croûtage en surface ou la formation de fentes ou de crevasses ainsi que le développement des acariens.

- **Substances autorisées pour le pannage** (Code des Usages, IFIP (2016) ; Tableau 2.4.3.) : panne, saindoux, amidon, sel, épices, aromates, vins, alcools, liqueurs, fleurs de surface pour les trois catégories de produit (cru, sec, supérieur) ; l'acide sorbique, l'acide benzoïque et les paraydroxybenzoates sont autorisés pour le « jambon cru » seulement.

7) **Affinage**. C'est l'étape pendant laquelle le produit va développer ses **caractéristiques sensorielles** (couleur, texture, goût), alors que la perte d'eau est modérée. L'affinage dure plusieurs semaines voire plusieurs mois pour certains jambons qui présenteront alors des flaveurs plus intenses ; il est réalisé en cave dans des conditions de température qui dépendent des **caractéristiques sensorielles recherchées** (voir ci-dessous) **:**
    - Flaveur douce (technique italienne) : 12-13°C
    - Flaveur plus marquée : 14 à 18°C voire jusqu'à 22°C pour les jambons ibériques.

La **durée totale de la transformation** (mise au sel – sortie d'affinage) varie selon les cahiers des charges (voir volet 2.8). Elle est au minimum de 210 j pour la STG Serrano, 7 mois pour l'IGP Bayonne, 12 mois pour l'AOP Parme (peut aller jusqu'à 30 mois) et l'AOP Jambon sec de Corse, 20 mois pour l'AOP Noir de Bigorre (peut aller jusqu'à 36 mois), 20 ou 24 mois (selon le poids, voire jusqu'à 36 mois) pour les jambons ibériques ou AOP Barrancos (Portugal).

A l'inverse pour **raccourcir le processus de maturation** il est nécessaire d'accélérer le transfert du sel vers l'intérieur du jambon et celui de l'eau vers l'extérieur : ceci peut être obtenu en diminuant l'épaisseur de gras externe ou intermusculaire ainsi que l'épaisseur du jambon ; les conditions de température et d'humidité relative aux différentes étapes doivent également être optimisées (Arnau et Picouet, 2007). Selon la réglementation, des substances aromatiques (assaisonnements, épices ou fumée) peuvent être ajoutés pour améliorer l'arôme final du produit.

Le **fumage** n'est généralement pas pratiqué sur les jambons secs de type méditerranéen ; il concerne surtout des jambons secs produits en Allemagne et Europe du Nord, en complément du séchage. Il vise alors à modifier légèrement la flaveur des produits et peut contribuer à réduire la flore microbienne de surface en raisons des propriétés bactériostatiques de la fumée (Petrova *et al.*, 2015).

Tableau 2.4.3. Les différentes catégories de jambon sec d'après le Code des Usages de la Charcuterie et des Conserves de Viande (IFIP, 2016 ; 2017)

Produit	Cru, cru de pays	Sec, sel sec	Sec, sel sec supérieur ou traditionnel
Matière première : membre postérieur du porc	+	+	+
Désossage avant salage	Possible	Non	Non
Poids à la mise au sel, kg	-	≥ 7,5	≥ 8,5
Durée de fabrication (salage – sortie affinage), j	-	≥ 130	≥ 210
Marquage de la date de mise au sel	-	oui	oui

Ingrédients: dose maximale d'emploi, %			
Sel	+	+	+
Sucres exclusivement saccharose ou dextrose, %	-	0,5	0,5
Sucres y compris lactose, %	0,5	-	-
Aromates, épices, vins, alcools, liqueurs, condiments, arômes, arômes de fumée, ferments	+	+	+
En surface: panne, saindoux, amidon, sel, épices, aromates, vins, alcools liqueurs, fleurs de surface	+	+	+
Additifs : mg/kg			
Nitrate de sodium (ou potassium) associé à nitrite de sodium (ou potassium), doses d'emploi	≤ 120 nitrate et ≤ 120 nitrite	-	-
Nitrate de sodium ou potassium, dose résiduelle [c]	≤ 200	≤ 200	≤ 200
Chlorure de potassium, calcium, magnésium	+	+	+
Acide ascorbique, ascorbate de sodium ; acide érythorbique et érythorbate de sodium	+	-	-
Extrait de romarin	+	-	-
Acides acétique, lactique, citrique, tartrique ; acétates de sodium, potassium, calcium	+	-	-
Lactate de sodium, potassium	+	-	-
Citrate de sodium, potassium, calcium	+	-	-
En surface : acide sorbique, sorbate (potassium, calcium), acide benzoïque, benzoate (sodium, potassium, calcium) - parahydroxybenzoates	+ +	- -	- -
Caractéristiques physiques et sensorielles	Commercialisé avec ou sans os, avec ou sans gras, avec ou sans couenne, entier, en morceaux ou tranches préemballés ou tranchés à la demande		
Description complémentaire		Couleur homogène, peut se couper en tranches fines. Contrôle de la durée de fabrication sur site	
Caractéristiques chimiques [d]			
Sucres solubles totaux, %	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Sodium, mg/100 g	≤ 2 750	≤ 2 750	≤ 2 750

Dénominations particulières : mentions géographiques [e]	Hormis « *jambon de Vendée* » et « jambon cru fumé d'Alsace » toute mention géographique assimile les produits aux catégories sec et sec supérieur ou traditionnel

[a] Voir le Code des Usages pour le descriptif exhaustif de chaque produit
[b] Pour les matières premières, ingrédients et additifs indiqués, signe + : autorisé, signe - : interdit
[c] L'ajout de nitrates est autorisé dans les trois catégories en respectant la dose résiduelle ≤ 200 mg/kg de nitrate de sodium
[d] Le mode de préparation des échantillons pour l'analyse est décrit dans le code des usages
[e] Voir les cahiers des charges des produits sous dénomination géographique pour la description complète des spécifications

Préparation – conditionnement

La commercialisation des jambons secs sous la forme traditionnelle de jambon entier avec os est encore présente en Espagne et en Italie, mais diminue au profit des produits désossés et préemballés. En France les jambons secs sont vendus très majoritairement sous forme prétranchée en barquette sous atmosphère modifiée. On trouve aussi des jambons vendus désossés entiers, en demi ou en quart.

La **préparation des jambons vendus tranchés** inclut différentes étapes : dépannage, désossage, découennage/parage, moulage (forme rectangulaire, réalisé avec une presse automatique), maturation avant tranchage (1 à 2 semaines ; permet la cohésion des masses musculaires), tempérage ou raidissage (-10/-12°C, facilite le tranchage), tranchage et conditionnement sous vide (Espagne surtout) ou sous atmosphère modifiée (N_2 avec éventuellement du CO_2 : France et Italie) : le conditionnement sans oxygène empêche la détérioration de la couleur et de l'arôme.

Comparé au sous-vide, le conditionnement sous atmosphère modifiée permet d'éviter l'adhérence des tranches entre elles et l'aspect « ciré » des tranches emballées sous-vide, mais réduit l'arôme et peut augmenter le goût salé (Arnau et Picouet, 2007).

Le **rendement** d'un jambon entier avec os est **d'environ 65 à 70%** par rapport au poids frais mis en œuvre, alors qu'il est d'environ **35% pour du jambon tranché** de 9 mois, en raison du poids des os, du parage, et du fait que certaines tranches pouvant présenter des défauts visuels sont moins bien valorisées.

Propriétés commerciales du produit brut

Les **propriétés commerciales** de la matière première destinée à la fabrication de jambon sec dépendent du respect des **exigences de qualité** (**cahier des charges**, incluant des spécifications particulières dans les SIQO) et du **niveau de préparation (parage)** des produits par le fournisseur.

Les critères majeurs de sélection de la matière première présentés ci-dessus, essentiellement : poids de la pièce, défauts de présentation, épaisseur de gras de couverture, composition en AG, pH ultime, sont déterminés par de nombreux facteurs de production liés à l'animal lui-même, sa conduite d'élevage et, pour la présentation et le pH ultime, les conditions d'abattage et de transformation du muscle en viande, comme **décrit en partie 2.2**. Ces principales relations sont présentées en figure 2.4.8.

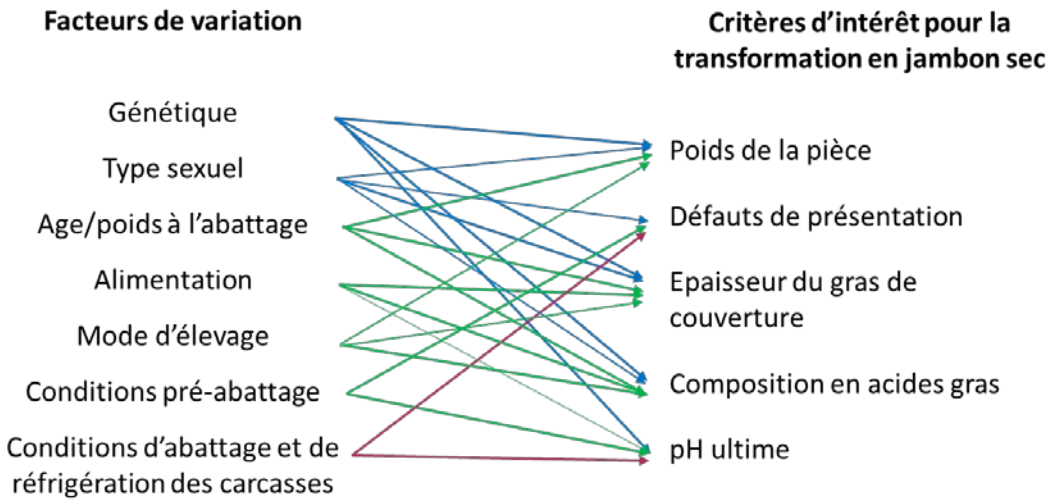


Figure 2.4.8. Influence des facteurs de variation sur les caractéristiques majeures de la matière première destinée à la fabrication de jambon sec. Facteurs liés à l'animal (bleu), aux pratiques d'élevage (vert) ou d'abattage et d'élaboration des carcasses et des viandes (rouge) ; effet modéré (trait fin) ou important (trait épais)

Propriétés du produit fini et: évolution au cours du procédé

La description des différentes étapes de fabrication du produit (ci-dessus) met en exergue leur importance dans l'élaboration des propriétés consitutives de la qualité (Figure 2.4.9) :

- **Teneur** et activité de l'eau : sur l'ensemble du procédé le jambon perd environ **30% d'eau**, contenue très majoritairement dans les muscles. En parallèle l'aw diminue progressivement, plus rapidement dans les muscles superficiels exposés à la dessiccation que dans les muscles profonds. La cinétique d'évaporation de l'eau en surface et de transfert d'eau des muscles profonds vers les muscles superficiels et la cinétique de diffusion du sel en sens inverse influencent l'intensité et la nature des réactions enzymatiques (en particulier la protéolyse) et en conséquence les propriétés organoleptiques du produit fini (Petrova *et al.*, 2015; Toldra, 1998).

  - La protéolyse (dégradation des protéines musculaires) est due à l'action d'enzymes endogènes : protéases (dont les cathepsines, qui dégradent les protéines en polypeptides) et peptidases (dont les calpaïnes et caspases) qui conduisent à la production de petits peptides et d'acides aminés (AA) libres. Ces peptides et AA libres sont ensuite dégradés en composés non volatils précurseurs de **goût** et en composés volatils précurseurs d'**arômes** (aldéhydes, alcools) (Petrova *et al.*, 2015; Toldra, 1998). La protéolyse modifie aussi fortement la **texture** du jambon sec qui devient plus tendre. Le degré de protéolyse ainsi que les protéines et voies biochimiques impliquées dépendent des caractéristiques de la **matière première** (un pH ultime bas favorise la protéolyse ; Virgili et Schivazappa (2002)) et des **durée et conditions de transformation,** dont la température et la cinétique de diffusion du sel. Ces facteurs influencent la nature des composés issus de la protéolyse (oligopeptides, AA libres…) contribuant ainsi à la **typicité des produits finis** (Petrova *et al.*, 2015; Rentfrow *et al.*, 2012). Ainsi, les niveaux d'AA libres, qui contribuent fortement au goût des produits, sont plus élevés dans le jambon Ibérique que le jambon de Parme après respectivement 24 et 12 mois de transformation (Petrova *et al.*, 2015). Les **cristaux de tyrosine** (points blancs parfois visibles sur les tranches de jambon sec), qui résultent de la protéolyse musculaire pendant l'élaboration du produit, sont donc un indicateur des propriétés sensorielles. L'application de méthodes analytiques à haut débit (spectrométrie de masse, chromatographie liquide haute performance, protéomique) ont permis de préciser les voies biochimiques associées à la protéolyse selon les produits et procédés considérés et d'identifier des biomarqueurs caractéristiques de différents jambons secs (Parme, Bayonne, Serrano, Jinhua (Chine)…) (Sentandreu *et al.*, 2007 ; Sforza *et al.*, 2001 ; Theron *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2005). La protéolyse est un phénomène favorable aux propriétés sensorielles, jusqu'à un certain point : **une protéolyse excessive altère la texture** (produits mous, pâteux) voire la flaveur (goût métallique) et réduit l'appréciation sensorielle du jambon sec par les consommateurs (Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Toldra, 1998) : **l'excès de protéolyse** constitue donc un important **défaut de qualité** du jambon sec.

- La **lipolyse** concerne les lipides du tissu adipeux sous-cutané (qui contient essentiellement des triglycérides) et les lipides intramusculaires (triglycérides et des phospholipides) par des lipases et phospholipases endogènes (et exogènes (bactériennes) pour le gras de surface). Ces enzymes sont actives tout au long du procédé mais surtout pendant les phases « chaudes » et conduisent à la **formation d'AG libres** (AGL) qui peuvent représenter jusqu'à 10% des lipides totaux du tissu adipeux et jusqu'à 20% des LIM après 10 à 12 mois de transformation (Gandemer, 2002). Dans les muscles, au cours de l'élaboration du jambon sec, la production des AGL provient majoritairement des phospholipides (Martin *et al.*, 1999). Ces AGL sont ensuite **oxydés** (auto-oxydation des AGPI principalement) générant une grande variété de **composés aromatiques volatiles** (alcanes, aldéhydes, cétones alcools, esters…) qui contribuent fortement à la **flaveur caractéristique du jambon sec :** goûts / arômes de fruits (noisette, châtaigne, amande…), sous-bois, champignons, animal… mais aussi rancidité (Gandemer, 2002; Toldra, 1998). La nature et la proportion relative des composés volatiles dépend notamment de **la composition en AG** des tissus elle-même fortement dépendante de facteurs liés à la production des animaux (voir 2.4.2.4) et des conditions de transformation du jambon : **température, teneur en sel** dont l'élévation accélèrent l'évolution des lipides (Andres *et al.*, 2005 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012 ; Gandemer, 2002 ; IFIP, 2018a).

- Dans les produits à cycle court (≤ 7 mois), la **couleur** du jambon sec résulte de la réduction du nitrate du mélange salant en nitrite par la flore naturelle de surface du jambon et la formation de nitrosomyoglobine donnant une couleur soutenue et relativement instable ; la couleur est obtenue plus rapidement avec l'apport de nitrite (Arnau et Picouet, 2007 ; IFIP, 2014). Dans les **produits longuement affinés** (≥ 9 mois) la couleur est plus stable et résulte d'un autre pigment (Zn-porphyrine) : le nitrate peut alors être supprimé du mélange salant, voire est interdit comme pour le jambon AOP Parme (voir volet 2.8, Analyse des SIQO).

- La **texture** est une composante sensorielle majeure et constitue un des principaux facteurs influençant l'acceptabilité du jambon sec par les consommateurs (Morales *et al.*, 2013). La **texture** du produit résulte de la teneur en eau qui dépend du **niveau de séchage,** et du **degré de protéolyse** (Arnau et Picouet, 2007 ; Petrova *et al.*, 2015; Virgili et Schivazappa, 2002). Le rapport eau/protéines est réduit de plus de moitié (3,25 à 1,45) pour une perte d'eau de 30%, expliquant le raffermissement du jambon au cours du procédé. Une texture trop molle du jambon qui devient quasiment intranchable résulte d'un excès de protéolyse ; ce phénomène est accentué dans les masses musculaires internes lors d'un **salage modéré** associé à une diffusion trop lente du sel, celui-ci ayant un effet inhibiteur sur l'activité des cathepsines (IFIP, 2014).
- La **flaveur** du jambon sec inclut la perception du goût salé et de composés non volatils (peptides, acides aminés) et volatils issus de la protéolyse, de la lipolyse et de l'oxydation des **AG** (Huan *et al.*, 2005 ; Petrova *et al.*, 2015; Rentfrow *et al.*, 2012 ; Toldra, 1998). La nature et la proportion de ces composants détermine le profil sensoriel : une **dominante des produits issus de la protéolyse** est obtenue par séchage-affinage à température basse (technique italienne) conférant une flaveur douce, alors qu'une **dominante des produits de la lipolyse** obtenue par la technologie espagnole donne une saveur plus corsée. La perception du sel augmente logiquement avec sa concentration ainsi qu'avec le taux d'humidité et d'azote non protéique. A l'inverse une teneur en lipides intramusculaires élevée réduit la perception de goût salé (IFIP, 2014).

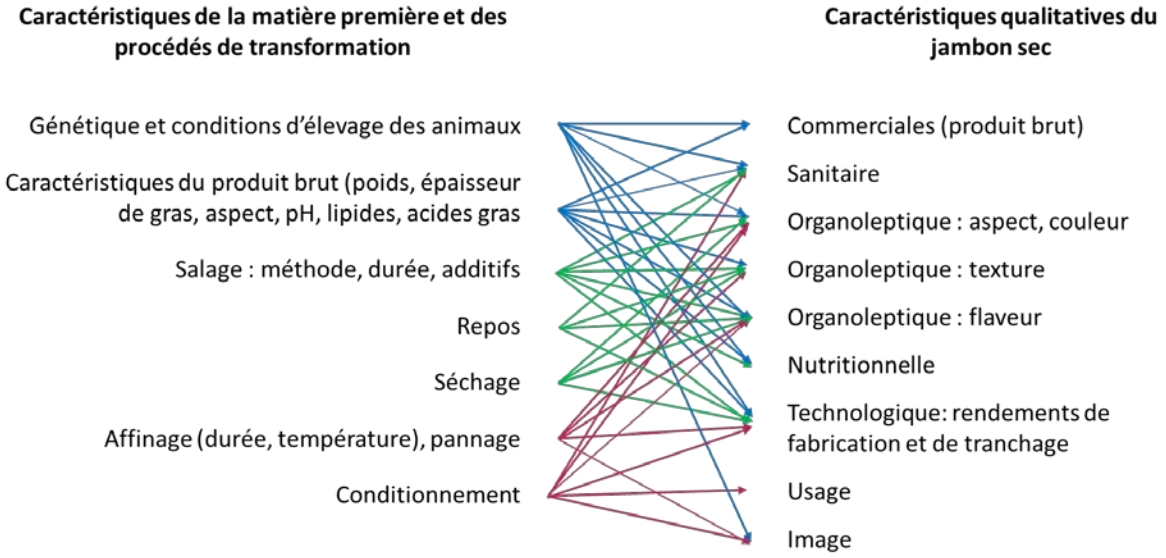


Figure 2.4.9. Influence des caractéristiques de la matière première et des procédés de transformation sur les caractéristiques qualitatives du jambon sec

Pour résumer, **les conditions et durée des différentes étapes**, notamment le mode de salage, la composition du pannage et les durées et cinétiques de température pendant le séchage et l'affinage confèrent aux produits des **caractéristiques sensorielles spécifiques :**

- Technique espagnole : **couleur rouge soutenue**, maigre ferme, fonte partielle du gras qui diffuse dans le maigre, **oxydation plus ou moins prononcée des acides gras** conférant une **flaveur corsée**
- Technique italienne : couleur rouge **plus claire**, gras moins oxydés, flaveur plus douce.

Ces différentes techniques de transformation sont associées à différents types génétiques ou races et différents modes de production des animaux dédiés à la production de jambon sec (voir ci-dessous).

Figure 2.4.10. Jambon sec ibérique (photo INRA) Jambon de Parme (photo Great Italian Food Trade)

Influence des conditions de production des animaux sur les caractéristiques qualitatives du produit fini

La description du procédé d'élaboration du jambon sec met en évidence l'importance des **caractéristiques de la matière première déterminées par l'ensemble des facteurs de production** : génétique, conditions d'élevage (alimentation, système de production…), de pré-abattage et d'abattage des animaux (voir partie 2.4.2 et tableaux de synthèse ci-dessous) dans la détermination des **propriétés des jambons secs,** notamment leurs caractéristiques organoleptiques, nutritionnelles et d'image. Ainsi les **conditions de production** des animaux **interagissent avec les conditions de transformation** pour élaborer les propriétés finales des produits (Figure 2.4.9).

Les **propriétés sensorielles** du jambon sec : aspect, couleur du gras et du maigre, texture, flaveur, sont influencées par plusieurs caractéristiques de la matière première (jambon brut) : poids et épaisseur de gras, composition biochimique (teneurs en lipides, composition en acides gras, teneur en composés antioxydants…) des tissus gras et des muscles, paramètres physico-chimiques des muscles : pH, couleur, capacité de rétention d'eau… Comme décrit en partie 2.4.2 ces caractéristiques résultent des différents facteurs liés aux animaux et à leurs conditions de production et d'abattage.

Une épaisseur de gras externe suffisante (le minimum varie selon le procédé) est favorable pour l'élaboration de jambon sec, car elle permet de modérer la vitesse de séchage et ralentit la diffusion du sel (un séchage rapide entraîne un croûtage en surface) : cette propriété est favorable surtout pour les procédés d'élaboration lents. Le rôle favorable des LIM sur les propriétés sensorielles est aussi bien établi : couleur rouge et plus intense, texture moins ferme et flaveur accrue (outre la production de composés aromatiques issus de l'oxydation des AG, les LIM et jouent aussi le rôle de solvants de ces composés (Arnau et Picouet, 2007 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012 ; Gandemer, 2002 ; Pugliese et Sirtori, 2012). Sur des porcs de production 'conventionnelle' (génotypes maigres) un tri des pièces (épaisseur de gras minimale) peut être effectué en abattoir. La production de porcs lourds, ou de génotypes ou races spécifiques pour la production de jambon sec est plus appropriée. Ainsi l'élaboration de produits spécifiques sous SIQO (AOP en particulier) requiert un **croisement génétique spécifique** (incluant souvent la race Duroc) voire des porcs de **race locale** (pure ou en croisement dans certains cas) à forte adiposité et teneur en LIM élevée (environ 3% de LIM dans les muscles du jambon pour les races Gascon et Cinta Senese, 4% pour Basque et jusqu'à 8% voire 10% pour la race Ibérique ; voir 2.4.1.2) (Bonneau et Lebret, 2010 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012 ; Lebret *et al.*, 2019b). Les **caractéristiques sensorielles supérieures** (couleur plus sombre, texture plus fondante et moins dure, flaveur plus intense) des jambons secs issus de ces animaux relativement aux porcs de génotypes plus performants, ainsi que des races locales pures par rapport à leurs croisements, sont clairement montrées par des jurys experts pour les races Gascon, Ibérique et Basque, par exemple (Carrapiso *et al.*, 2003 ; Lebret *et al.*, 2013; Simon *et al.*, 1997) ainsi que par des tests consommateurs (Ventanas *et al.*, 2007a). Pagliarini *et al.* (2016) ont également mis en évidence un effet favorable du type génétique utilisé pour la production des jambons AOP Parme, San Daniele et Toscane (croisement défini de races 'conventionnelles' et non race autochtone pour ces AOP, voir partie 2.8), relativement à un croisement commercial plus maigre, sur les propriétés sensorielles de ces produits et l'acceptabilité du jambon de Toscane par des consommateurs. Toutefois dans le cas de ces trois produits, les propriétés sensorielles et l'acceptabilité dépendaient plus du procédé de transformation que du type génétique des porcs (non spécifique dans ces AOP) (Pagliarini *et al.*, 2016). L'importance relative des propriétés de la matière première et des conditions d'élaboration peut donc varier selon les produits considérés et les facteurs de production mis en œuvre.

Outre l'adiposité et la teneur en LIM, le type génétique détermine la morphologie de la pièce de jambon brut. Il influence aussi les propriétés biochimiques et physico-chimiques des muscles dont l'évolution post-mortem du **pH**, la **couleur** (en

interaction avec les conditions de production et surtout de pré-abattage et d'abattage, voir 2.4.2.5) et **l'activité protéolytique** des muscles, paramètres majeurs dans l'évolution biochimique du jambon sec au cours de sa transformation et l'élaboration de ses propriétés sensorielles (Candek-Potokar et Skrlep, 2012 ; Gonzalez et Ockerman, 2000 ; Petrova *et al.*, 2015; Virgili et Schivazappa, 2002). En dehors du type génétique ou de la race, la présence des **allèles n et RN-** aux gènes à effet majeur sur la qualité (voir 2.4.2.3 et 2.4.2.5) est **défavorable aux propriétés sensorielles du jambon sec**. La chute rapide comme l'amplitude élevée du pH post-mortem entraînent une protéolyse excessive altérant la texture (moindre élasticité et cohésion), et augmentent le goût salé (Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Virgili et Schivazappa, 2002).

Le **poids et l'âge à l'abattage** des porcs influencent aussi l'adiposité de la carcasse et les propriétés physico-chimiques du tissu musculaire (voir partie 2.4.2.3) : les porcs lourds sont donc considérés comme plus appropriés pour l'élaboration de jambon sec, en raison de leur adiposité et teneur en pigments supérieures ainsi que de leur moindre potentiel protéolytique qui permet d'éviter un excès de protéolyse délétère pour la texture du produit (Arnau et Picouet, 2007 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Virgili et Schivazappa, 2002).

Comme décrit plus haut (2.4.1 et 2.4.2.3) les porcs de **races ou croisements dédiés** à la production de jambons secs de qualité élevés (dont les IGP et AOP) sont généralement abattus à un âge et poids élevés afin d'obtenir des caractéristiques tissulaires favorables aux propriétés sensorielles des produits finis. L'élevage de ces animaux en **conditions extensives** (AOP espagnoles, françaises, portugaises et certaines AOP Italiennes) contribue aussi à optimiser les caractéristiques tissulaires de la viande : couleur rouge plus intense, forte accrétion lipidique (en particulier d'AGM) aux niveaux corporel et intramusculaire en finition extensive dans les systèmes traditionnels méditerranéens (alimentation strictement basée sur les **ressources locales** : herbe, fruits : glands, châtaignes…) (Lebret, 2008). L'ensemble de ces **facteurs de production** combinant génétique, système d'élevage et ressources/conduite alimentaire, associés à des **procédés de transformation** longs adaptés à cette matière première particulière (contrôle de la protéolyse, lipolyse favorisée) (Flores, 1997), conduisent à l'élaboration de produits aux **propriétés gustatives élevées et spécifiques** (Bonneau et Lebret, 2010 ; Gonzalez et Ockerman, 2000 ; Lopez-Bote, 1998 ; Pugliese et Sirtori, 2012).

Au sein d'un type génétique ou d'une race donnée, le **système d'élevage des animaux** associant une **conduite alimentaire** spécifique influence les propriétés du jambon sec. Chez des porcs Ibériques, la finition extensive exclusivement aux glands et à l'herbe comparée à la finition en claustration avec alimentation à base de concentré favorise l'aspect (couleur plus jaune et plus brillante) et la texture (moins ferme et fibreuse, plus juteuse), accroît l'intensité d'arôme (dont l'arôme de fruits) et de goût, et diminue le goût salé du jambon sec (Cava *et al.*, 2000). Ces différences peuvent s'expliquer par l'influence du mode de finition sur les propriétés biochimiques des muscles avant transformation (teneurs en lipides, profil en AG, composés antioxydants d'origine alimentaire) et l'intensité de lipolyse lors de l'élaboration du produit. L'influence de la nature de l'alimentation (glands ou ressources locales en système extensif vs. aliment concentré) sur le niveau et la nature des composés volatils (analysés par méthode chimique) du jambon sec est bien étable (Jurado *et al.*, 2007 ; Pugliese *et al.*, 2009). En outre l'effet du **type de finition** (extensif et ressources alimentaires locales vs intensif *et al*imentation à base de concentré enrichi en AGM et antioxydants) sur les propriétés sensorielles du jambon sec peut être **perçu par les consommateurs** (Ventanas *et al.*, 2007a). Ainsi, à travers la valorisation de ressources alimentaires spécifiques, l'alimentation des animaux constitue un levier pour améliorer les propriétés sensorielles en induisant des **variations d'arôme en fonction de l'origine géographique** (Rentfrow *et al.*, 2012) ou de la **saison de finition,** qui peuvent être valorisées par des SIQO. Si la conduite alimentaire est moins contrastée (porcs basques élevés en système extensif avec ressources alimentaires locales et distribution d'aliment concentré, vs. élevage sur litière et courette ou sur caillebotis *et al*imentation conventionnelle), les différences sensorielles sont moindres et concernent surtout l'aspect des produits, les jambons secs issus de porcs élevés en système extensif présentant une couleur rouge plus intense et un aspect huileux plus marqué (Lebret *et al.*, 2013).

Hormis les productions extensives associées à des conduites alimentaires particulières, de façon générale, **l'alimentation des animaux** : niveau des apports et composition des rations influence fortement l'importance et la composition des dépôts adipeux au sein de la carcasse et des muscles (voir 2.4.2.1, 2.4.2.3 et 2.4.2.4). Ce facteur influence donc les propriétés de la matière première destinée à la fabrication de jambon sec : épaisseur de gras, teneur en LIM, composition en AG du gras sous-cutané et intramusculaire et composition en micronutriments (vitamines, minéraux) (Lebret, 2008) et consécutivement l'aptitude à la transformation (séchage, diffusion du sel) et les propriétés sensorielles des produits (Candek-Potokar et Skrlep, 2012 ; Pugliese et Sirtori, 2012). Le **profil en AG** joue un rôle important dans la détermination de la **flaveur** du jambon sec, en particulier dans les procédés d'élaboration longs, en raison de la sensibilité élevée des AGPI à l'oxydation des AGPI et de la nature des composés volatils générés (Pastorelli *et al.*, 2003). L'incorporation d'antioxydants (α-tocophérol) dans les rations des animaux est efficace pour améliorer la stabilité oxydative des AGPI et accroître l'intensité d'odeur et de goût des produits finis (Isabel *et al.*, 2003; Ventanas *et al.*, 2007b).

Comme décrit précédemment (2.4.2.1 et 2.4.2.2) le **type sexuel** des animaux (mâles entiers / mâles castrés / femelles) influence l'adiposité et le profil en AG des tissus adipeux et intramusculaires, les mâles entiers présentant une moindre adiposité et des gras plus insaturés relativement aux femelles, et a fortiori aux mâles castrés. Les jambons secs issus de mâles castrés, plus gras que ceux des porcs femelles, sont donc a priori mieux appropriés pour la transformation en jambon sec (diffusion du sel et séchage moins rapides), toutefois Candek-Potokar et Skrlep (2012) et Font-i-Furnols *et al*. (2015) ne rapportent pas de différences sensorielles significatives entre des jambons issus de mâles castrés ou de femelles. Comme pour la viande fraîche, l'effet le plus important du type sexuel sur les propriétés sensorielles du jambon sec est le **risque d'odeur indésirable** des jambons de mâles entiers (2.4.2.3). Banon *et al*. (2003) ont montré que des jambons secs (14 mois d'élaboration) de mâles entiers, comparativement aux mâles castrés, sont jugés moins persillés, moins juteux, plus salés et plus durs (probablement en raison de leur moindre adiposité) et présentent un goût et surtout une odeur de « mâle » plus intenses en relation avec des teneurs supérieures en androsténone et scatol du tissu gras. Font-i-Furnols *et al*. (2015) confirment la perception plus élevée de flaveur d'androsténone et la dureté supérieure des jambons secs de mâles entiers par rapport à ceux de mâles castrés, testés par un jury entraîné. Ces différences sont aussi perceptibles par des consommateurs : selon Banon *et al*. (2003), les jambons secs de mâles castrés sont mieux appréciés et préférés par rapport à ceux de mâles entiers, en particulier par les femmes et par les consommateurs habituels de jambon sec. La question de l'impact de **l'arrêt de la castration** des porcs mâles sur les propriétés sensorielles des produits et la **gestion des carcasses odorantes** concerne donc fortement les filières de jambon sec, où le risque d'odeurs indésirables est accru lorsqu'il s'agit de « porcs lourds » abattus à un âge élevé, ou/et issus de génotypes « gras » ou de croisements Duroc (Parois *et al.*, 2018).

A côté des facteurs de production liés à l'animal et ses conditions d'élevage, les conditions de pré-abattage, d'abattage et de réfrigération des carcasses influencent les propriétés sensorielles du jambon sec via leur influence sur l'évolution post-mortem du pH musculaire. Comme décrit plus haut, une chute de pH rapide (viande PSE), ou trop importante (pH ultime bas), est délétère pour l'élaboration du jambon sec (prise de sel et protéolyse excessives) ; un pH ultime trop élevé (viande DFD) est également néfaste : il limite la dessiccation et la diffusion du sel, ce qui conduit à des produits pâteux et mous (Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Virgili et Schivazappa, 2002).

Les facteurs de production des animaux peuvent moduler les **propriétés nutritionnelles** du jambon sec, à travers leurs effets sur les teneurs et composition en lipides et micronutriments des tissus adipeux et musculaires. Pour des pièces ou muscles donnés, les teneurs en lipides dépendent essentiellement du type génétique et du niveau des apports alimentaires, alors que la **composition en AG** et certains **micronutriments (dont des antioxydants)** dépendent de la composition de la ration (voir 2.4.2.4). L'incorporation d'AGPI n-3 dans l'alimentation des porcs afin d'augmenter leur teneur dans les tissus et améliorer le profil nutritionnel des produits n'est pas très favorable pour l'élaboration de jambon sec en raison de l'importante peroxydation des AGPI au cours du procédé et le risque de défaut de flaveur (rancidité) (Hugo et Roodt, 2007). Si l'ajout d'antioxydants (tocophérols) peut limiter la peroxydation lipidique, Musella *et al*. (2009) ont montré que l'ajout de 170 mg/kg de vitamine E dans un aliment contenant 5% de graine de de lin extrudée (très riche en AG n-3) comme source lipidique, par rapport à de l'huile de tournesol, était insuffisante pour obtenir un profil d'AG avant transformation qui réponde au cahier des charges du jambon de Parme. De plus, les jambons issus des porcs ayant consommé la graine de lin étaient moins appréciés par les consommateurs (goût et odeur défavorables) (Musella *et al.*, 2009). Comme le montrent Santos *et al*. (2008), l'ajout alimentaire d'antioxydants doit être suffisant (220 vs. 20 mg d'acétate de tocophérol/kg dans un régime contenant 3% d'huile de lin) en vue de l'élaboration de jambon sec afin d'éviter une altération de l'odeur et de la flaveur du produit et sa moindre appréciation par les consommateurs. Dans les systèmes de production extensifs, la consommation par les porcs d'herbe riche en AG n-3 et en composés antioxydants (dont α et γ tocophérols) permet d'accroître simultanément leurs teneurs tissulaires (Lebret, 2008; Ventanas *et al.*, 2007b) et de prévenir une oxydation excessive des AGPI, néfaste pour la flaveur voire pour les propriétés nutritionnelles des produits (génération de composés toxiques ; voir 2.4.2.4)

La **réduction de la teneur en sel** des produits transformés afin d'améliorer leurs propriétés nutritionnelles concerne aussi le jambon sec depuis une vingtaine d'années. Comme décrit plus haut cela pose des **problèmes technologiques et sensoriels**, en particulier pour les processus d'élaboration longs, le sel étant un ingrédient essentiel pour la stabilisation (séchage), le goût et la texture du jambon sec (contrôle de la protéolyse et de la peroxydation lipidique) (Andres *et al.*, 2005 ; Andres *et al.*, 2004 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Toldra, 1998). La réduction du taux de sel constitue un **levier technologique** qui interagit avec **les propriétés de la matière première** : poids de la pièce, épaisseur de gras, pH… résultant de l'ensemble des facteurs de production, pour déterminer les propriétés finales des produits. Sur des jambons présentant un poids brut et/ou une adiposité élevée, la diffusion du sel et par conséquent le séchage risquent d'être d'autant plus ralentis avec un salage réduit. Le sel inhibant la protéolyse, le risque de protéolyse excessive est accru, d'autant plus que le pH ultime des muscles est bas. Les travaux de Andres *et al*. (2004) montrent que la réduction de 6 à 3% du taux de sel pour

l'élaboration de jambon ibérique diminue le gout salé sans modifier les autres goûts ou arômes ; la réduction du sel influence la texture du muscle profond *Biceps femoris* (moins sec et moins fibreux) mais pas du muscle externe semi-membraneux. D'après Martuscelli *et al*. (2015), la réduction de 3 à 2 apports consécutifs de sel lors de la transformation de jambon sec fumé permet de diminuer jusqu'à 13% le taux de sel du muscle *B. femoris*, alors que cet effet n'est observé au niveau du muscle *semi membraneux* (qui capte le sel en premier lors du procédé) uniquement pour les jambons bruts les plus légers. Ces deux études illustrent que la réduction du sel sur les propriétés du jambon sec peut être plus ou moins marqué selon les muscles considérés. Martuscelli *et al*. (2015) montrent aussi que les produits moins salés sont plus difficiles à mâcher et ont une flaveur moins intense, ce dernier paramètre pouvant s'expliquer par une moindre oxydation des lipides consécutive à la réduction du taux de sel (Andres *et al.*, 2005; Coutron-Gambotti *et al.*, 1999). Toutefois Martuscelli *et al*. (2015) soulignent que le point le plus critique est l'influence du poids du jambon brut sur la diffusion du sel et l'activité de l'eau. En conséquence, **réduire le sel pour favoriser les propriétés nutritionnelles** du produit fini **implique de bien maîtriser les paramètres technologiques du procédé** afin d'obtenir un produit stable et ne pas trop altérer ses propriétés sensorielles (Andres *et al.*, 2004 ; Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Martuscelli *et al.*, 2015) : il y a donc antagonisme potentiel entre les propriétés nutritionnelles d'une part, et les propriétés technologiques et sensorielles.

Le jambon sec présente deux **propriétés d'usage** de grand intérêt pour les consommateurs, la **praticité d'utilisation** en particulier pour les jambons commercialisés tranchés (la grande majorité du volume des ventes), et la **longue durée de conservation** après achat : 4 mois pour des tranches, et jusqu'à 12 mois pour des pièces désossées (jambon entier, demi-jambon, noix…) conservées sous vide et stockées à 4°C. Le jambon entier avec os peut se conserver jusqu'à 12 mois à température ambiante ou en cave. Ce produit est donc bien adapté aux comportements alimentaires actuels : déstructuration des repas et démultiplication des moments de consommation (snacking), consommation nomade.

Les **propriétés d'image**, qui correspondent à la **perception** par les consommateurs **des attributs du produit ou de son processus de production** (chapitre 1), sont particulièrement importantes concernant le jambon sec, et sont valorisées par des productions sous SIQO (voir 2.4.1 et 2.8). Les propriétés d'image sont associées à une **culture et des habitudes alimentaires** marquées, surtout dans les régions ou pays producteurs de produits spécifiques. Ainsi le « type » de jambon (ibérique bellota, ibérique, ou serrano, c'est-à-dire combinant différentes races/croisements et modes de production, voir 2.4.1) est un attribut essentiel influençant les préférences de consommateurs de jambon sec dans le sud-ouest de l'Espagne (région productrice de porc ibérique), avec une préférence pour le jambon ibérique Bellota (Mesias *et al.*, 2009). Même en absence d'information (test en aveugle), on observe des préférences régionales ou nationales marquées des consommateurs envers différents types de jambons secs, qui s'expliquent par leur familiarité avec le produit (Candek-Potokar et Skrlep, 2012; Resano *et al.*, 2010). **L'information sur l'origine du produit** contribue fortement à son acceptabilité et peut être perçue différemment selon les consommateurs : une étude conduite en Norvège montre qu'un groupe de consommateurs préférait des jambons secs d'origine espagnole et l'autre groupe des jambons norvégiens, illustrant des attitudes contrastées face aux 'innovations' dans le domaine de produits alimentaires (Hersleth *et al.*, 2011). Une étude récente confirme l'influence de l'information sur la **race ou croisement**, le **mode d'élevage**, la présence ou non de **SIQO** (AOP Noir de Bigorre) et la **durée d'affinage** du jambon sec sur les préférences de consommateurs de la région de Toulouse (proche de la zone de production de l'AOP) (Lebret *et al.*, 2018b). Le fait d'apporter cette information modifie la perception hédonique des produits en améliorant celle du jambon AOP Noir de Bigorre, pour lequel on observe une satisfaction complète des attentes pour le jambon affiné 24 mois, et réduit celle du jambon ibérique (porc 50% ibérique), par rapport au test hédonique en aveugle.

2.4.4. Conclusions

Les différentes étapes de la production et de la préparation des viandes et produits de porc, depuis le choix du type génétique des animaux jusqu'à la cuisson des produits par les consommateurs ou la consommation des produits de charcuterie, influencent les différentes caractéristiques qualitatives des produits**. L'importance respective de chacun des facteurs de variation sur les caractéristiques qualitatives est résumée dans les tableaux suivants.**

Globalement, l'influence des facteurs individuels sur les différentes caractéristiques qualitatives est assez bien connue voire **très bien établie pour certains d'entre eux** (par exemple, génétique et propriétés technologiques ; alimentation et profil lipidique ; conditions de pré-abattage et d'abattage et propriétés technologiques ou sensorielles ; durée de maturation, mode de cuisson et propriétés sensorielles ; conditions de transformation des jambons cuits ou secs et propriétés technologiques ou sensorielles …). Cette synthèse met aussi en évidence des **lacunes** dans les connaissances scientifiques visant à maîtriser les propriétés des viandes chez le porc :

- Au niveau **mécanistique (biologique)**, une meilleure connaissance des voies de régulation du **stress oxydant** in vivo, péri et post mortem (études longitudinales) contribuerait à optimiser les caractéristiques sensorielles, nutritionnelles, technologiques et d'usage des viandes porcines.

- Egalement au niveau **mécanistique**, l'identification de **l'origine biologique du défaut de déstructuration** des viandes est une nécessité pour envisager la mise en œuvre de facteurs correctifs efficaces et réduire ses impacts forts en termes économiques, technologiques mais aussi d'image (gaspillage) dans la filière.

- Au niveau **technologique**, le développement et la mise à disposition de **méthodes de détection rapides et fiables** des odeurs indésirables des viandes de porc mâle entier sur la ligne d'abattage, associées au niveau **hédonique** à une détermination des **seuils d'acceptabilité** des différentes molécules odorantes selon les produits et les modes de transformation, permettrait d'optimiser la valorisation des carcasses ou pièces en fonction de leur teneur en molécules odorantes.

- De façon générale, des **analyses globales** (par exemple méta-analyses) seraient utiles pour synthétiser les informations disponibles dans la littérature et proposer des **lois de réponse plus « robustes »** concernant les relations entre facteurs de production et qualités des viandes. Des **modèles prédictifs** des caractéristiques tissulaires comme la composition en acides gras en relation avec les caractéristiques des carcasses et des viandes des tissus sont déjà disponibles ; un raffinement de ces modèles intégrant divers types génétiques et conditions d'élevage ainsi que différents tissus cibles (tissu adipeux intramusculaire) serait utile pour **optimiser les caractéristiques des tissus** selon l'objectif qualitatif prioritaire : propriétés nutritionnelles (gras insaturés) ou propriétés sensorielles ou technologiques (gras moins insaturés, teneur en antioxydants…).

Outre les effets directs des facteurs de production, cette synthèse illustre et confirme les **interactions fortes** entre ces facteurs dans **l'élaboration des caractéristiques qualitatives** des viandes et produits transformés de porc. Ces interactions sont fortes en particulier dans des systèmes de production alternatifs, où les **synergies entre facteurs** (type génétique, type d'habitat, conduite alimentaire, âge et poids à l'abattage…) **et avec les conditions de transformation des produits** conduisent à des **caractéristiques qualitatives spécifiques** qui peuvent être valorisées par des SIQO (ex. AOP/IGP, production biologique).

Ces interactions induisent aussi une **variabilité plus importante des caractéristiques qualitatives des produits issus de systèmes d'élevages alternatifs**. Par exemple en élevage en extérieur, les caractéristiques commerciales, organoleptiques, nutritionnelles et technologiques de la viande résultent des interactions entre le type génétique des animaux (potentiels de croissance et de dépôt de tissus maigres vs. gras, aptitude à valoriser des ressources alimentaires spécifiques…), les conditions climatiques et d'habitat (température ambiante, activité physique…), la conduite alimentaire, la réactivité aux conditions de pré-abattage… En **production porcine biologique**, selon le type génétique, les conditions d'élevage et la conduite alimentaire mises en œuvre, c'est-à-dire les choix ou compromis faits par l'éleveur au sein du cadre réglementaire, la littérature met ainsi en évidence une **variabilité élevée des propriétés des viandes**. En production bio ou autre production différenciée, cette variabilité peut être un **inconvénient** pour les différents acteurs de la filière jusqu'au distributeur mais aussi pour les consommateurs s'ils sont 'habitués' ou s'attendent à une régularité qualitative des produits. Elle peut aussi constituer un **atout pour différencier les produits au sein d'un mode de production ou d'un cahier des charges pré établi** : ainsi la variabilité des ressources alimentaires locales disponibles en élevage extensif selon la saison d'élevage et ses conséquences sur les propriétés nutritionnelles et sensorielles, est considérée par certaines filières locales sous AOP comme un **levier** pour diversifier leurs produits (par exemple, la filière Noir de Bigorre cherche à valoriser la variabilité des caractéristiques du jambon sec (dont le profil en AG) selon la saison de finition des animaux (Lebret *et al.*, 2019a).

Ce chapitre met aussi en évidence des **effets antagonistes** de certains facteurs de production selon les **dimensions qualitatives** considérées :

- antagonisme entre les **caractéristiques commerciales** des carcasses et les caractéristiques **technologiques et sensorielles des viandes**, liées aux facteurs génétiques. Le modèle économique actuel de la production conventionnelle promeut les génotypes maigres et à croissance rapide, qui favorisent la valeur commerciale des carcasses au détriment des propriétés technologiques et sensorielles de la viande, bien que cet antagonisme soit bien établi, que la proportion des viandes porcines transformées en France soit élevée (75% est transformée par l'industrie de l'aval, surtout en jambon cuit) et que la réduction croissante de l'utilisation d'additifs lors de la transformation accentue l'importance de la qualité de la matière première. Cet antagonisme est observé entre races ou croisements, intra-race selon le génotype au locus halothane, ou suite à la sélection génétique mise en place dans les races pures pour favoriser la production de viande maigre. La corrélation génétique positive

entre l'adiposité corporelle et la teneur en lipides intramusculaires, qui induit une réduction de la teneur en LIM avec la sélection contre l'adiposité, constitue aussi un antagonisme entre caractéristiques sensorielles et commerciales, qu'il semble toutefois possible de rompre au moins partiellement par une sélection génétique appropriée.

- antagonisme entre les **caractéristiques commerciales** des carcasses ou les **caractéristiques nutritionnelles** et les **caractéristiques technologiques des tissus gras** : comme décrit dans cette synthèse, tout facteur génétique ou d'élevage réduisant l'adiposité de l'animal donc améliorant la valeur commerciale de la carcasse, induit une réduction de la teneur en lipides totaux et de la proportion d'acides gras saturés ou mono-insaturés au profit des AGPI dans les tissus gras, altérant leurs aptitudes à la transformation et à la conservation ; à l'inverse, ces propriétés sont favorables aux caractéristiques nutritionnelles. La gestion de cet antagonisme consisterait à orienter les tissus gras vers différentes utilisations selon leurs caractéristiques physiques et biochimiques ; la mise à disposition de modèles prédictifs de la composition en lipides, ou la mise en œuvre sur la chaîne d'abattage de méthodes rapides de prédiction de la composition en AG, s'avérerait ici très utile.

- antagonismes possibles mais pas systématiques entre les caractéristiques d'**image** et les **propriétés technologiques ou sensorielles** des viandes ; comparé au mode d'élevage conventionnel, les animaux de génotype conventionnel élevés en extérieur en conditions climatiques froides présentent des réserves énergétiques musculaires plus élevées, et par ailleurs semblent moins réactifs (moindres comportements agonistiques) aux changements d'environnement en phase pré-abattage. L'ensemble peut conduire à un pH inférieur de la viande avec des **effets potentiellement négatifs** sur les propriétés technologiques (rendements de transformation) et sensorielles (tendreté, couleur), toutefois **cette réponse dépend des conditions d'élevage**, un **effet améliorateur** de l'élevage en extérieur sur les propriétés sensorielles (couleur, jutosité) étant aussi rapporté. Le choix d'un type génétique adapté en termes de croissance, propriétés musculaires, comportement…, l'optimisation de la conduite alimentaire et une bonne maîtrise des conditions de pré-abattage et d'abattage, permet de résoudre cet antagonisme potentiel pour le transformer en **synergie**.

- antagonismes **majeurs entre les caractéristiques d'image (absence de castration favorable au bien-être animal) et sensorielles (risques de défauts d'odeur) des viandes de porcs mâles entiers**, auxquels s'ajoutent des antagonismes en termes de caractéristiques commerciales, nutritionnelles, technologiques et d'usage.

Pour conclure, optimiser les caractéristiques qualitatives des viandes pour mieux satisfaire les besoins des utilisateurs : éleveur, abatteur, transformateur, consommateur, implique de mieux connaitre les lois de réponse et les interactions entre facteurs de variation dans l'élaboration des caractéristiques des produits, mais aussi les dimensions qualitatives prioritaires des différents utilisateurs. L'élaboration de **modèles d'analyse multicritères**, pouvant être utilisés comme **outils d'aide à la décision** par les acteurs des filières en fonction de leurs choix ou contraintes biotechniques et de leurs priorités qualitatives, peut y contribuer.

Propriété commerciale des carcasses de porc

Facteurs	Poids de carcasse [a]	Rendement [b]	Adiposité [c]	Teneur en maigre [d]
Génétique	+++	++	+++	+++
Type sexuel	++	+	++	++
Age / Poids à l'abattage	++	++	++	++
Alimentation	++	+	+++	+++
Mode d'élevage	++	+	++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[a] Poids de carcasse : considéré ici à un âge donné, donc comme un indicateur de la vitesse de croissance
[b] Rendement : poids de carcasse / poids vif à l'abattage
[c] Adiposité : épaisseur du gras sous-cutané dorsal
[d] Teneur en maigre : Teneur en Muscle des Pièces (TMP) prédite à partir de mesures d'épaisseur de gras dorsal et de muscle

Propriété organoleptique de la viande de porc (tissus maigres)

Facteurs	Aspect	Tendreté	Jutosité	Flaveur

	Couleur	Exsudat			
Génétique	+++	+++	+++	+++	+
Type sexuel	-	-	+	-/+	+++
Age / Poids à l'abattage	+	-	++	+	-
Muscle/morceau	+++	+++	+++	++	++
Alimentation	+	+	++	+	+++
Mode d'élevage	++	+	++	+	+
Conditions pré-abattage	+++	+++	+++	++	-
Conditions d'abattage et de réfrigération des carcasses	+++	+++	+++	+++	-
Durée et conditions de maturation et de conservation de la viande	+++	+++	+++	++	++
Mode de cuisson	++	+++	+++	+++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriété nutritionnelle de la viande de porc (tissus maigres et tissus gras)

Facteurs	Teneur en protéines	Teneur en lipides	Profil en acides gras	Teneur en minéraux, vitamines
Génétique	+	+++	++	-
Type sexuel	-	++	++	-
Age / Poids à l'abattage	-	++	++	-
Muscle/morceau	++	+++	+++	++
Alimentation	-	+++	+++	+++
Mode d'élevage	-	++	++	+++
Conditions de pré-abattage, d'abattage et de réfrigération des carcasses [a]	-	-	-	incertain
Durée et conditions de maturation et de conservation de la viande	-	-	++	++
Mode de cuisson [b]	++	++	++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

[a] L'effet des conditions pré-abattage sur le stress oxydant et ses conséquences sur les teneurs ultérieures en antioxydants dans la viande est à préciser

[b] L'effet du mode de cuisson sur les teneurs en protéines et lipides dépend de l'exsudation lors du chauffage

Propriété technologique de la viande de porc (tissus maigres)

Facteurs	Aptitude à la transformation	Aptitude à la conservation
Génétique	+++	+
Type sexuel	+	-/+
Age / Poids à l'abattage	-	-
Muscle/morceau	++	++
Alimentation	+	+++
Mode d'élevage	++	++
Conditions pré-abattage [a]	+++	incertain
Conditions d'abattage et de réfrigération des carcasses	+++	+
Durée et conditions de maturation et de conservation de la viande	++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[a] L'effet des conditions pré-abattage sur le stress oxydant et ses conséquences sur la conservation est à préciser

Propriété technologique des tissus gras de porc

Facteurs	Aptitude à la transformation	Aptitude à la conservation
Génétique	+++	++
Type sexuel	++	++
Age / Poids à l'abattage	++	++
Morceau (origine anatomique)	+++	+++
Alimentation	+++	+++
Mode d'élevage	++	++
Conditions pré-abattage, d'abattage et de réfrigération des carcasses	-	-
Durée et conditions de conservation du tissu gras	-	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Facteurs majeurs de variation des qualités des carcasses et des viandes (tissu maigre) de porc

Caractéristiques qualitatives / Facteurs	Commerciale [a]	Sanitaire	Organoleptique	Nutritionnelle	Technologique	Usage [b]	Image [c]
Génétique	+++	-	+++	++	+++	-	+++
Type sexuel	++	-	+++ (flaveur)	++	+	-	+++
Age /poids à l'abattage	++	-	+	+	-	-	+++
Muscle/morceau		-	+++	+++	++	+++	+++
Alimentation	++	++	++	+++	++	-	+++
Mode d'élevage	++	++	++	++	++	-	+++
Conditions pré-abattage	++ (pièces)	+++	+++	-/+	+++	-	++
Conditions d'abattage et de réfrigération des carcasses	++ (pièces)	+++	+++	-	+++	-	++
Durée et conditions de maturation et de conservation de la viande		+++	+++	++	+++	+++	+++
Mode de cuisson		+++	+++	+++	+++	+++	

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

[a] Caractéristiques commerciales : effets estimés sur la carcasse (génétique, type sexuel, alimentation, mode d'élevage) ou sur les pièces (jambon en particulier) : conditions pré-abattage et d'abattage-réfrigération

[b] Caractéristiques d'usage : l'effet du muscle/morceau renvoie au mode de préparation ou de transformation (cuit, cru, éché, fumé…) et donc à la praticité d'utilisation

[c] Caractéristiques d'image : l'effet du muscle/morceau renvoie à la perception nutritionnelle du produit ; l'effet des conditions pré-abattage et d'abattage-transformation renvoie à la perception des conditions de manipulation/transport des animaux et à la taille des outils d'abattage et de transformation

Facteurs majeurs de variation des qualités du jambon cuit

Caractéristiques qualitatives / Facteurs	Commerciales [a]	Sanitaires	Organoleptiques	Nutritionnelles [b]	Technologiques	Usage	Image [c]
Génétique	+++	-	++	+	+++	-	++
Type sexuel	++	-	+++ (flaveur)	+	+	-	+++
Age / poids à l'abattage	++	-	+	-	-	-	++
Muscle / morceau [d]	+++	-	+++	++	+++	-	+++
Alimentation	++	++	+	++	+	-	+++
Conditions d'élevage	++	+++	+	++	++	-	+++
Conditions de pré-abattage	+++	+++	+++	-	+++	-	++
Conditions d'abattage et de réfrigération des carcasses	+++	+++	+++	-	+++	-	++
Niveau d'élaboration du produit brut	+++	+++	++	++	+++	-	+
Salage : méthode employée, composition de la saumure	-	+++	+++	+++	+++	-	+++
Malaxage	-		+++	+	+++	-	-
Traitement thermique	-	+++	+++	+	+++	-	+
Conditionnement	-	+++	+++	+++	+++	+++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

[a] Caractéristiques commerciales du jambon brut avant transformation

[b] Caractéristiques nutritionnelles du produit fini: teneur en sel, sucres, nitrites, phosphates, lipides, composition en acides gras

[c] L'effet des conditions de pré-abattage et d'abattage renvoie à la perception des conditions de manipulation/transport des animaux et à la taille des outils d'abattage et de transformation. L'effet du salage inclut la méthode (salage par immersion : permet l'utilisation des mentions « à l'ancienne » ou « comme autrefois ») et la composition de la saumure (teneur en sel, ajout ou non de nitrites ou autres additifs)

[d] Les muscles entrant dans la composition du produit diffèrent selon la catégorie de jambon cuit, voir tableau 2.4.1.

Facteurs majeurs de variation des qualités du jambon sec

Caractéristiques qualitatives / Facteurs	Commerciales [a]	Sanitaires	Organoleptiques	Nutritionnelles [b]	Technologiques	Usage	Image [c]
Génétique	+++	-	+++	++	+++	-	+++
Type sexuel	++	-	+++ (flaveur)	+	+	-	+++
Age / poids à l'abattage	+++	-	+++	++	+++	-	+++
Muscle / morceau [d]	-	-	+++	+++	+++	-	+
Alimentation	+++	++	+++	+++	++	-	+++
Conditions d'élevage	+++	+++	+++	+++	+++	-	+++
Conditions de pré-abattage	+++	+++	+++	-	+++	-	++
Conditions d'abattage et de réfrigération des carcasses	+++	+++	+++	-	+++	-	++
Préparation du produit brut (découpe/parage)	+++	++	+	-	+++	-	-
Site d'élaboration du produit (localisation géographique)	+	-	+++	-	+++	-	+++
Salage : méthode, durée, composition du mélange salant	-	+++	+++	+++	+++	-	+++
Repos	-	+++	+++	+++	+++	-	-
Etuvage (facultatif)	-	-	+++	-	+	-	-

Séchage	-	+++	+++	+	+++	-	-
Pannage	-	+++	+++	-	+++	-	-
Affinage (durée, température)	-	++	+++	++	+++	-	+++
Préparation-Conditionnement	-	+++	+++	+	+++	+++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[a] Caractéristiques commerciales du jambon brut avant transformation
[b] Caractéristiques nutritionnelles du produit fini: teneur en sel, nitrites, lipides, composition en acides gras
[c] L'effet des conditions de pré-abattage et d'abattage renvoie à la perception des conditions de manipulation/transport des animaux et à la taille de l'outil d'abattage. L'effet de la composition du mélange salant porte sur l'ajout ou non de nitrate, nitrite ou autres additifs (voir tableau 2.4.2.)
[d] Le jambon brut n'est pas fractionné pour l'élaboration du jambon sec, cependant certaines caractéristiques qualitatives varient selon les muscles constitutifs du jambon

Effets positifs et négatifs de la production de viande et produits transformés sous AOC/AOP relativement à la production conventionnelle sur différentes caractéristiques qualitatives[a]

Caractéristiques quali	Effets positifs	Effets négatifs
Commerciales	- Valeur monétaire très supérieure de la carcasse et des pièces de porc sous AOC/AOP - Rendement en carcasse (poids de carcasse/poids vif) supérieur	- Coût de production supérieur - Carcasses nettement plus grasses (moindre teneur en maigre), pris en compte dans les règles de paiement (spécifiques à chaque filière AOC/AOP) - Variabilité accrue de la composition corporelle selon les conditions d'élevage (saison)
Organoleptiques	- Propriétés sensorielles : aspect (couleur rouge plus soutenue, moins d'exsudation), tendreté, jutosité et flaveur nettement supérieures	- Aspect : plus de gras visible (besoin d'informer le consommateur sur le rôle du gras dans la détermination des propriétés gustatives)
Nutritionnelles	- Proportion supérieure d'acides gras monoinsaturés (AGM) et inférieure d'acides gras polyinsaturés (AGPI) - Généralement (conditions extensives, pâturage), proportion supérieure d'AGPI n-3 et réduction du rapport n-6/n-3, et teneurs supérieures en composés antioxydants (vit E)	- Variabilité accrue des caractéristiques nutritionnelles selon la saison d'élevage et les ressources alimentaires disponibles
Technologique	- Souvent, pH supérieur de la viande *(si excessif, devient un défaut : viande DFD)* - Exsudation (pertes en eau) inférieures - Tissus gras : plus fermes, moins sensibles à la peroxydation (favorable à élaboration de produits secs de longue durée d'affinage)	- Variabilité accrue du pH selon la saison d'élevage (tendance à une réduction du pH aux températures basses)
Usage	- Produits consommés majoritairement sous forme de charcuteries et salaisons sèches : praticité de conservation et de consommation (nomade)	- Prix élevés des produits (certains jambons de très longue durée d'affinage (3 ans) s'apparentent à des produits de luxe)
Image	- Production extensive (animaux en extérieur sur parcours), associée pour les consommateurs à un meilleur bien-être et moindre impact environnemental - Valorisation de la biodiversité et des ressources locales (génétiques, alimentaires) - Typicité des produits, authenticité des pratiques de production et de transformation - Maintien et valorisation de savoir-faire humains - Contribution à l'économie, l'entretien et la valorisation de territoires ruraux - Secteur en croissance, dynamique positive, image favorable dans les médias favorisée par une bonne communication des acteurs	- Prix élevé des produits : image de productions et de produits peu voire inaccessibles

[a] Voir volets qualitatifs décrits ci-dessus et d'après Edwards (2005), Lebret (2008), Bonneau et Lebret (2010) et Pugliese et Sirtori (2012)

Effets positifs et négatifs de la production porcine biologique relativement à la production conventionnelle sur différentes caractéristiques qualitatives[a]

Caractéristiques quali	Effets positifs	Effets négatifs
Commerciales	- Valeur monétaire supérieure de la carcasse de porc biologique	- Coût de production supérieur - Difficultés d'approvisionnement en ressources protéiques biologiques - Teneur en maigre (TMP) réduite si les apports nutritionnels ne couvrent pas les besoins en acides aminés pour la croissance - Variabilité accrue de la composition corporelle (plus grande variabilité des conditions d'élevage et de l'alimentation au sein du cadre réglementaire bio)
Organoleptiques	- Viande pouvant contenir plus de lipides intramusculaires (LIM), favorables à la qualité sensorielle (tendreté, jutosité)	- Selon le type génétique et la conduite alimentaire, la viande peut aussi contenir moins de LIM - Variabilité accrue des caractéristiques sensorielles
Nutritionnelles	- Dans certains cas, proportion supérieure d'acides gras polyinsaturés (AGPI) dont les n-3	- Dans certains cas, proportion inférieure d'AGPI n-3 - Variabilité accrue des caractéristiques nutritionnelles, selon la conduite et les ressources alimentaires
Technologique		- Dans certains cas, pH inférieur de la viande - Variabilité accrue de la composition en acides gras des tissus gras pouvant compliquer certaines transformations (charcuteries sèches)
Usage	- Dans certains cas, moindre oxydation des lipides de la viande pendant la conservation	
Image	- Respect de la biodiversité, préservation des ressources naturelles, recherche d'un niveau élevé bien-être animal - Favorable à la santé humaine - Secteur en croissance, dynamique positive, image favorable dans les médias	- Importation de viande d'Union Européenne pour satisfaire la demande supérieure à l'offre

[a] Voir volets qualitatifs décrits ci-dessus et d'après Prunier et Lebret (2009)

Effets positifs et négatifs de la production de porcs mâles entiers relativement à la production de porcs mâles castrés chirurgicalement sur différentes caractéristiques qualitatives[a]

Caractéristiques qualitatives	Effets positifs	Effets négatifs
Commerciales	- Teneur en maigre supérieure de la carcasse - Réduction du coût de production : suppression du travail et des coûts (analgésique voire anesthésique) associés à la castration ; meilleure efficacité alimentaire ; parfois, vitesse de croissance améliorée	- Déclassement des carcasses odorantes - Fréquence accrue des défauts de carcasses (taches superficielles à meurtrissures) dus aux bagarres - Rendement en carcasse inférieur
Organoleptiques		- Risque variable mais potentiellement élevé de défauts d'odeur lors de la cuisson voire de flaveur lors de la consommation : obstacle majeur à la production de mâles entiers - Viande pouvant être moins tendre
Nutritionnelles	- Teneur inférieure en lipides - Proportion supérieure d'acides gras polyinsaturés	
Technologique	- Dans certains cas, pH supérieur de la viande *(si excessif, devient un défaut : viande DFD)*	- Moindre aptitude à la transformation (gras moins fermes) - Manque de cohésion entre les tissus gras et maigres surtout chez les génotypes maigres
Usage		- Moindre aptitude à la conservation : risque d'oxydation accru des tissus gras et des viandes
Image	- Meilleure considération du bien-être animal : pas de douleur associée à la castration, avantage essentiel de la production de mâles entiers - Moindre impact environnemental (meilleures efficacité alimentaire et rétention protéique)	- Augmentation des comportements d'agression et de monte pouvant altérer le bien-être des animaux dominés - Lors de l'achat, risque d'a priori négatif des consommateurs sensibles (ou qui ont expérimenté) aux défauts d'odeur

[a] Voir volets qualitatifs décrits ci-dessus et d'après Prunier et Bonneau (2006)

2.5. Viande bovine

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Viande Bovine
Le corpus bibliographique relatif à la viande bovine comporte 155 références. Ces références sont majoritairement européennes et internationales : seulement quatre auteurs français (tous INRAE) figurent parmi les dix auteurs les plus cités, et les deux premiers ne sont cités que huit fois (J.-F. Hocquette, B. Picard). La très grande majorité des autres auteurs n'est citée qu'une ou deux fois. De plus, très peu d'articles (7%) proviennent de revues françaises. Concernant la temporalité, 54% des références date des 10 dernières années (dont 29% les 5 dernières années, dont 11% en 2018). 82% des références proviennent d'articles issus de revues scientifiques, ce qui permet la validation scientifique de cette section. Parmi les 60 journaux différents, le plus cité est Meat Science (25% des références) ce qui est cohérent car il s'agit d'une, voire de la, revue de référence dans le domaine, avec une couverture internationale.
Ce corpus possède la particularité d'intégrer la législation à hauteur de 5% des références. Cette section ne présente que peu d'autocitations et peu de référence « engogames » à INRAE. Le corpus semble donc équilibré et avec une large couverture.

2.5.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation

En Europe, la viande bovine est issue exclusivement ou presque de l'espèce *Bos taurus.* Si l'on fait abstraction de la viande de veau qui présente des caractéristiques spécifiques (viande claire), la viande bovine est produite par des jeunes bovins mâles entiers ou des génisses, des vaches de réforme de races allaitantes ou laitières et, dans une moindre mesure par des bœufs (animaux mâles castrés).

Avec un cheptel bovin d'environ 19 millions de têtes[31], la France est le premier producteur de viande bovine dans l'Union européenne. La production annuelle d'environ 1,25 million de tonnes équivalent poids carcasses (EqC)[32] de gros bovins représente environ 19% de celle de l'UE28 (FranceAgriMer, 2017c). Cette production est issue pour 47% de vaches, pour 30% de jeunes bovins mâles, pour 17% de génisses et pour 5% de bœufs (FranceAgriMer, 2019b). Le cheptel laitier est composé principalement de races à haute production laitière (type Holstein) ; le cheptel allaitant est quant à lui composé principalement de races continentales (Charolaise, Limousine, Blonde d'Aquitaine…), sélectionnées pour leur viande maigre, leur rendement élevé et leur rapidité de croissance (Chotteau, 2014). Le secteur amont de la filière de la viande bovine a développé assez récemment sa distribution en se basant sur les signes officiels de qualité (SIQO) : Label Rouge (17 Labels), 3 Indications Géographiques Protégées (IGP), 4 AOC-AOP (Ellies, 2014 citée par Gruffat *et al*. (2015)). Cependant moins de 5% de la viande bovine est distribuée sous signes de qualité. Les autres démarches de qualité se basent sur des mentions valorisantes du produit (fermier, race…) et surtout sur la certification des produits par les marques des distributeurs et des transformateurs.

Le taux d'auto-approvisionnement en viande bovine en France est de 95%. Il est à noter que celui-ci était supérieur à 100% jusqu'en 2013. En 2018, les importations de viande bovine ont représenté 333,7 milliers de tonnes, dont 63% sous forme fraîche (principalement en provenance des Pays-Bas, d'Allemagne, d'Irlande, de Belgique et d'Italie), 31% sous forme congelée (principalement en provenance d'Irlande, d'Allemagne, de Pologne, des Pays-Bas et d'Italie) et 6% sous forme transformée. Toutes formes confondues, 98% des importations de viande bovine étaient issues de l'UE28 et seulement 2% des pays tiers (FranceAgriMer, 2019b).

Au cours des 20 dernières années, la consommation de viande bovine a diminué globalement en Europe et cette diminution a été plus marquée dans les pays traditionnellement consommateurs de viande bovine comme l'Allemagne, l'Italie et la France. Malgré tout, la France demeure le premier consommateur de l'UE avec en moyenne 21 kg EqC/an/personne (Gruffat *et al.*, 2015). Au cours des 5 dernières années, la consommation est restée stable oscillant entre 20,1 et 20,9 kg EqC selon les années, avec une hausse de 2,2% entre 2017 et 2018 (FranceAgriMer, 2019b). Les achats des ménages pour leur consommation à domicile diminuent, cette diminution étant compensée par l'évolution positive de la consommation de viande bovine dans les plats préparés et la consommation de viande bovine hors domicile (FranceAgriMer, 2019b). Par ailleurs, dans les achats de viandes de bœuf déclarés des ménages, on a observé entre 2010 et 2016 une diminution de 11% pour les viandes à rôtir et de 22% pour les viandes à bouillir. A l'inverse, durant la même période, on a observé une augmentation de 12% des achats de viande hachée fraîche (FranceAgriMer, 2017c).

2.5.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets

Dans cette section, on considèrera que la viande bovine « non ou peu transformée » correspond au terme « viande fraîche » tel que défini par le règlement (CE) n°853/2004, à savoir les viandes n'ayant subi aucun traitement de conservation autre que la réfrigération

[31] 19 380 000 bovins en 2018 (FranceAgriMer, 2019), ce qui représente 21% du cheptel bovin européen (FranceAgriMer, 2017)

[32] Données 2016. NB : auquel s'ajoute 0,180 million de tonnes EqC pour la viande de veau en 2016 (FranceAgriMer, 2017), pour laquelle la France représente 29% de la production de l'UE28

ou la surgélation, y compris les viandes conditionnées sous vide ou sous atmosphère contrôlée (Commission européenne, 2004). Une spécificité importante de la viande bovine, par rapport aux autres espèces de boucherie, est la proportion très élevée de son utilisation sous forme non ou peu transformée (85% selon Ennifar (2011)).

2.5.2.1. Propriété commerciale

L'originalité de la production française est sa diversité de **types de production** avec deux origines principales (races allaitantes et laitières), des animaux menés généralement en races pures, et des carcasses lourdes issues de types de conduite variés (Micol et Lherm (2010) cités par Gruffat *et al*. (2015)). Les jeunes bovins mâles entiers (< 24 mois) et les génisses (femelles n'ayant jamais vêlé, > 18 mois) abattus sont issus majoritairement de races allaitantes (respectivement pour 65% et 86% d'entre eux) ; les veaux (< 8 mois) et les vaches (femelles de réforme, > 5-6 ans) abattus sont issus majoritairement de races laitières (respectivement pour 60% et 54% d'entre eux) (Ennifar, 2011).

Sur le plan technologique, l'abattage des bovins et la découpe des carcasses qui en sont issues sont considérés comme une première transformation (Belaud, 2008). Selon le règlement CE n 853/2004, la carcasse correspond au corps d'un animal après l'abattage et l'habillage (Commission européenne, 2004).

Les caractéristiques de l'animal déterminent celles de la **carcasse**. Dans l'Union européenne, les établissements abattant plus de 75 gros bovins par semaine, sont soumis à un classement qualitatif des carcasses communément appelé « classement européen » qui repose sur 3 critères : la catégorie (elle-même fonction de l'âge et du sexe), la conformation et l'état d'engraissement (*cf.* chapitre 1). Si la conformation dépend principalement du type racial, l'état d'engraissement dépend à la fois du type racial, de l'âge et du degré de finition de l'animal. Le poids de la carcasse « chaude », ou plus précisément le poids total des 2 demi-carcasses issues d'un même animal, généralement mesuré en fin de processus d'abattage et avant le refroidissement, sert de référence quantitative voire qualitative lors des transactions commerciales et est souvent utilisé comme indicateur pour exprimer la production ou la consommation de viande à l'échelle nationale ou internationale (EqC). Il correspond au poids vif du bovin sans le contenu digestif (aliments en cours de digestion dans le tractus digestif) et le cinquième quartier (constitué de la peau, du gras interne, des abats rouges et blancs, du sang, du tractus digestif, des parties inférieures des membres, de la tête, … qui sont retirés lors du processus d'abattage). Selon le type de « présentation » de la carcasse, on retire ou non la queue et les parties charnues du diaphragme (hampe, onglet). Il est à noter que d'autres systèmes de classement sont utilisés hors Europe, notamment aux U.S.A. (*USDA Beef Grading System*), au Japon (*Japan Meat Grading Association*) et en Australie (*Meat Standards Australia*) (Polkinghorne et Thompson, 2010). A la différence du système européen qui ne porte que sur la carcasse proprement dite, ces systèmes intègrent des critères relatifs à la qualité de la viande, en particulier pour le système australien. Néanmoins, en Europe, de nombreux opérateurs de la filière appliquent certains critères complémentaires (pH, couleur de la viande et/ou du gras p.ex.) qui sont souvent fixés dans un cahier des charges.

Tableau 2.5.1. Principaux systèmes de classement des carcasses utilisés dans le monde (adapté de Ellies-Oury *et al*. (2020)).

<table>
<tr><td>Pays
Système</td><td>Europe
EUROP</td><td>Afrique du sud
S. Africa</td><td>Canada
Canada</td><td>Japon
JMGA</td><td>Corée du Sud
Korea</td><td>USA
USDA</td><td>Australie
MSA</td></tr>
<tr><td>Unité de classement</td><td colspan="6">Carcasse</td><td>Pièce</td></tr>
<tr><td>Facteurs pré-abattage</td><td colspan="6"></td><td>Implants hormones et promoteurs de croissance, espèce (Bos indicus)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Abattage</td><td colspan="7">Poids carcasse, sexe</td></tr>
<tr><td>Conformation
Etat engraissement</td><td>Dentition
Graisse rognon</td><td>Conformation</td><td></td><td></td><td></td><td>Stimulation électrique, méthode suspension</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Refroidissement</td><td rowspan="4"></td><td colspan="6">Persillé, couleur de la viande</td></tr>
<tr><td colspan="4">Couleur et épaisseur du gras</td><td colspan="2">Score ossification</td></tr>
<tr><td colspan="2">Surface de section du muscle long dorsal</td><td rowspan="2">Epaisseur gras
Hauteur bosse
pH ultime</td></tr>
<tr><td>Texture</td><td>Luminosité viande
Brillance gras
Texture gras
Fermeté gras
Epaisseur côte</td><td>Texture
Fermeté
Maturité maigre</td><td>Texture viande
Gras côte
Gras rognon
Gras périrénal</td></tr>
</table>

Post refroidissement		Durée maturation Méthode cuisson

A l'abattoir, les demi-carcasses de bovins peuvent être découpées en quartiers ou au maximum en trois morceaux. La « mise en quartiers » peut être considérée comme une découpe primaire. Toute découpe ou tout désossage ultérieur doit être effectué dans un atelier de découpe (Commission européenne, 2004). La proportion de pièces « nobles » (au sens : viandes à cuisson rapide, contenant peu de collagène) étant plus élevée dans le quartier arrière, les quartiers arrière et avant d'une même carcasse sont commercialisés ensemble ou séparément en fonction de leur utilisation finale.

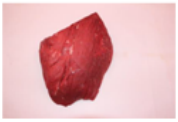
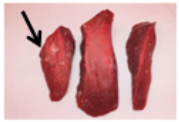
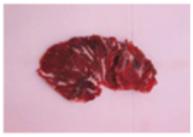
La découpe et le désossage des **quartiers** génèrent des **pièces** qui, pour les plus nobles d'entre elles, correspondent à des muscles individualisés. Les qualités organoleptiques des viandes varient fortement d'un muscle à l'autre (*cf.* section relative à la qualité organoleptique), avec pour conséquence un mode d'utilisation variable (viandes à griller, à rôtir ; à braiser, à bouillir). Ceci explique le recours aux **dénominations** usuelles des viandes de boucherie (filet, entrecôte, araignée, etc.). En France, ces dénominations sont réglementées par l'arrêté relatif à la publicité des prix des viandes de boucherie et de charcuterie du 18 mars 1993, actualisée en 2014 (République Française, 2014). Tenant compte que certaines dénominations traditionnelles connues d'un public averti ne sont plus comprises des jeunes consommateurs, que certaines dénominations regroupent des morceaux de qualités différentes et qu'au niveau industriel, le développement de l'activité ainsi que les nouvelles obligations de traçabilité rendent la réglementation difficile à appliquer, cet arrêté a été modifié le 10 juillet 2014 (République Française, 2014). Une partie des morceaux de viande, auparavant triés par muscle sont désormais regroupés selon leur potentiel de qualité. Selon le type de morceau, les critères retenus sont : la tendreté, le gras ou encore la teneur en collagène. Les dénominations génériques de regroupement telles que « steak », « rôti » ou « bourguignon » doivent être accompagnées d'un repère sous la forme d'une à trois étoiles indiquant au consommateur le potentiel de qualité du morceau. Cette dénomination est accompagnée de la destination culinaire du morceau (« à rôtir, à griller, à braiser, à bouillir, à bifteck, à pot au feu, à bourguignon, à fondue, à carpaccio ») (DGCCRF)[33].

Les morceaux bien connus et bien identifiés des consommateurs continuent d'apparaître sous leur nom usuel, par exemple le filet, le faux-filet, le rumsteck ou l'entrecôte pour la viande de bœuf. Les noms bouchers moins connus sont rassemblés sous des dénominations génériques pour plus de clarté. Certaines sont des formes de présentation de la viande (steaks, rôtis…), d'autres sont des noms de recettes (bourguignon, pot au feu) qui ne viennent pour autant pas remplacer l'indication du mode de cuisson. Les noms de morceaux moins connus (mouvant, poire, rond de tranche, dessus de palette ou autres nerveux de gîte) ne sont plus mentionnés sur l'étiquette, puisqu'ils n'évoquaient rien à de nombreux consommateurs (Sans et Legrand, 2018).

Exprimé par une, deux ou trois étoiles, le potentiel de qualité indique la tendreté potentielle pour les morceaux à griller ou rôtir en fonction uniquement du morceau considéré. Cette qualité potentielle varie donc selon le muscle, la localisation dans le muscle et la préparation bouchère du morceau. Pour les morceaux à mijoter, la qualité correspond au moelleux, très lié à la teneur en collagène du morceau, celle-ci étant également fonction du muscle, de la localisation intra-muscle et de la préparation bouchère.

[33] https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/denomination-des-viandes-boucherie-et-charcuterie

Tableau 2.5.2 Extrait du guide de découpe de la viande bovine avec des exemples de morceaux pouvant fournir des steaks (Interbev).

Dénomination usuelle	Mentions complémentaires	Description des morceaux	Niveau de préparation	Photos	
Steak★★★	A griller	Plat de mouvant de tranche affranchi	Partie importante du Mouvant paré et épluché, affranchi côté rotule. Tranché dans sa largeur.		
Steak★★★	A griller	Rond de tranche affranchi	Rond de tranche paré et épluché, « nerf » central retiré, affranchi côté rotule. Tranché dans sa largeur.		
Steak★★★	A griller	Entame du Tende de tranche	Premier tiers, côté poire, du cœur de tende de tranche paré et épluché (artère fémorale retirée). Tranché dans la largeur.		
Steak★★★	A griller	Araignée	Entièrement parée et dénervée.		

Différents produits peuvent être obtenus à partir de chacune des pièces bouchères issues de l'arrêté du 18 mars 1993, avec leurs nouvelles dénominations (Tableau 2.5.3). Ainsi, le paleron peut-il donner une fois tranché des steaks** ou * à griller selon son degré de préparation (retrait ou non du « nerf » central, niveau de parage, d'épluchage et d'affranchi) mais aussi être commercialisé en plus gros morceau en paleron*** à mijoter. Dans ce cas, la dénomination reprend le terme de paleron connu des consommateurs pour ce mode de cuisson, alors qu'il n'est plus identifié en tant que tel pour les cuissons rapides.

Tableau 2.5.3 Extrait du guide de découpe « miroir » de la viande bovine avec des exemples de ce qu'on peut obtenir à partir du paleron (Interbev)

Pièce bouchère	Dénomination usuelle	Mention complémentaire	Description des morceaux	Niveau de préparation	Photos illustratives	
Paleron	Steak ★★	A griller	Paleron sans nerf central, affranchi	Paleron affranchi de son côté « nerf », entièrement démonté, paré et épluché. Tranché dans la largeur.		
Paleron	Steak ★	A griller	Paleron avec nerf central	Paleron avec nerf central, affranchi de ses 2 extrémités, paré. Tranché dans la largeur.		
Paleron	Paleron ★★★	A mijoter	Paleron	Viande préparée exclusivement à partir du paleron		

v). v).

Tous les niveaux de qualité traduits par des étoiles ne sont pas forcément associés à tous les nouveaux morceaux, ni à toutes les destinations culinaires.

Depuis 2000, en application des Règlements (CE) n°1760/2000 (Commission européenne, 2000a) et n°1825/2000 (Commission européenne, 2000b) dans le contexte de la traçabilité de la viande bovine, l'**origine** de celle-ci doit être communiquée au consommateur final, sauf quand celle-ci est incorporée dans un produit transformé. Cette exigence porte sur la naissance, l'engraissement, l'abattage et la découpe. Le lieu est exprimé par la mention du nom du pays (pays de l'U.E. ou pays tiers) ou par la mention « U.E. » si le lot de viande est issu d'animaux provenant de plusieurs pays de l'U.E. Cette information apparait sur l'emballage s'il s'agit de viandes préemballées, elle doit être affichée dans les autres cas. Il est à noter que cette exigence est d'application plus récente pour les espèces porcine, ovine et caprine, à savoir depuis l'entrée en vigueur du Règlement (UE) n°1169/2011 (Union Européenne, 2011) concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires.

Même si celle-ci constitue un élément important de différenciation de la qualité de la viande bovine, la **race** ne fait pas l'objet d'une mention obligatoire. Elle est cependant très souvent communiquée au consommateur final, en lien ou non avec le respect d'un cahier des charges incluant notamment cette caractéristique.

Les caractéristiques de la carcasse sont fortement influencées par les facteurs génétiques, en particulier par la race (Bozkurt et Dogan, 2018). Lors de la croissance et de l'engraissement, on observe successivement une croissance du tissu musculaire (augmentation du rapport entre muscles et os), suivi d'une croissance du tissu adipeux (augmentation du rapport entre graisse et muscles) (Lonergan *et al.*, 2019). Néanmoins, cette évolution varie d'une race à l'autre en fonction de leur maturité. Les races à maturité tardive, telles que les races européennes continentales (notamment les races françaises Charolaise, Limousine, Blonde d'Aquitaine), permettent de produire des carcasses lourdes contenant peu de graisse. A l'inverse, les races à maturité précoce, telles les races traditionnelles anglo-saxonnes peuvent être abattues à des poids plus faibles. Les races laitières présentent des dépôts adipeux internes plus importants alors que les races à viande présentent des dépôts sous-cutanés plus importants. Durant la croissance et le développement, la graisse est déposée d'abord au niveau intermusculaire, puis au niveau sous-cutané, et en dernier lieu au niveau intramusculaire. Dès lors, les races à maturité précoce présentent des dépôts de graisse intramusculaire plus importants que les races à maturité tardive (Irshad *et al.*, 2013). *De facto*, l'âge auquel un animal est abattu détermine le poids et la composition de la carcasse qui en sera issue en fonction du stade de maturité atteint.

Les races dites « à viande » présentent une proportion de muscles plus importante que les races laitières, ce qui donne à la carcasse une conformation plus importante associée à un rendement d'abattage et à un rendement de découpe plus élevés. Cette différence est plus marquée encore chez les bovins dits « culards » qui présentent une hyperplasie et une hypertrophie musculaires, associées à un faible dépôt de graisse (Clinquart *et al.*, 1998 ; Lonergan *et al.*, 2019). Le caractère culard est expliqué par une mutation du gène codant pour la myostatine ou Growth and Differentiation Factor 8 (GDF8) (Grobet *et al.*, 1997). Cette mutation peut exister sous plusieurs formes différentes selon les races où elle a été identifiée (Blanc Bleu Belge, Asturiana, Piémontaise (Bellinge *et al.*, 2005). Les animaux homozygotes pour cette mutation présentent un développement musculaire très important.

Le **mode d'élevage** peut lui aussi influencer la qualité commerciale de la carcasse, souvent par son effet sur la vitesse de croissance et le degré de maturité. Il est même possible de prédire certaines caractéristiques de la carcasse et de la viande chez le jeune bovin, la génisse et la vache allaitante à partir de facteurs caractérisant le mode d'élevage (Soulat *et al.*, 2018; Soulat *et al.*, 2016).

2.5.2.2. Propriété sanitaire

Les produits alimentaires issus de la filière bovine sont au même titre que les autres filières confrontées à de nombreux dangers microbiologiques. Parmi les dangers bactériens, les *E. coli* producteurs de shiga-toxines et *Salmonella enterica* sont les dangers faisant l'objet de plus de préoccupations (Guillier *et al.*, 2013 ; Mughini-Gras *et al.*, 2018 ; Tuominen *et al.*, 2007). *Toxoplasma gondii* et *Teania saginata* sont les principaux dangers parasitaires pour les viandes bovines ; Blaga (2015) ; Dupuy *et al.* (2014).

Facteurs de risque aux niveaux des élevages

La prévalence de Salmonella au niveau des bovins en Europe est de l'ordre de 2% (Gutema *et al.*, 2019). Certains sérovars sont plus représentés dans la filière bovine (notamment le sérovar Dublin). Les facteurs de risques au niveau des élevages sont difficiles à identifier. Cependant la présence de troupeaux infectés dans un rayon proche des fermes, la présence de nuisibles semblent être des facteurs de risques (Agren *et al.*, 2017).

Les facteurs de risque relatifs liés à la présence où au niveau d'excrétion des *E. coli* STEC sont également difficiles à identifier au niveau des élevages mais la présence de bovins porteurs par le passé et le mouvement d'animaux semblent être des facteurs de risque (Widgren *et al.*, 2015). Contrairement à *Salmonella*, les *E. coli* STEC ne causent aucun signe clinique chez les bovins. La colonisation des bovins est généralement transitoire et la concentration et la fréquence de l'excrétion d'E. coli STEC varient selon les animaux (Anses, 2017a). Par exemple, la présence des *E. coli* STEC dans l'environnement de la ferme est attribuable aux animaux super-excréteurs (plus de 10^4 UFC *E. coli*/g d'excréments).

Le rôle des bovins dans les cas sporadiques de campylobactérioses humaines reste à éclaircir, mais les données génomiques indiquent qu'une part significative des cas serait associée aux bovins (Thepault *et al.*, 2018).

Le stress des animaux pendant le transport à l'abattoir et la durée de la période de stabulation ont été identifiés comme des facteurs influençant l'excrétion fécale de Salmonella et d'*E. coli* pathogène ainsi que la contamination du bétail avant l'abattage (Niyonzima *et al.*, 2015).

La séroprévalence des bovins à l'abattoir pour *Toxoplasma* est de 11% (Blaga *et al.*, 2015). Cette séroprévalence est significativement plus élevée chez les animaux âgés (plus de 9 mois) que chez les jeunes. Ceci est vraisemblablement lié au mode de contamination par voie orale des animaux, et au cumul de l'exposition au cours de la vie de l'animal.

Importance de l'abattage

La maitrise de l'hygiène des procédures abattage est un élément essentiel de la maitrise de l'ensemble des dangers biologiques. La réglementation du paquet hygiène définit les obligations des professionnels (application des bonnes pratiques d'hygiène, HACCP, traçabilité des produits) et des services de contrôle (inspection des animaux et des carcasses).

Importance de la transformation des produits

Comme pour la filière ovine et porcine, l'application des bonnes pratiques d'hygiène et de l'HACCP dans la filière bovine est un élément essentiel de la maitrise des flores microbiennes. Le profil temps-température des produits à la sortie de l'abattoir conditionne les niveaux des flores bactériennes pathogènes et d'altération (*Pseudomonas*, flores lactiques) (Efsa Panel Biol Hazards BIOHAZ, 2016; Efsa Panel on Biological Hazards, 2014).

Importance des pratiques des consommateurs

Si la maitrise de la chaine du froid impacte la croissance des dangers microbiologiques dans les viandes, les pratiques de cuisson des viandes bovines hachée présentent le principal facteur de risque au niveau des consommateurs (Anses, 2015b ; 2017a).

2.5.2.3.Propriété organoleptique

Les qualités organoleptiques sont les qualités perçues par les sens du consommateur. On distingue généralement la couleur, la tendreté, la jutosité et la flaveur (Monin, 1991). La variation des qualités de la viande bovine fournie aux consommateurs résulte des effets combinés de facteurs biologiques et de facteur technologiques. Les premiers sont des facteurs responsables des différences entre animaux - comme la race, l'âge, le sexe et l'alimentation - et entre muscles d'un même animal – c'est-à-dire la localisation anatomique et la fonction physiologique (Monin, 1991). Les facteurs technologiques correspondent à l'ensemble des traitements appliqués aux animaux pour les transformer en viande (Ouali, 1991), du transport vers l'abattoir jusqu'à la conservation voire la préparation finale de la viande. Le consommateur est particulièrement attentif aux variations de la qualité des produits qu'il consomme. Lorsqu'elles sont excessives, elles peuvent entraîner un rejet du produit. La viande n'échappe pas à la règle, d'autant plus qu'il n'est pas possible de corriger ses variations par mélange ou homogénéisation.

La **couleur** est, chronologiquement, le premier critère d'appréciation de la viande par le consommateur. En raison du développement de la distribution des viandes en grandes et moyennes surfaces, ce paramètre prend de plus en plus d'importance. Lors de l'achat d'un morceau de viande de bœuf, le consommateur recherche une couleur rouge vif qu'il associe au degré de fraîcheur du produit.

La couleur rouge de la viande est liée à sa teneur en myoglobine, pigment respiratoire musculaire. Celle-ci varie entre espèces (bovin > porc > volaille) et entre muscles d'un même animal (Renerre, 1990; Renerre et Labas, 1987). Cette variation est à relier au type métabolique des fibres musculaires : plus la proportion de fibres musculaires dites « rouges », riches en myoglobine et à forte activité respiratoire est élevée et la proportion de fibres musculaires dites « blanches » pauvres en myoglobine et à activité glycolytique est faible, plus la viande apparaît rouge et vice versa. Au sein d'une espèce, en particulier au sein de l'espèce bovine, la variation de la composition en fibres musculaires –et donc de la couleur de la viande- est largement expliquée par la race, le sexe, le type de muscle, voire par des facteurs d'élevage (Choi et Kim, 2009 ; Lee *et al.*, 2010). Une étude réalisée sur des jeunes bovins de 15 races bovines européennes, dont 2 races françaises à savoir Charolaise et Limousine, a permis de classer ces races en quatre classes 'très claire et rouge pâle', 'clair et pâle', 'rouge' et 'foncé et rouge sombre'. Ces groupes ont pu être reliés à la taille corporelle, aux caractéristiques de la carcasse, au développement et à la structure des tissus musculaire et adipeux, et étaient contrôlés par des différences dans l'expression des gènes au sein de chaque race (Ripoll *et al.*, 2018). Le sexe a une influence sur la teneur en pigments, qui croît plus vite chez les femelles que chez les mâles, la différence étant d'autant plus importante que les muscles sont plus colorés (Renerre 1986, cité par Monin (1991)). En pratique cependant, la viande de femelles est souvent issue vaches allaitantes ou laitières qui sont abattues à un âge plus important que les jeunes bovins mâles. Dans ce cas, c'est l'âge qui explique la coloration marquée, plus que le sexe. En effet, la teinte rouge de la viande augmente avec l'âge, quel que soit le type sexuel de l'animal.

La couleur de la viande peut également être liée à l'ultrastructure du muscle, elle-même influencée par le pH. Les viandes de bœuf à pH final élevé (voir section relative à la qualité technologique) présentent une couleur anormalement foncée. Il est donc important de tenir compte de ce paramètre lors de la détermination de la couleur des viandes.

La teinte de la viande varie non seulement en fonction de la teneur en myoglobine du muscle mais aussi en fonction de son état d'oxygénation ou d'oxydation. La myoglobine réduite non oxygénée est rouge pourpre. La myoglobine réduite oxygénée est rouge vif : elle influence favorablement l'acceptabilité de la viande par le consommateur qui considère cette teinte comme un critère de fraîcheur. La myoglobine oxydée, ou metmyoglobine, est rouge-brun : elle entraîne une réaction de rejet par le consommateur (Mancini et Hunt, 2005). L'état d'oxygénation ou d'oxydation de la myoglobine est principalement lié aux techniques de traitement et de transformation utilisées après l'abattage. La sensibilité à l'oxydation est par contre influencée par des facteurs biologiques (âge et sexe, muscle) et par des facteurs nutritionnels, en particulier par l'apport d'antioxydants via l'alimentation des animaux (Castillo *et al.*, 2013 ; Chauhan *et al.*, 2014; Descalzo et Sancho, 2008 ; Jamilah *et al.*, 2009).

On considère généralement que les muscles des animaux élevés au pâturage présentent une couleur plus foncée et il n'est pas exclu que l'exercice lié aux mouvements des animaux puisse jouer un rôle. La couleur plus foncée peut s'expliquer par une modification de la répartition des fibres musculaires, plus orientée vers un métabolisme oxydatif (Mancini et Hunt, 2005). Il n'est cependant pas facile d'évaluer l'effet de ce seul facteur sachant qu'il est souvent combiné à ceux de l'âge, de la race et du type de muscle (Dunne *et al.*, 2011). Par ailleurs, l'herbe est une source importante d'antioxydants qui contribuent à la stabilité de la couleur de la viande (Mancini et Hunt, 2005).

La graisse visible, tant à l'extérieur (graisse de couverture) qu'à l'intérieur (persillé) du muscle, peut présenter un couleur variable, du blanc au jaune plus ou moins prononcé. Cette variation est expliquée principalement par l'âge et l'historique alimentaire de l'animal. Les bovins issus de systèmes d'élevage extensifs au pâturage présentent généralement un gras plus jaune que les bovins issus de systèmes intensifs et nourris avec des concentrés. Cela s'explique par l'accumulation dans le tissu adipeux de caroténoïdes présents naturellement dans les fourrages. Bien qu'un gras jaune soit souvent mal apprécié par le consommateur, il convient de noter qu'il présente une composition en acides gras et un contenu en antioxydants plus favorables (voir section relative aux qualités nutritionnelles) (Dunne *et al.*, 2009).

Un épuisement des réserves énergétiques musculaires durant la période qui précède immédiatement l'abattage donne lieu à une coloration plus foncée de la viande, très spectaculaire chez les gros bovins dont la viande est plus rouge que celle des monogastriques. Cette anomalie est visuellement perceptible lors de la découpe de la carcasse et on parle alors de viande « à coupe sombre » ou *Dark Firm Dry* (DFD). Elle est associée à un pH anormalement élevé (voir section relative à la qualité technologique).

Les conditions de conservation de la viande influencent fortement la stabilité oxydative de la myoglobine et donc l'évolution de la couleur, en particulier la température et l'atmosphère. L'oxydation étant température dépendante, la température de réfrigération doit être la plus faible possible. L'oxydation est par ailleurs fonction de la concentration en oxygène. Le conditionnement sous vide permet d'évacuer l'oxygène et donc de limiter l'oxydation. Par contre, il entraîne une disparition de la couleur rouge vive, liée à l'oxygénation de la myoglobine et considérée par le consommateur comme un critère de fraîcheur. Ce mode de conditionnement rencontre donc peu de succès auprès des consommateurs. Une alternative consiste à modifier l'atmosphère dans le conditionnement, le plus souvent en augmentant la concentration en oxygène, en particulier pour la viande bovine dont la couleur rouge est très prononcée (70 à 80% d'oxygène au lieu de 21% dans l'air atmosphérique, souvent associé à du dioxyde de carbone à raison de 20 à 30% pour produire un effet antimicrobien contre les flores microbiennes d'altération) (Singh *et al.*, 2011). A une pression partielle élevée en oxygène, l'oxydation de la myoglobine est limitée et il est donc possible d'augmenter la durée de conservation de la viande (Mancini et Hunt, 2005). Par contre, à cette concentration, l'oxygène favorise l'oxydation des lipides. Ce type de conditionnement convient dont plutôt à des viandes rouges et maigres. Une alternative à l'oxygène est le monoxyde de carbone : en l'absence d'oxygène et à une concentration faible (de l'ordre de 0,3 à 0,4%), il donne lieu à la formation de carboxymyoglobine d'un rouge vif intense dont la couleur est très proche de la myoglobine oxydée. L'utilisation du monoxyde de carbone n'est cependant pas autorisée dans l'UE, considérant qu'elle peut induire le consommateur en erreur puisque celui-ci utilise la coloration rouge comme indicateur de la fraîcheur de la viande (Djenane et Roncales, 2018).

La cuisson provoque une dénaturation de la myoglobine et expose le noyau hème (contenant le fer) à l'environnement extérieur. La dénaturation de la globine de la metmyoglobine (myoglobine oxydée) donne lieu à la formation de ferrihémochrome responsable de la couleur interne brun foncé des viandes cuites. La dénaturation de la globine de la myoglobine réduite donne lieu à la formation de ferrohémochrome de couleur rouge-rose qui est facilement oxydé en ferrihémochrome (Faustman et Suman, 2017). Le transfert de chaleur se faisant progressivement de la surface vers le centre de la viande, la modification de couleur est utilisée par le consommateur comme indicateur du degré de cuisson en fonction de ses préférences pour une viande plus ou moins cuite : on peut estimer que les niveaux 'saignant', 'rosé' et 'à point' correspondent à des températures internes de respectivement 60 °C, '71 °C et 82 °C (Cornforth, 1994). Lorsque la viande a été soumise antérieurement à une conservation sous atmosphère riche en oxygènes, la température à laquelle la globine dénature peut être légèrement plus faible car l'oxymyoglobine est plus sensible à la chaleur que la déoxymyoglobine (et la metmyoglobine) (Mancini et Hunt, 2005).

Il convient de noter que la couleur brune observée à la surface de la viande cuite est expliquée également par des pigments issus de réactions de Maillard qui n'impliquent pas la myoglobine (Faustman et Suman, 2017).

La **tendreté** peut être considérée comme le composant mécanique de la texture de la viande, le deuxième composant étant la jutosité (Dransfield, 1994). La tendreté mesure donc la facilité avec laquelle une viande se laisse couper. Beaucoup de consommateurs classent ce paramètre en première position parmi les critères qui déterminent la qualité de la viande.

Paradoxalement, la tendreté est souvent exprimée par son contraire : la dureté. Ce paramètre peut être mesuré facilement puisqu'il représente la résistance mécanique lors du cisaillement ou de la mastication. Ce paramètre est très souvent mesuré sur des viandes cuites puisque les viandes non hachées ou non tranchées finement sont consommées le plus souvent après cuisson. La dureté de la viande dépend essentiellement de deux composants structurels protéiques (Ouali, 1991 ; Ouali *et al.*, 2006). Le premier est le collagène, constituant principal du tissu conjonctif. On n'observe pas de modification importante du collagène *post-mortem*. Sa résistance mécanique est donc considérée constante et on l'associe à ce que l'on appelle souvent la 'dureté de base'. Le deuxième composant est constitué par les myofibrilles, plus particulièrement par les protéines myofibrillaires. Leur résistance mécanique n'est pas constante *post-mortem*. On distingue habituellement 3 périodes. La première précède l'état de rigidité cadavérique, on l'appelle 'état *pre rigor*' ou 'état pantelant' parce qu'au cours de celui-ci la structure musculaire est relâchée. Elle est suivie par la rigidité cadavérique ('*rigor mortis*') qui devient maximale quelques heures après l'abattage chez les bovins. Cet état correspond à des valeurs maximales de résistance mécanique que l'on peut mettre en évidence par la mesure de la 'force maximale de cisaillement' c'est-à-dire la force maximale qui est appliquée au cours d'une épreuve de cisaillement d'un échantillon de viande. La valeur maximale est atteinte 1 à 2 jours après l'abattage chez les bovins. Les muscles se figent alors dans l'état de contrainte auquel ils étaient soumis. La contrainte qui s'exerce via les tendons sur les muscles de la carcasse suspendue par le tendon d'Achille peut être réduite par un mode de suspension alternatif ('tenderstretch') consistant à accrocher la carcasse *via* le bassin (Warner *et al.*, 2010).

Ensuite, on observe une diminution de la résistance mécanique de la viande qui résulte d'une fragilisation de la structure myofibrillaire, elle-même expliquée par une protéolyse partielle de certaines protéines-clés impliquées dans la constitution de la structure des myofibrilles. Cette protéolyse se produit dès l'abattage mais ses effets favorables sur la tendreté sont masqués par le développement de la rigidité cadavérique au cours des 24 premières heures. Diverses enzymes protéolytiques endogènes sont impliquées dans ce processus. Les principales sont des 'protéases calcium dépendantes' communément appelées 'calpaïnes' (Ouali *et al.*, 2006). Les protéines impliquées dans l'apoptose, mort programmée des cellules en réponse à un signal, qui est déclenchée par la privation des muscles en nutriments et en oxygène après la mise à mort jouent également un rôle dans l'attendrissage, plus particulièrement les capsases, des peptidases à cystéine, les serpines et les protéines de type HSP ('Heat Shock Proteins') (Lian *et al.*, 2013 ; Mohanty *et al.*, 2010 ; Ouali *et al.*, 2013 ; Ouali *et al.*, 2006 ; Park *et al.*, 2010). La vitesse d'attendrissement est dépendante de la température : entre 0 et 40 °C, le coefficient de température Q_{10} de ce mécanisme enzymatique est estimé à 2,4, ce qui signifie que chaque fois que la température est abaissée de 10°C, la vitesse d'attendrissage est divisée par 2,4 (Davey et Gilbert, 1976 cités par Ouali (1991). Le refroidissement des carcasses appliqué après abattage et la réfrigération des viandes qui en sont issues, imposés par la législation européenne pour limiter le développement des microorganismes, ralentit dès lors très fortement ce processus. La vitesse d'attendrissage est par ailleurs dépendante du type métabolique des fibres musculaires et donc de l'espèce (volaille > porc > bovin), ce qui explique un délai très variable pour atteindre un niveau de tendreté suffisant : ainsi, à titre indicatif, James et James (2002) estiment qu'il faut 10 jours pour atteindre 80% de la maturation chez le bovin *vs.* 4 jours chez le porc et 0,3 jour chez la volaille. Il est donc nécessaire de « maturer »[34] les viandes bovines, c'est-à-dire de les conserver au-delà du temps nécessaire au refroidissement des carcasses et à leur découpe. Les viandes bovines produites en Europe sont habituellement soumises à une maturation d'une à deux semaines et, au niveau industriel, celle-ci est souvent réalisée après découpe de la carcasse et conditionnement sous vide pour limiter le développement de flores microbiennes aérobies, l'oxydation des pigments et des lipides, ainsi que la perte d'eau par évaporation. A titre de référence la norme NF V 46-001 préconise une durée minimale de maturation de 7 jours pour les viandes à griller ou à rôtir lorsque la maturation se fait sur os, de 10 jours qu'elle est réalisée sous vide, à l'exception du filet (*psoas major*), compte tenu de sa tendreté naturelle. Il en est de même pour la hampe (*diaphragma pars costalis*) et pour l'onglet (*diaphragma pars lumbalis*) à cause du risque de dégradation de leur aspect marchand (AFNOR, 1996). Les viandes se conservant relativement longtemps sous vide (jusqu'à plusieurs mois pour les viandes fraîches importées d'Amérique du Sud ou d'Océanie), la maturation des viandes sous vide peut-être plus longue selon les cas. Ces dernières années, on a vu se développer, à petite échelle, une pratique qui consiste à maturer très longtemps au contact de l'air ambiant certaines viandes bovines (« *dry-aged beef* »), généralement des pièces nobles d'animaux matures, relativement gras et de races viandeuses, dans le but d'atteindre une tendreté optimale et d'accentuer leur flaveur (Berger *et al.*, 2018; Dashdorj *et al.*, 2016 ; Perry, 2012). Ce type de viande est destiné à un public spécifique, tant pour des raisons organoleptiques qu'économiques.

La contribution respective de la dureté de base, de la dureté myofibrillaire et de l'évolution de cette dernière *post mortem* peut varier en fonction de facteurs biologiques (race, sexe, âge, muscle) et technologiques (techniques d'abattage, de traitement et de transformation des carcasses et des viandes). Les viandes riches en fibres musculaires rouges, telles les viandes bovines, sont

[34] La NF V 46-001 définit la maturation comme suit : ensemble de processus biochimiques de transformation du muscle en viande qui, à partir de la mort de l'animal, permet une amélioration progressive et naturelle de la tendreté.

sensibles au phénomène de cryo-choc (« *cold shortening* ») lorsque le refroidissement appliqué aux carcasses est trop rapide, ce qui donne lieu à un durcissement irréversible des viandes que la maturation ne résoudra pas. L'application d'une stimulation électrique des muscles durant le processus d'abattage permet de prévenir ce phénomène en accélérant l'apparition de la rigidité cadavérique, par utilisation rapide des réserves énergétiques musculaires.

La variation de la teneur en tissu conjonctif des muscles d'une même carcasse explique en grande partie leur mode d'utilisation finale : on distingue généralement ceux qui sont destinés à une cuisson rapide (grillés ou rôtis) et ceux qui nécessitent une cuisson lente (braisé, pot au feu) ou un hachage (ou un attendrissage mécanique) respectivement pour solubiliser le collagène ou pour déstructurer le tissu conjonctif.

La tendreté est influencée par des facteurs génétiques. En général, mais pas toujours, les mutations dans le gène de la myostatine chez les bovins résultent en une tendreté accrue, expliquée par une teneur en collagène plus faible et une solubilité plus importante de celui-ci liée à une réticulation moindre de celui-ci. L'effet du gène culard sur la tendreté est donc plus particulièrement marqué dans les muscles moins nobles, habituellement plus riches en collagène (Warner *et al.*, 2010).

Dans une étude réalisée sur des jeunes bovins de 10 races à viande françaises et espagnoles, Panea *et al*. (2018) ont observé des corrélations significatives entre la texture et les caractéristiques du collagène, avec des coefficients de corrélation plus élevés pour le pourcentage de solubilité du collagène que pour la teneur en collagène total, mettant ainsi en évidence l'importance de la solubilité du collagène dans le déterminisme génétique de la texture.

La tendreté de la viande évolue peu dans le jeune âge et a tendance à diminuer lorsque les animaux deviennent adultes. L'effet de l'âge n'est marqué que si les différences d'âge sont importantes. Son effet est donc limité chez les animaux abattus relativement jeunes. Ainsi, entre 12 et 24 mois chez les jeunes bovins mâles et entre 12 et 35 mois chez des jeunes femelles, la tendreté ne semble pas altérée par l'augmentation à l'âge à l'abattage. Chez les animaux plus âgés, l'effet âge sur la tendreté de la viande semble variable selon la race considérée et, lorsqu'il apparaît, il n'est pas forcément expliqué par les caractéristiques du collagène (Oury *et al.*, 2007). Il n'est pas exclu que l'effet de l'âge soit en partie lié à une diminution de la vitesse de la maturation, ce qui justifie une durée de maturation plus longue que pour les jeunes bovins.

L'effet d'une restriction alimentaire suivie d'une croissance compensatrice a fait l'objet de diverses études, partant du principe qu'une accélération du turn-over des protéines, associée au phénomène croissance compensatrice peut conduire à une néo-synthèse de collagène et donc à un collagène 'plus jeune' au moment de l'abattage, ainsi qu'à un accroissement de la proportion de fibres musculaires glycolytiques à maturation plus rapide. Les résultats de ces études ne sont pas constants et il est donc difficile de tirer des conclusions à ce sujet (Oury *et al.*, 2007). De toute façon, même en l'absence de croissance compensatrice, la tendreté n'est généralement pas modifiée par le niveau alimentaire de la ration en période de finition chez les animaux abattus.

Il semble difficile également de conclure quant à un éventuel effet de la nature de la ration (fourrages vs. concentrés) tenant compte de l'interaction de ce facteur avec d'autres facteurs liés au système d'élevage (âge, vitesse de croissance, activité physique). La variabilité élevée de la tendreté entre animaux pour une même conduite d'élevage explique en partie au moins la difficulté de mettre en évidence des différences significatives entre les systèmes d'élevage.

Les conditions de conservation de la viande peuvent impacter sa tendreté. Outre l'effet de la durée de maturation et de la température appliquée au cours de celle-ci, on n'exclut pas un effet limité du mode de conditionnement : une atmosphère riche en oxygène peut induire une oxydation des protéines avec pour effets directs (formation de liaisons entre les protéines myofibrillaires), voire indirects (par diminution de l'activité des protéases impliquées dans le processus de maturation) (Kim *et al.*, 2010 ; Lonergan *et al.*, 2010).

En conclusion, on retiendra que la tendreté présente une grande variabilité et que des interactions se produisent entre de nombreux facteurs génétiques et environnementaux pouvant influencer la maturation et il est difficile de les séparer. De plus, chacun de ces facteurs produit souvent des effets non linéaires.

La **jutosité** de la viande cuite présente deux composants organoleptiques (Lawrie, 1991). Le premier est l'impression d'humidité durant les premières mastications : celle-ci est produite par la libération rapide de fluide par la viande. Le deuxième est la jutosité soutenue liée à l'effet stimulant de la graisse sur la salivation. Il est dès lors possible d'estimer la jutosité de la viande par détermination de sa teneur en graisse et par estimation de sa capacité de rétention d'eau. Pour rappel, la jutosité influence la perception de la texture de la viande par le consommateur.

La **flaveur** de la viande est déterminée par sa composition chimique et les changements apportés à cette dernière lors de la cuisson. Il a été montré que la flaveur typique de la viande, toutes espèces confondues, est liée à des composants hydrosolubles alors que les différences observées entre espèces proviennent de la fraction lipidique (Pearson *et al.*, 1994). La viande crue génère peu de flaveur mais celle-ci s'accentue à la cuisson en fonction de la température et de la méthode de cuisson (Arshad *et al.*, 2018). De nombreux composants aromatiques volatils sont produits lors de la cuisson par dégradation ou oxydation des lipides, dégradation thermique et interactions entre protéines, peptides, acides aminés, sucres et ribonucléotides (réactions de Maillard) (MacLeod, 1994 ; Resconi

et al., 2013). Ainsi par exemple, Maarse et Visscher (1989) ont publié une liste de 880 composés volatils issus de la viande de bœuf cuite. Puisque la flaveur dépend à la fois des précurseurs présents initialement dans la viande et du mode de cuisson, le consommateur joue donc un rôle important dans le déterminisme du profil de flaveur final de la viande cuite (Gardner et Legako, 2018).

Pour plus de détails sur la flaveur, le lecteur pourra consulter les références suivantes : Arshad *et al*. (2018), Dashdorj *et al*. (2015), Dinh *et al*. (2018), Gardner et Legako (2018), Khan *et al*. (2015) et Resconi *et al*. (2013). Pour le "marbling", il est possible de consulter : Pethick *et al*. (2004), Troy *et al*. (2016) et Wood *et al*. (2008).

Les lipides jouent un rôle important dans le développement de la flaveur de la viande. Celle-ci est fortement influencée par la teneur en lipides intramusculaires et par la composition en acides gras de ceux-ci, et donc par tous les facteurs qui influencent celles-ci (voir section relative à la valeur nutritionnelle) et par les modifications que subissent les acides gras durant la conservation, en particulier l'oxydation.

Les composés hydrosolubles précurseurs de la flaveur sont principalement les peptides, les acides aminés, les sucres réducteurs, les nucléotides et la thiamine (Dashdorj *et al.*, 2015 ; Dinh *et al.*, 2018). En générant des acides aminés libres, la protéolyse associée à la maturation peut accentuer la flaveur de la viande, en particulier lorsqu'elle est de longue durée (Khan *et al.*, 2015).

En **conclusion**, les facteurs de variation des qualités organoleptiques de la viande bovine sont très nombreux et touchent toutes les étapes de la chaîne, depuis la production des animaux jusqu'à la préparation finale par le consommateur. Certains d'entre eux jouent un rôle majeur, en particulier la race, l'âge, le type de muscle et le mode de cuisson. En raison de la multiplicité des facteurs et des interactions entre ceux-ci, il est important de développer ou d'appliquer des méthodes qui permettent de prédire la qualité sur base facteurs d'élevage et des facteurs technologiques (Ellies-Oury *et al.*, 2016 ; Hocquette *et al.*, 2014 ; Hocquette *et al.*, 2012 ; Soulat *et al.*, 2018 ; Tedeschi *et al.*, 2004). Il convient de rappeler que la méthode de classement des carcasses de bovins appliquée dans les abattoirs de l'UE ne permet pas forcément de prédire la qualité de la viande issue de ces carcasses, contrairement à la méthode MSA appliquée en Australie. Cette dernière, testée expérimentalement en France, offre des perspectives intéressantes en matière de prédiction de la qualité de la viande (Bonny *et al.*, 2018).

2.5.2.4. Propriété nutritionnelle

La viande de bœuf recouvre un ensemble de morceaux de composition très variable. Certains paramètres sont liés au type métabolique (fer héminique, vitamine B12), d'autres à la composition anatomique du muscle (lipides, zinc). Elle est une bonne source de protéines de haute valeur biologique et très digestibles, de fer, en particulier de fer héminique, très bien assimilé, de zinc et de vitamines B3 et B6. Elle est une source majeure de vitamine B12. Elle apporte une quantité variable de lipides riches en acides gras saturés et mono-insaturés. La majorité des muscles apporte moins de 10% de lipides, un fois le gras visible éliminé pour les morceaux les plus gras (Bauchart *et al.*, 2008). Même si sa composition en acides gras fait souvent l'objet de critiques en raison de la proportion élevée d'acides gras saturés -dont l'acide palmitique (C16:0)- et d'acides gras monoinsaturés qui représentent respectivement de 42 à 52% et de 43 à 48% des acides gras totaux (Gruffat, 2018), elle reste une source importante d'acides gras polyinsaturés des séries n-6 et n-3 (Bauchart *et al.*, 2008).

A titre d'exemple, si l'on se base sur la composition d'une viande bovine de type « faux-filet » crue mentionnée dans la table française de composition des aliments (Ciqual)[35] et sur les apports de référence (AR) à prendre en compte pour la déclaration nutritionnelle qui figure sur l'étiquette des aliments (Union Européenne, 2011), une portion de 100 g de cette viande crue ne contribue qu'à 6% des AR en énergie et à 5% des AR en lipides, tout en permettant de couvrir une part importante des AR en divers nutriments essentiels : 43% pour les protéines -ces protéines étant riches en acides aminés essentiels-, 16% pour le fer, 33% pour le zinc, 19% pour le sélénium, 36% pour la vitamine B3, 34% pour la vitamine B6 et 48% pour la vitamine B12. Une portion de 100 g de cette même viande grillée ne contribue qu'à 9% des AR en énergie et à 12% des AR en lipides, tout en permettant de couvrir une part importante des AR en divers nutriments essentiels : 46% pour les protéines, 14% pour le fer, 33% pour le zinc, 19% pour le sélénium, 37% pour la vitamine B3, 21% pour la vitamine B6 et 20% pour la vitamine B12.

La digestibilité des **protéines** de la viande de ruminant, mesurée à la fin de l'intestin grêle, est très élevée (90 à 95%). La teneur en collagène ne semble pas affecter ce paramètre. On peut ainsi estimer que la quasi-totalité des acides aminés apportés par les protéines de la viande est absorbée (Gruffat *et al.*, 2015). Tenant par ailleurs compte que ces protéines sont très riches en acides aminés essentiels, la viande de bœuf présente un PDCAAS (=*Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score*) de 92%, score adopté par la FAO pour exprimer la valeur d'une protéine en alimentation humaine (Huang *et al.*, 2018b; Schaafsma, 2000).

Chez le bovin, comme chez tous les animaux, le dépôt de protéines dans le muscle est dépendant des apports alimentaires. Lorsque les apports sont inférieurs aux besoins, le dépôt est limité mais la composition des protéines, et donc leur valeur nutritionnelle, n'est pas modifiée. La variation de la teneur en protéines entre muscles, entre animaux, entre modes d'élevage est expliquée par la

[35] https://ciqual.anses.fr/

variation de la teneur graisse intramusculaire : plus la teneur en graisse sera élevée, plus la teneur en protéines sera faible et *vice versa*.

La digestibilité des protéines est peu modifiée par la cuisson. Ainsi, une étude comparant 4 modes de cuisson de steaks de bœuf (bouillis, grillé, frit ou rôti) a montré que la digestibilité réelle des acides aminés au niveau de l'iléon était comprise entre 96,5 et 98,4% vs 97,4% pour la viande crue. Le '*digestible indispensable amino acid score*' (DIAAS) était compris entre 80 et 99 selon les modes de cuisson, ce qui confirme que la viande bovine est une source de protéines de haute qualité (Hodgkinson *et al.*, 2018).

La teneur en **graisse intramusculaire** de la viande détermine ses qualités nutritionnelles, sans compter l'impact important sur ses qualités organoleptiques (Wood *et al.*, 2008). Elle varie fortement entre espèces, entre races et entre muscles au sein de la même race, en fonction du type métabolique. D'autres facteurs liés au système d'élevage interviennent également : le sexe, l'âge et le régime alimentaire. La variabilité de la teneur en matière grasse intramusculaire est liée principalement au nombre et à la taille des adipocytes intramusculaires. Les cellules musculaires et les adipocytes interagissent durant la croissance. L'effet du sexe peut s'expliquer par le niveau de production de testostérone. Ainsi, chez les mâles castrés, la production plus faible de testostérone que celle des mâles entiers est associée à un dépôt de gras plus important (Venkata Reddy *et al.*, 2015). La race est un facteur de variation majeur : la teneur en graisse intramusculaire est faible chez les animaux qui présentent un développement musculaire important avec une activité glycolytique élevée (Hocquette *et al.*, 2010). Les facteurs nutritionnels jouent également un rôle dans la modulation de la lipogenèse, en particulier la source de lipides, la concentration en amidon, le taux d'incorporation de concentré et de fourrages et les vitamines (Ladeira *et al.*, 2016 ; Manni *et al.*, 2018).

La **composition en acides gras** de la viande bovine est influencée par le génotype. A titre d'exemple, la teneur en matière grasse intramusculaire plus faible observée chez les animaux culards est associée à une proportion d'acides gras polyinsaturés plus importante, ce qui peut être expliqué par une proportion plus importante de lipides membranaires (polaires, riches en acides gras polyinsaturés) et une proportion plus faibles de lipides de réserve (non polaires, riches en acides gras mono-insaturés) (Clinquart *et al.*, 1998 ; De Smet *et al.*, 2004). Plus récemment, la variabilité de la composition acides gras de la viande bovine a pu être mise en relation avec le polymorphisme génétique et des gènes candidats ont été identifiés, tels les gènes ACACA, FASN, SCD, FABPs, and SREBP-1 (Maharani *et al.*, 2011 ; Mannen, 2011 ; 2012).

Le régime alimentaire est un autre facteur qui détermine la composition en acides gras. De manière générale, on rapporte que les bovins finis au pâturage présentent un ratio acides gras polyinsaturés / acides gras saturés et un ratio n-6 / n-3 plus favorable sur le plan nutritionnel (Venkata Reddy *et al.*, 2015). Une interaction entre le régime et le sexe a également été rapportée (Venkata Reddy *et al.*, 2015).

Même si la bio-hydrogénation des acides gras dans le rumen limite l'impact de l'incorporation de lipides riches en acides gras polyinsaturés, il est possible d'augmenter la teneur en acides polyinsaturés dans la viande bovine en utilisant des sources végétales, notamment la graine ou l'huile de lin, très riche en acide linolénique (Clinquart *et al.*, 1991 ; Oliveira *et al.*, 2018; Scollan *et al.*, 2014). L'incorporation dans le régime alimentaire doit cependant être limitée à 2 % pour éviter un impact défavorable sur la texture de la graisse et sur sa sensibilité à l'oxydation (Zinn et Jorquera, 2007). Il est par ailleurs possible de moduler la bio-hydrogénation des acides gras dans le rumen, notamment par l'incorporation de tannins dans le régime (Morales et Ungerfeld, 2015).

La viande bovine est une source d'acides linoléiques conjugués (« *Conjugated Linoleic Acids* » ou CLA), acides gras produits dans le rumen et potentiellement bénéfiques pour la santé de l'homme (Gruffat, 2018; Mir *et al.*, 2003). La production de ces acides gras peut être modulée par le régime alimentaire (He *et al.*, 2009 ; Scollan *et al.*, 2014).

2.5.2.5. Propriété technologique

On considère généralement que les qualités technologiques de la viande caractérisent l'aptitude de celle-ci à la conservation et à la transformation (Monin, 1991). Le degré de transformation de la viande bovine étant plus faible que celui du porc –dont de nombreux morceaux sont valorisés en charcuterie- l'aptitude à la transformation est un critère de moindre importance pour la viande bovine mais, par contre, le pouvoir de rétention d'eau et l'aptitude à la conservation par réfrigération sont essentiels.

Même s'il ne s'agit pas en soi d'une qualité technologique, le **pH** joue un rôle très important dans la maîtrise de la qualité technologique, sachant qu'il détermine grandement l'aptitude à la conservation et la transformation, ainsi que le pouvoir de rétention d'eau, sans compter son impact majeur sur les qualités organoleptiques, en particulier la couleur et la tendreté. Le pH diminue après la mort de l'animal et cette diminution joue un rôle important dans ce que l'on considère comme la « transformation du muscle en viande ». La valeur observée *in vivo* est de l'ordre de 7,0. La glycolyse qui se produit *post mortem* est associée à une diminution de cette valeur jusqu'à 5,5 environ si les réserves de glycogène musculaire de l'animal étaient normales au moment de la mort. La valeur finale peut varier très légèrement (de l'ordre du dixième d'unité pH) d'un muscle à l'autre en fonction de son potentiel glycolytique, voire en fonction du mode d'élevage. La concentration en glycogène varie selon le type de fibres musculaires. Les muscles où les fibres de type I (= oxydatif) prédominent présentent une concentration en glycogène plus faible que les muscles où les fibres de type II (= glycolytique) prédominent ; ils présentent donc un pH final légèrement plus élevé (Ferguson et Gerrard,

2014). Ceci pourrait également expliquer des différences entre races et génotypes. Il pourrait également expliquer, à tout le moins partiellement, l'effet du mode d'élevage. En effet, un mode de production extensif est associé à une proportion de fibres de type I plus élevée, et à des proportions de fibres IIa et IIb plus faibles que celles qui sont observées avec un mode de production intensif et cette différente pourrait être reliée à l'exercice physique associé au pâturage (Ferguson et Gerrard, 2014). Le caractère plus oxydatif du métabolisme musculaire de ces animaux n'est cependant pas relié à une abondance plus importante de mitochondries (Wicks *et al.*, 2019). Tenant compte de la concentration en glycogène plus faible des fibres de type I, cela pourrait expliquer le pH final plus élevé observé dans la viande de bovins élevés au pâturage lorsqu'on les compare au bovins nourris avec des concentrés.

Lorsque les réserves de glycogène sont insuffisantes au moment de l'abattage, par exemple suite à un jeûne et/ou un transport très long, l'ampleur de la diminution du pH est moindre, donnant lieu à une viande dont les caractéristiques sont modifiées : elle apparaît sombre, elle est de consistance ferme, et d'aspect sec en surface. Cette anomalie qui peut toucher toutes les espèces est identifiée par les qualificatifs « *dark*, *firm*, *dry* » en anglais (DFD en abrégé). L'aspect sombre est particulièrement spectaculaire chez le bovin dont la viande est plus rouge que celle des autres espèces (porc ou volaille), au point que, dans la filière bovine, on utilise souvent une dénomination spécifique : « *dark cutting beef* » en anglais, ou « viande à coupe sombre » en français. Il est à noter que cette anomalie n'est pas visible en surface de la carcasse et que ce n'est que lors de la découpe de la carcasse qu'elle apparaît. Par ailleurs, le pH plus élevé de cette viande diminue son aptitude à la conservation par réfrigération car celui-ci est plus favorable à la croissance microbienne, ce qui peut entraîner une altération plus rapide de la viande (Newton et Gill, 1981). Ceci justifie la présence très fréquente d'un critère relatif au pH final dans les spécifications ou les cahiers des charges applicables à la filière bovine. La diminution de pH étant plus lente dans l'espèce bovine en raison d'un métabolisme musculaire plus « lent », la mesure du pH final est généralement réalisée entre 24 et 48 heures *post mortem*. Elle permet de détecter les carcasses DFD avant même l'étape de découpe. Selon les cas, la valeur maximale tolérée peut varier de 5,8 à 6,0 (Ponnampalam *et al.*, 2017). Pour rappel, le pH final des bovins élevés au pâturage peut être plus élevé que celui des bovins nourris aux concentrés, ce qui pourrait donner lieu à la détection de « faux » DFD si un seuil très bas est utilisé (Wicks *et al.*, 2019).

Le sexe de l'animal peut jouer sur la fréquence des viandes à pH élevé. Ainsi, Monin (1991) rapporte chez le taurillon une fréquence plus élevée de carcasses présentant un pH supérieur à 6 dans plusieurs muscles, que chez la vache, la génisse ou le bœuf, en raison de son tempérament plus excitable qui entraîne une glycogénolyse accrue dans la période précédant immédiatement l'abattage.

Outre la valeur finale du pH, une diminution trop rapide *post mortem* peut elle aussi impacter la qualité de la viande. Le bovin est moins sensible que le porc à ce type de défaut mais il peut survenir quand le pH musculaire atteint une valeur inférieure à 6 alors que la température corporelle est encore élevée (35-40 °C), entraînant une dénaturation de protéines myofibrillaires et sarcoplasmiques, avec pour conséquence une altération de la couleur, de la capacité de rétention d'eau et de la tendreté. Le potentiel de maturation et la stabilité de la couleur de ces viandes sont moindres, en raison respectivement d'une diminution de l'activité des enzymes protéolytiques et d'une diminution de la stabilité redox de la myoglobine. Ces défauts touchent plus particulièrement les muscles localisés en profondeur de la carcasse où le refroidissement est plus lent (Jacob et Hopkins, 2014; Kim *et al.*, 2014).

La vitesse de diminution du pH *post mortem* peut elle aussi être influencée par le type de fibres musculaires, ce qui peut expliquer des vitesses différentes selon les muscles, ou les races. Il n'explique apparemment pas la vitesse d'évolution plus rapide observée avec le génotype culard puisque la proportion plus élevée de fibres IIb et la proportion plus faible de fibres IIa qui caractérise ce génotype devraient être associées à une évolution plus lente, alors que c'est l'inverse qui est observé. Ce paradoxe pourrait s'expliquer par la masse musculaire importante des culards qui compense cet effet en retardant fortement la diminution de température (Ferguson et Gerrard, 2014).

Toutes les conditions qui provoquent une accélération du métabolisme durant la période qui précède immédiatement la mort de l'animal, en particulier des conditions stressantes ou un étourdissement mal maîtrisé, accélèrent l'évolution du pH *post mortem* avec toutes les conséquences décrites ci-dessus (Ferguson et Gerrard, 2014).

Un refroidissement rapide de la carcasse permet de limiter la vitesse d'évolution du pH et la température des muscles limitant ainsi la dénaturation des protéines. Chez les bovins, il peut cependant donner lieu à l'apparition d'un autre défaut qui résulte d'une contraction des muscles en réaction au froid avant l'apparition de la rigidité cadavérique. On parle alors de « *cold shortening* » (en anglais) ou de cryo-choc (en français). Cette contraction irréversible donne lieu à une viande plus dure. L'apparition de ce défaut chez le bovin, tout comme chez le mouton, est liée à la proportion plus élevée de fibres de type I (fibres rouges à métabolisme oxydatif) sensibles à ce phénomène. La stimulation électrique des carcasses sur la chaîne d'abattage permet d'atteindre plus rapidement la rigidité cadavérique et, ainsi, d'éviter ce phénomène sans devoir réduire la vitesse de refroidissement. Elle produit cependant une accélération de la diminution du pH et d'autres effets plus ou moins controversés sur la couleur, la tendreté et la maturation de la viande (Jacob et Hopkins, 2014).

La **capacité de rétention d'eau** de la viande fraîche, fortement liée au pH, a une influence importante sur la perception de la qualité : une viande dont les pertes d'eau sont importantes est perçue par le consommateur comme de moindre qualité (Cheng et Sun, 2008).

Au-delà de l'aspect visuel, elle a par ailleurs un impact important sur d'autres caractéristiques, en particulier la jutosité et la tendreté. Chez les bovins, la capacité de rétention d'eau peut être influencée par le génotype et par l'alimentation. Dans plusieurs études, le génotype culard a été associé à des pertes de jus plus importantes, à l'état cru (De Smet *et al.*, 2000 ; Olivan *et al.*, 2004), voire lors de la cuisson (Uytterhaegen *et al.*, 1994). Cet effet peut être relié à une teneur en graisse et en tissu conjonctif plus faible, ainsi qu'au métabolisme musculaire plus glycolytique des animaux culards. Parmi les facteurs alimentaires, il a été démontré qu'une supplémentation en vitamine E peut améliorer la capacité de rétention d'eau de la viande bovine. Cet effet varie selon les muscles et peut être relié à la stabilité des membranes cellulaires, voire mitochondriales (den Hertog Meischke *et al.*, 1997 ; Mitsumoto *et al.*, 1998). Les conditions observées durant la période qui précède immédiatement l'abattage, durant l'abattage proprement dit et durant le refroidissement de la carcasse peuvent influencer la capacité de rétention d'eau, principalement par leur effet sur le pH et/ou un raccourcissement de la structure musculaire. La diminution de la capacité de rétention d'eau observée *post mortem* est expliquée par la diminution du pH. Une fois le pH ultime atteint, la capacité de rétention d'eau se stabilise, ce qui explique que les pertes de jus par la viande fraîche s'observent principalement durant les premiers jours *post mortem,* pour diminuer ensuite. Une augmentation de la capacité de rétention d'eau lors de la maturation longue de la viande a été rapportée. Celle-ci pourrait être expliquée par la dégradation du cytosquelette lors de la maturation, ce qui compenserait le raccourcissement antérieur de celui-ci (Kristensen et Purslow, 2001).

La viande bovine devant être soumise à maturation avant consommation, son **aptitude à la conservation sous réfrigération** est essentielle. La maturation de la viande bovine peut être effectuée sous vide et, dès lors, la découpe des carcasses est souvent réalisée avant maturation complète et la maturation se poursuit sous forme de pièces issues de la découpe (« prêtes à trancher » (P.A.T.) conditionnées sous vide. Une fois sous vide, celles-ci se conservent durant plusieurs semaines voire, dans les cas extrêmes, plusieurs mois pourvu qu'une température proche du point de congélation de la viande (–1 à –1,5°°C) soit appliquée. La viande bovine présente ainsi la particularité de pouvoir être distribuée à l'échelle mondiale sans recours à la surgélation. Pour rappel (voir section relative à la couleur), la couleur de la viande bovine conditionnée sous vide, rouge pourpre, est peu appréciée par le consommateur. Ceci explique qu'au niveau industriel, après portionnage, la viande est reconditionnée sous air atmosphérique (= sous film étirable) ou sous atmosphère riche en oxygène pour donner à la viande une couleur attractive. L'aptitude à la conservation de la viande dans ces modes de conditionnement dépend très fortement de sa stabilité oxydative. Dès lors tous les facteurs qui influencent cette stabilité jouent un rôle essentiel lors de la conservation de la viande, en particulier la capacité antioxydante de la viande. Le rôle de la vitamine E et des antioxydants présents dans le régime alimentaire des bovins est essentiel. Il convient de rappeler que la viande fraîche ne peut avoir subi aucun autre traitement que le froid et la modification de l'atmosphère. Il est dès lors interdit d'ajouter des antioxydants *post mortem* et on comprend dès lors l'intérêt de leur apport dans l'alimentation des animaux. La maîtrise de la température est elle aussi essentielle puisque les phénomènes oxydatifs sont dépendants de la température. Par ailleurs, il va sans dire que la maîtrise des pratiques d'hygiène et de la qualité microbiologique des viandes est essentielle pour leur bonne conservation. Les conditions appliquées (air atmosphérique, vide, atmosphère modifiée) influencent elles aussi l'évolution de la flore microbienne au cours de la conservation. Ainsi, à titre d'exemple, le conditionnement sous vide favorise la croissance de bactéries lactiques qui peuvent contribuer à la conservation de la viande par compétition avec des bactéries altérantes ou pathogènes.

2.5.2.6. Propriété d'usage

En raison de la très grande variabilité des qualités organoleptiques des viandes bovines, le **mode de préparation** doit être adapté à leurs caractéristiques, en particulier pour ce qui concerne la **cuisson**. Celle-ci sera plus ou moins importante en fonction de la teneur en collagène et du degré de réticulation de celui-ci. Ceci justifie amplement le recours à une dénomination relative à la destination culinaire du morceau (« à rôtir, à griller, à braiser, à bouillir, à bifteck, à pot au feu, à bourguignon, à fondue, à carpaccio ») (pour plus d'information, voir section relative à la qualité commerciale de la viande bovine).

Tenant compte que le consommateur ne maîtrise pas forcément les différents modes de cuisson et/ou qu'il n'est pas forcément prêt à y consacrer le temps nécessaire, des industriels ont développé des produits précuits ou préparés. Certains de ces produits sont soumis à une **cuisson longue à basse température** pour optimaliser leur tendreté et leur jutosité (Dominguez-Hernandez *et al.*, 2018; Mortensen *et al.*, 2012). Ce type de cuisson, le plus souvent appliqué sous vide, est réalisé à une température beaucoup plus faible que la cuisson traditionnelle et durant un temps beaucoup plus long. Il demande une maîtrise stricte du couple temps – température et du microbiologique lié à ces viandes. La contamination des viandes bovines en profondeur est en principe relativement limitée ; elle est par contre potentiellement plus importante en surface. Les températures appliquées en profondeur sont le plus souvent à la limite entre la température qui favorise la croissance des bactéries et la température qui permet leur destruction. Tout écart peut représenter un risque. Ces viandes peuvent être soumises à une température élevée en surface, par exemple par un braisage de courte durée, pour détruire les flores microbiennes en surface avant d'être soumises à la cuisson basse température.

2.5.2.7. Propriétés d'image (éthique, environnement, perception du consommateur)

Comme pour les autres espèces, la controverse sur la consommation de viande bovine apparaît dominée par des questions liées à la production, plus qu'à la consommation elle-même (Legendre *et al.*, 2017). Par comparaison avec celle des monogastriques, la production de viande bovine fait moins débat sur le plan de la compétition alimentaire avec l'homme mais plus sur le plan environnemental, plus particulièrement pour ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre.

En termes de bien-être animal, le mode d'élevage appliqué aux bovins, lié plus étroitement au sol et souvent plus extensif que celui des monogastriques, constitue un atout pour la filière et celui-ci peut être renforcé par certains signes de qualité officiels, axés sur les bovins à viande allaitants et le pâturage. A l'inverse, l'abattage fait plus souvent polémique, en particulier l'abattage rituel sans étourdissement préalable, autorisé en France.

2.5.3. Produits transformés : le steak haché

Pour la viande bovine, il a été décidé de traiter un produit dont la consommation ne cesse de progresser, le steak haché.

A notre connaissance, les steaks hachés constituent un support significativement moins utilisé en recherche que la viande fraîche. Les travaux traitant des propriétés sensorielles sont relativement anciens, les publications les plus récentes étant principalement concentrées sur la qualité microbiologique et sanitaire de ces produits. Les principaux chiffres relatifs au marché et à la consommation sont quant à eux majoritairement produits par des enquêtes consommateurs sollicitées par le Syndicat National de l'Industrie des viandes. Ils permettent d'établir que le steak haché est la clef de voûte de l'économie de la filière bovine avec 30% de l'utilisation des carcasses.

2.5.3.1. Contexte du marché

Commercialisé depuis les années 1970, le steak haché est un produit ancré dans le quotidien des français avec plus de 42 steaks hachés consommés par personne et par an. C'est notamment par la restauration hors foyer et les fast-foods que cet aliment s'est imposé dans le quotidien des consommateurs. Ce produit a réglé, pour partie, le problème du déséquilibre avant-arrière des carcasses en permettant de trouver un débouché aux muscles des quartiers avant difficiles à valoriser, mais également aux carcasses peu conformées (P ou O), difficiles à valoriser au niveau des intermédiaires de distribution et notamment en boucheries traditionnelles.

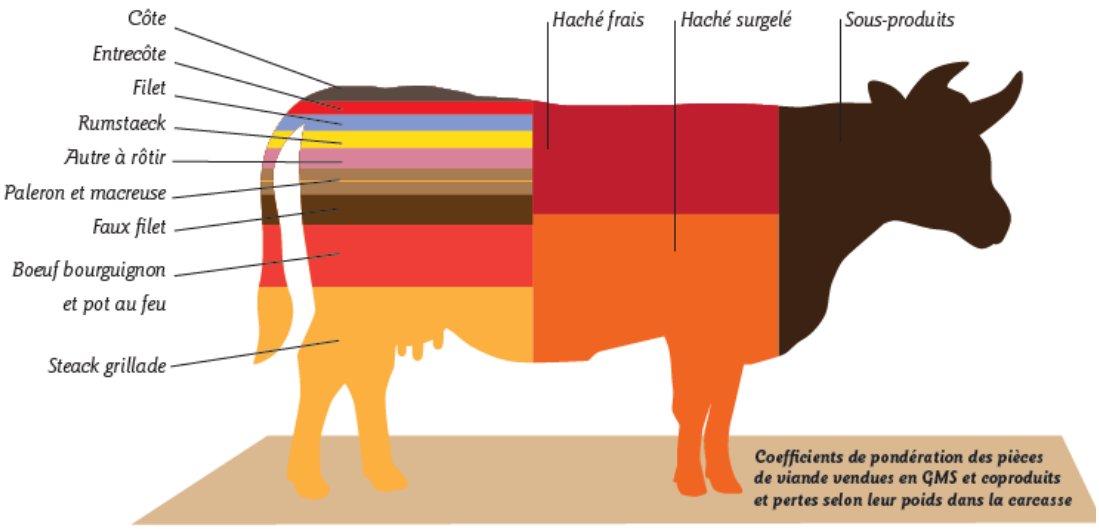
En 2010, selon le Syndicat National de l'Industrie des viandes, les viandes hachées réfrigérées et surgelées représentaient respectivement 84 950 et 133 450 tonnes. Au total 715 000 tonnes de carcasses sont valorisées en produits élaborés, contre 460 000 tonnes en viandes semi-élaborées (découpes et muscles) et 326 000 en viandes avec os. Le steak haché joue ainsi le rôle d'une véritable clé de voûte de l'économie de toute la filière bovine. Il représente 30% en moyenne de l'utilisation des carcasses bovines, c'est sur lui que repose l'équilibre de la valorisation des différents morceaux de l'animal (Cassignol (2012) ; figure 2.5.1)).

Le steak haché est constitué obligatoirement de 100% de viande de bœuf. On parle généralement de « 100% muscle ». Il se présente en général sous forme d'une portion de 100 à 125 g moulée selon une forme ovale et est commercialisé frais ou surgelé. Contrairement au steak haché, les « préparations de viande hachée » peuvent contenir jusqu'à 30% de protéines végétales en poids.

En lien avec les attentes des consommateurs, la filière a diversifié la gamme en proposant dans les années 2000 des steaks hachés « nouvelle génération » tels que le steak haché bio, halal ou casher, le steak haché de bovins allaitants (de races limousine ou charolaise), le steak haché pré-cuit, « tartare » ou encore « tartare au couteau » par exemple qui correspondent à des grains de hachage différents (Cassignol, 2011 ; Sans, 2003).

Produit populaire par excellence, le steak haché bénéficie d'une image positive auprès de plus de 80 % des français, pour son aspect pratique, ses caractéristiques nutritionnelles et ses bons rapports « qualité-prix » et « qualité-temps ». Le bœuf haché est également le produit de bœuf le plus consommé par les consommateurs américains. On estime que de 40% à 45% du bœuf est consommé sous forme de bœuf haché, et lorsque le bœuf est préparé pour les repas pris à la maison, le bœuf haché est utilisé 60% du temps. En effet, pour les consommateurs Américains, il s'agit d'un choix de protéines relativement peu coûteux (www.beef.org).

Figure 2.5.1. Représentation de la part de chaque muscle ou préparation dans la construction du prix de la viande au sein d'une carcasse de bovin. Données chiffrées : observatoire des prix et des marges ; Source : (Cassignol (2012) *(Le positionnement des différents morceaux sur ce schéma n'est pas relié à la localisation anatomique des muscles mais seulement à leur part relative dans le prix de la viande)*



Préféré par 59% des enfants devant le jambon (31%) et l'escalope de dinde (8%), il concourt à l'initiation des jeunes enfants au plaisir de la viande dans l'esprit de nombre de Français. Conditionné pour s'adapter à tous les foyers (mono ou bi-pack en frais, boîte de 4 ou de 10 en surgelé…), il est consommé hebdomadairement par 40% des ménages français. La majorité de la consommation des steaks hachés se fait à domicile (79%), mais il faut noter que la part de steaks consommée dans des fast-food (12%) est non négligeable. Ainsi, une étude proposée par le cabinet Gira conseil, spécialisé dans l'analyse de la consommation alimentaire hors domicile a permis d'établir que si en 2000, sur 9 sandwichs vendus en France, 1 était un burger, en 2013, les burgers représentaient la moitié des achats de sandwichs. Selon ce cabinet, 970 millions de hamburgers ont été vendus en France en 2018, dont 655 millions par les restaurants fast-foods, 247 millions par les restaurants classiques proposant des hamburgers à leur carte, 47 millions par la restauration d'entreprise et 21 million par la restauration d'hôtels. Toujours selon ce cabinet conseil, 75% des restaurants traditionnels proposeraient actuellement des burgers à leur carte et pour un tiers des restaurateurs qui proposent le burger, celui-ci serait devenu le leader de la gamme de plat, devant l'entrecôte, les grillades ou les poissons.

Toutes les catégories de consommateurs peuvent trouver un point d'accroche dans le steak haché. Outre le fait qu'avec sa texture tendre et aérée, il constitue un moyen facile et pratique de s'alimenter (Cassignol, 2011). C'est en effet un aliment simple et rapide à préparer, peu coûteux et qui permet le contrôle précis de son apport en matières grasses (en raison de sa faible teneur en matières grasses). Son rapport coût / apport en protéines est bon. Le steak haché constitue également un bon moyen de faire consommer de la viande aux enfants, avec un produit ludique, et de bonne valeur nutritionnelle. Il faut cependant noter que si le steak haché est facile à mastiquer, il forme un bol alimentaire peu cohésif rendant difficile la déglutition ultérieure.

Ces nombreux points forts permettent au steak haché de voir sa consommation en constante augmentation, contrairement aux muscles entiers, notamment les pièces à bouillir (tableau 2.5.4. ; FranceAgriMer (2019a)).

Tableau 2.5.4. Consommation de viande bovine fraîche (hors abats) en base 100 (2010) selon les achats déclarés par les ménages

Quantités - Indice base 100 en 2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Bœuf (hors viande hachée)	96,3	94,3	90,6	88,0	88,3	86,0	83,7
Dont bœuf à rôtir	98,2	94,7	92,1	90,4	89,7	88,9	85,9
Dont bœuf à bouillir	91,1	92,6	87,8	82,5	83,6	78,2	76,6
Viande hachée fraîche de bœuf	99,0	100,0	102,0	106,0	110,6	113,8	114,1

2.5.3.2.Définition et procédé de fabrication

Les steaks hachés proviennent de viandes désossées qui ont été soumises à une opération de hachage en fragments ou à un passage au hachoir à vis sans fin et contenant moins de 1% de sel (spécification technique B1-12-03 et règlement CE n°853/2004 (Commission européenne, 2004) – Annexe I, point 1.13).

Les steaks hachés « pur bœuf » (à 5%, 15% ou 20% de matière grasse) comportent obligatoirement entre 99 et 100% de muscle bovin, dans la mesure où un maximum de 1% de sel peut être ajouté à cette préparation (mais aucune eau). On distingue ainsi le steak haché 100% bœuf, des préparations de viande hachée qui contiennent notamment des protéines végétales (30% du poids du produit au maximum). Ces préparations peuvent être proposées dans un conditionnement identique au steak haché, mais elles ne peuvent prétendre à l'appellation steak haché qui exige une composition 100% bœuf.

Seuls les muscles (muscles squelettiques avec leurs tissus graisseux et conjonctifs naturellement inclus ou adhérents) et affranchis (chutes de découpe de muscles entiers, règlement CE n°853/2004 (2004) sont autorisés dans la préparation des steaks hachés. Sont en revanche interdits les chutes de découpe ou de parage (autres que des chutes de muscles entiers, les viandes séparées mécaniquement, les viandes contenant des fragments d'os ou de peau, ainsi que les viandes de la tête, à l'exclusion des masséters, partie non musculaire de la linea alba, région du carpe et du tarse, chutes de viande raclée sur les os et les muscles du diaphragme (sauf après enlèvement des séreuses) (Règlement CE n°853/2004 – annexe III, section V, chapitre II).

Le minerai de base d'un steak haché est ainsi constitué de différents muscles striés. Pour une efficacité économique maximale, il est important de trouver un bon équilibre entre les différents morceaux entrant dans sa préparation. Le procédé de fabrication des steaks hachés passe par quatre étapes principales :

- la préparation des viandes, qui nécessite un mélange de viandes maigres et grasses. En général, ce sont principalement les morceaux de l'avant, les pièces à pot au feu ou les pièces à braiser qui sont utilisés. Toutefois, en raison d'un déséquilibre matière, les transformateurs peuvent également être amenés à faire des steaks hachés à partir de morceaux nobles, ce qui conduit à une dévalorisation de la viande de 1ère catégorie.
- un premier hachage, grossier, de la viande
- un second hachage après mélange de la première mêlée
- le moulage et le conditionnement en steaks de tailles variables 85 g, 100 g, 110 g ou 125 g. La présentation des steaks se veut uniforme, avec un moulage ovale (grande consommation) ou rond (lorsqu'ils sont destinés aux fast-foods).

L'objectif dans la combinaison des deux hachages successifs est de permettre une maîtrise parfaite des teneurs en matières grasses des produits finaux. Le hachage peut être classique (moyenne ou haute pression) ou bien basse pression, le produit basse-pression étant plus aéré et plus fondant.

2.5.3.3. Composition et propriétés nutritionnelles

En comparaison à d'autres produits carnés, le steak haché se révèle être une bonne source de protéines, de vitamines, de fer héminique et de zinc pour un faible apport en calories (tableau 2.5.5.). En comparaison d'autres produits animaux (comme du jambon cuit ou un œuf au plat), le steak haché contient peu de glucides (0 g *vs.* 1,72 g et 0,83 g respectivement) et peu de cholestérol (77 mg *vs.* 33,5 mg et 457 mg respectivement) (FranceAgriMer, 2019a). Sa teneur en matières grasses et son rapport collagène / protéines doivent correspondre au règlement UE n°1169/2011 (2011) (information au consommateur, Annexe V, Partie B, Point 1) (tableau 2.5.6.).

Tableau 2.5.5. Caractéristiques nutritionnelles moyennes d'un steak haché cuit contenant 10% de matières grasses (Cassignol, 2011)

	Steak haché cuit de 100 g contenant 10% de matières grasses	Tranche de jambon cuit	Œuf sur le plat cuit et salé
Energie (kcal)	212	105	186
Protéines (g)	24,2	17,1	12,0
Vitamines	B1, B2, B3 (PP), B5, B6 et B12	B12, B6, B1	A, D, E, B5, B9, B12
Glucides (g)	0	1,72	0,83
Fer total (mg)	2,7	0,76	1,99
Zinc (mg)	4,5 (valeur crue)	1,38	0,867
Cholestérol (mg)	77	33,5	457

Tableau 2.5.6. Composition d'un steak haché de bœuf selon le règlement UE n°1169/2011 (Union Européenne, 2011) (information au consommateur, Annexe V, Partie B, Point 1)

	Taux en matière grasse	Rapport collagène / protéines
Steak haché maigre	≤ 7%*	≤ 12%
Steak haché pur bœuf	≤ 20%**	≤ 15%

* le produit représentatif du marché comporte généralement 5% de matière grasse
** le produit représentatif du marché comporte généralement 10, 15 ou 20% de matière grasse

2.5.3.4. Propriétés organoleptiques : importance du taux de matières grasses et rôle de la formulation

Les steaks hachés « pur bœuf » contiennent majoritairement 5% à 15% de matières grasses. Par rapport aux morceaux de viande entiers, le steak haché présente une caractéristique unique : celle d'un taux de matière grasse homogène, choisi, connu et contrôlé sur l'ensemble de la production.

L'intensité de flaveur, la jutosité et la tendreté étant dépendants de la teneur en matières grasses de la viande, la réduction des teneurs en matières grasses est susceptible d'avoir une répercussion négative sur la qualité organoleptique du morceau. Ainsi, la réduction de la teneur en matières grasses à 10% donne souvent un produit cuit fade et sec, à la texture dure et caoutchouteuse (Egbert *et al.*, 1991 ; Keeton, 1994 ; Troutt *et al.*, 1992; Youssef et Barbut, 2011). De même , Troutt *et al*. (1992) reportent que les steaks hachés contenant 5 à 10% de matières grasses sont plus fermes, moins friables, moins juteux et moins savoureux que les steaks contenant 20 à 30% de matières grasses.

Lorsque sont comparés des steaks hachés à teneurs en matières grasses supérieures (15 à 30%), il ressort que les steaks contenant 15 de matières grasses ont la meilleure flaveur, tandis que les steaks à 20% ont la meilleure texture et la meilleure note d'appréciation globale, les steaks à 30 % de matière grasse étant quant-à-eux plus juteux (Carpenter et King, 1969).

Les autorités publiques recommandent de consommer les steaks hachés cuit « à cœur » (ni rouge ni rosé). La cuisson à cœur correspond à une température supérieure à 65°C qui est suffisante mais nécessaire pour détruire la plupart des bactéries et notamment *E. coli*. Depuis le 1er janvier 2006, la température de cuisson doit obligatoirement être mentionnée sur les emballages des steaks hachés. Toutefois, il est à noter que, la température de cuisson influe significativement sur les qualités organoleptiques des viandes : la cuisson à 55°C (en comparaison d'une cuisson à 74°C) favorise la tendreté et la jutosité (Gagaoua *et al.*, 2016).

On peut en outre noter que l'augmentation des teneurs en matières grasses de 11 à 18 et 22% conduit à une augmentation de différents composés volatiles (2-butanone, 2-pentanone, 3-hydroxy-2-butanone) dans la viande (El-Magoli *et al.*, 1995). La formation de ces composés est de nature à augmenter significativement l'intensité de la flaveur viande et de la flaveur de viande cuite de ces échantillons.

La réduction de la teneur en matières grasses dans un steak haché a globalement une répercussion défavorable sur l'acceptabilité du morceau. Toutefois, les steaks à faible teneur en matières grasses conservent pendant le stockage (24 semaines au congélateur) une meilleure couleur et une meilleure stabilité à l'oxydation que les steaks plus gras (20% de matières grasses) (Bullock *et al.*, 1994).

En raison des attributs de qualité organoleptique apportés par la matière grasse, il est difficile de formuler un produit de bœuf haché maigre avec une qualité de goût et de texture égale à celui d'un produit équivalent riche en matière grasse. La graisse enlevée doit être remplacée par des ingrédients capables de contribuer aux attributs de qualité apportés par la graisse. En partant de produits à faible teneur en matières grasses, il est possible de restaurer les propriétés organoleptiques (similaires à celles des produits à haute teneur en matières grasses) en utilisant différents substituts de graisses tels que des protéines autres que de la viande (lait, œufs, végétaux), des carbohydrates, des hydrocolloïdes ou de l'amidon (Varga-Visi et Toxanbayeva, 2017). Le produit commercialisé n'est alors plus un steak haché mais une « préparation de viande hachée ». Ce procédé présente l'avantage, pour les opérateurs, de proposer un produit à base de viande dont le coût de revient est significativement plus faible que celui du steak haché 100% muscle.

Les premières formulations de préparation de viande hachée à faible teneur en matières grasses reposaient sur l'utilisation de carraghenanes, de fibres / de son d'avoine ou encore d'isolas de soja (Taki, 1991). L'ajout d'eau et de phosphates a également été testé, conduisant à améliorer les notes de texture et de flaveur des préparations à 10% de matières grasses, jusqu'à un niveau équivalent à celui des steaks à 25 % de matières grasses (Miller *et al.*, 1993).

Des combinaisons d'amidon, de lipides et de protéines peuvent être utilisées comme substituts de graisse efficaces dans les préparations de viande hachée faibles en matières grasses (Warner *et al.*, 2001). Des substituts de graisse (tapioca, maltodextrines) susceptibles de retarder la libération de certains composés aromatiques volatils, ou d'améliorer leur libération (tels que les fibres d'avoine) sont également usités. Ils induisent généralement une amélioration de la flaveur de la viande (Chevance *et al.*, 2000). En parallèle, divers auteurs ont mis en évidence que le remplacement d'une partie de la viande par du son ou des fibres d'avoine était de nature à améliorer la tendreté, la jutosité et les rendements de cuisson des steaks hachés (Berry, 1997 ; Resurreccion, 2004).

2.5.3.5. Couleur et oxydation des lipides

La couleur, l'oxydation des lipides et la microbiologie sont des indicateurs importants de la qualité de la viande hachée.

L'emballage des morceaux doit donc permettre une stabilisation à la fois de la couleur et de l'oxydation, tout en limitant le développement microbien. Dans cette optique, le mélange de 20-30% CO_2 et 70-80% O_2 est fréquemment employé afin d'assurer l'oxygénation de la myoglobine et ainsi une couleur rouge vif conforme aux attentes des consommateurs. Cependant, la présence

d'oxygène conduit à une augmentation du taux d'oxydation des lipides, dont les conséquences peuvent être ressenties à la fois sur la couleur et la flaveur de la viande hachée (O'Grady *et al.*, 2000 ; Zhao *et al.*, 1994).

L'augmentation de la part de CO_2 (à raison de 50 à 70% du mélange) a tendance à inhiber le développement des microorganismes, mais à entraîner une diminution de la stabilité à l'oxydation par rapport à une concentration de 30% de CO_2. En parallèle, elle conduit à la diminution des indices a* et b* de la viande et à une réduction de l'indice de rouge (sans modification de la luminosité) en lien avec une formation accrue de metmyoglobine (Esmer *et al.*, 2011). Ainsi, le CO_2, utilisé pour limiter ou retarder la croissance des microorganismes altérants, se solubilise dans l'eau de la viande. En excès, il peut donner lieu à des effets collatéraux sur le plan organoleptique tels qu'une décoloration ou une flaveur « acide ».

L'oxydation des lipides constitue un point de contrôle particulièrement important en viande hachée, le broyage des structures cellulaires exposant les composants lipidiques à l'oxygène (Sato et Hegarty, 1971). En effet, la viande broyée est davantage sensible à l'oxydation, parce qu'elle dispose d'une surface de contact augmentée avec l'O_2. De plus, elle est davantage sensible à l'altération microbienne en lien avec le process (Esmer *et al.*, 2011).

Certains additifs à effet antioxydant (et/ou antimicrobien) peuvent être utilisés dans les préparations de viande (*cf.* la définition dans le Règlement (CE) N°853/2004 (2004)) à base de viande hachée. Ainsi, pour améliorer la stabilité de la couleur et diminuer l'oxydation des lipides, la supplémentation en vitamine E est communément utilisée dans la préparation des viandes hachées (Cabedo *et al.*, 1998 ; Faustman *et al.*, 1989 ; Lavelle *et al.*, 1995 ; O'Grady *et al.*, 2000). Ainsi, l'α-tocopherol étant une vitamine liposoluble, elle se répartit dans les membranes cellulaires. La vitamine E peut également être utilisée en élevage et mélangée à la ration. Sa concentration dans le tissu adipeux augmentant avec le niveau de supplémentation alimentaire de l'animal, la protection des acides gras membranaires insaturés contre l'oxydation s'en trouve également améliorée (Liu *et al.*, 1995 ; Mohamed *et al.*, 2008).

Alors que le taux d'oxydation de l'oxymyoglobine dépend de nombreux facteurs (Faustman *et al.*, 1998 ; Schaefer *et al.*, 1995), la vitamine E semble exercer un effet de stabilisation de la couleur en retardant indirectement l'oxydation de l'oxymyoglobine (et l'accumulation de metmyoglobine), via l'inhibition directe de l'oxydation des lipides. L'indice de rouge et la saturation de la couleur (chroma) sont ainsi significativement plus élevés pour les viandes d'animaux supplémentés en vitamine E. La supplémentation en vitamine E semble ainsi être une méthode satisfaisante pour améliorer la durée de conservation des couleurs de la viande de bœuf fraîche (Faustman *et al.*, 1998). Ces aspects sont particulièrement intéressants dans la mesure où les consommateurs semblent rejeter les viandes contenant plus de 30 à 40% de met-myoglobine (Greene *et al.*, 1971), l'ajout de vitamine E ayant tendance à prolonger l'acceptabilité du bœuf haché d'environ 6 jours (Liu *et al.*, 1995).

2.5.3.6. Propriétés sanitaires

Les propriétés sanitaires se caractérisent surtout par l'absence de pathogènes. Ce point est particulièrement sensible pour la viande hachée qui peut être contaminée à cœur et consommée peu cuite. Ce critère de qualité est un prérequis absolu pour le consommateur. Pour ce faire, les viandes hachées doivent satisfaire au minimum aux critères microbiologiques fixés par le règlement CE n°2073/2005 (2005a) concernant les germes mésophiles aérobies, *Escherichia coli, Salmonella* et *Listeria monocytogenes*. En effet, le steak haché est un produit sensible, dans la mesure où le hachage est susceptible de disperser la flore bactérienne de surface à l'intérieur même du produit. Les contrôles sanitaires encadrant les steaks hachés sont ainsi nombreux (tableau 2.5.7).

En début de conservation, les steaks hachés de bœuf contiennent une grande diversité bactérienne initiale (entre 50 et 150 espèces bactériennes différentes selon les lots) (Chaillou *et al.*, 2015). Ces espèces sont d'origine environnementale ou sont issues de l'animal. Seules certaines d'entre elles peuvent se développer lors de la conservation de la viande et conduire éventuellement à l'altération des produits. Ainsi, après 21 jours de conservation au froid, ces mêmes lots de steaks hachés de bœuf n'hébergent plus qu'une vingtaine d'espèces bactériennes (on peut citer *L. piscium*, *L. algidus*, *B. thermosphacta*, *C. divergens* et *L. gasicomitatum*).

Pour lutter contre le développement de la flore bactérienne, le traitement des steaks hachés par haute pression (supérieures à 200 MPa) semble une solution envisageable (Kadam *et al.*, 2012). Ce procédé permettrait en effet l'inactivation totale de *Citrobacter freudii, Pseudomonas fluorescens* et *Listeria innocua*. En revanche, les auteurs notent une altération de la couleur : la viande est plus pâle, plus rose pour un traitement avec des pressions supérieures à 150 MPa et plus grise pour des traitements avec des pressions supérieures à 350 MPa. Cet impact sur la couleur serait à associer à une dénaturation de la myoglobine, un déplacement / une libération de l'hème ou encore une oxydation du fer héminique (Fe2+ en Fe3+) à une pression de 400 MPa.

Il faut en outre noter que l'inhibition peut être considérée comme complète pour une pression de l'ordre de 400 – 500 MPa. Toutefois, *Pseudomonas spp.* a pu être détecté après 3 à 9 jours de conservation à 3°C, indiquant que son inactivation par le traitement haute pression n'a pas été totale.

Tableau 2.5.7. Contrôles sanitaires encadrant les steaks hachés (Cassignol, 2012)

Arrêté ministériel du 8 juin 2006	**Contrôle préalable des abattoirs et des ateliers de viande hachée**	Chaque établissement est agréé suite à contrôle par les services vétérinaires avant de pouvoir fonctionner.
Règlement CE 178-2002	**Responsabilité des professionnels et obligation de contrôle en hygiène**	Responsabilité des professionnels vis-à-vis du produit mis sur le marché et obligation réglementaire de contrôle des exigences réglementaires d'hygiène.
Règlement CE 852-2004 Règlement CE 853-2004	**Maîtrise des activités et autocontrôles des professionnels d'abattage et de fabrication de viande hachée en hygiène**	Les règles générales d'hygiène sont définies réglementairement au niveau européen. Les professionnels peuvent s'appuyer sur des guides de bonnes pratiques d'hygiène et d'application de l'HACCP professionnels pour faciliter leur mise en œuvre.
Règlement CE 2073-2004	**Contrôles bactériologiques**	Les professionnels doivent réaliser des analyses microbiologiques sur les carcasses et les viandes hachées.
Règlement CE 854-2004	**Contrôles par les services vétérinaires en abattoir et en atelier de viande hachée**	Les services de l'état sont présents en permanence sur les sites d'abattage et délivrent une marque de salubrité à chaque carcasse mise sur le marché. Les ateliers de viande hachée sont contrôlés suivant le plan de surveillance national annuel de la Direction générale de l'alimentation.
Plan de maîtrise des E coli pathogènes du SNIV-SNCP des viandes hachées réfrigérées et surgelées	**Contrôle volontaire annuel par un tiers indépendant**	Les adhérents du SNIV-SNCP ont établi un cahier des charges pour la maîtrise bactérienne de la viande hachée qu'ils font contrôler une fois par an par un tiers indépendant.
Règlement CE 1760-2000	**Contrôle traçabilité**	A la lecture de chaque étiquette de viande hachée, il est possible de connaître le(s) pays d'élevage des animaux, le pays d'abattage ainsi que le pays d'élaboration des viandes hachées depuis plus de 10 ans.
Règlement CE 178-2002	**Contrôle étiquetage**	L'affichage des informations de traçabilité (numéro de lot) permet, au-delà des contrôles courants, de retirer rapidement et de manière fiable des produits défectueux des circuits de distribution.
Règlement CE 2073-2005 art 6	**Recommandation de cuisson**	La cuisson « à cœur » est à indiquer sur l'étiquetage des viandes hachées destinées à la cuisson, ceci pour protéger les personnes les plus fragiles.

2.5.4. Conclusions

La variabilité des caractéristiques de la carcasse et de la viande des bovins est très importante et l'origine de celle-ci est **multifactorielle**. Les effets des nombreux facteurs de variation des principaux volets de la qualité intrinsèque (qualité commerciale de la carcasse, qualités organoleptiques, nutritionnelles, technologiques et sanitaires) sont résumés dans les tableaux ci-dessous, complétés par un tableau présentant les facteurs majeurs de l'ensemble des volets de la qualité. Il convient de noter que **ces facteurs se combinent très souvent** en lien avec la finalité du système d'élevage. A titre d'exemple, la viande de gros bovins laitiers est issue de femelles âgées de races laitières alors que la viande de gros bovins allaitants est issue d'animaux de race plus ou moins viandeuse, pouvant être des mâles relativement jeunes (de l'ordre de 2 ans) ou de femelles plus âgées (le plus souvent des vaches ayant donné naissance à plusieurs veaux, plus rarement des génisses). S'y ajoutent des facteurs liés au mode d'élevage (en particulier l'alimentation, tout particulièrement l'effet du pâturage) qui influencent significativement les qualités organoleptiques, nutritionnelles, voire technologiques de la viande. Enfin, les conditions appliquées durant la période précédant immédiatement l'abattage ou durant celui-ci influencent fortement la qualité microbiologique des viandes et leur aptitude à la conservation. La maîtrise de ces dernières est primordiale quand on sait que la viande bovine a pour particularités de pouvoir être consommée **crue** (tartare, carpaccio) et qu'elle nécessite une **maturation** plus ou moins longue pour obtenir une tendreté optimale. Une autre particularité de cette viande, partagée avec la viande ovine, est son **très faible degré de transformation** : si l'on fait abstraction de son utilisation à faible échelle dans la préparation de plats cuisinés (viandes mijotées en sauce, lasagnes), cette viande est consommée sous forme de viandes fraîches (steaks, rôtis, entrecôtes, etc.), de viandes hachées (steak haché, haché de bœuf) ou de préparations de viande (brochettes, viandes marinées à cuire). Le mode de préparation, en particulier la cuisson, influence très fortement les qualités organoleptiques et sanitaires au stade de la consommation.

Propriété commerciale des carcasses de bovins

Facteurs	Poids carcasse	Rendement abattage	Adiposité	Rendement découpe
Génétique [1]	+++	+++	+++	+++
Sexe [2]	-/+	-/+	+	-/+
Age [2]	++	++	+++	++
Alimentation / système d'élevage	++	+	++	+
Conditions de pré-abattage	-	-	-	-
Conditions d'abattage	-	-	-	-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[1] Race (+ caractère culard) ; [2] ces 2 facteurs se combinent souvent (p.ex. : jeune taureau vs vache de réforme)

Propriété organoleptique de la viande de bovins

Facteurs	Couleur	Jutosité	Tendreté	Flaveur
Génétique [1]	+++	+++	+++	+++
Sexe [2]	+	+	+	+
Age [2]	+++	++	+++	+++
Alimentation / système d'élevage [3]	++	+	+	+
Conditions de pré-abattage [4]	++	+	+	-
Conditions d'abattage et de refroidissement des carcasses [5]	+	+	++(+)	-
Muscle/morceau [6]	+++	++	+++	+++
Conditions de conservation [7]	++	+	+++	++
Mode de cuisson	+++	+++	+++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[1] Race (+ caractère culard) ; [2] Ces 2 facteurs se combinent souvent (p.ex. : jeune taureau *vs* vache de réforme) ; [3] pigments caroténoïdes, antioxydants, pâturage ou fourrages grossiers *vs* compléments ; [4] Impact potentiel sur les réserves en glycogène (viandes « *D.F.D* ») ; [5] Sensibilité des viandes rouges au « *cold shortening* » (contraction à froid) ; [6] Teneur et solubilité du collagène ; [7] Conditions de maturation (durée, température) + mode de conditionnement (sous vide, sous atmosphère riche en oxygène)

Propriété nutritionnelle de la viande de bovins

Facteurs	Protéines et acides aminés	Lipides	Acides gras	Minéraux, vitamines et oligo-éléments
Génétique [1]	++	+++	++	-
Sexe [2]	-	+	+	-
Age [2]	+	++	++	-
Alimentation / système d'élevage [3]	+	++	++(+)	++(+)
Conditions de pré-abattage [4]	-	-	-	-
Conditions d'abattage et de refroidissement des carcasses	-	-	-	-
Muscle/morceau	++	+++	++	+
Conditions de conservation [4]	+	+	++	+
Mode de cuisson	++	++	++	++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[1] Race (+ caractère culard) ; [2] Ces 2 facteurs se combinent souvent (p.ex. : jeune taureau *vs* vache de réforme) ; [3] pâturage ou fourrages grossiers *vs* compléments riches en matière grasse et/ou en antioxydants ; [4] Conditions de maturation (durée, température) + mode de conditionnement (sous vide, sous atmosphère riche en oxygène)

Propriété technologique de la viande de bovins

Facteurs	Aptitude à la transformation	Aptitude à la conservation
Génétique [1]	+++	++
Sexe [2]	+	+
Age [2]	++	++
Alimentation / système d'élevage [3]	++	+++
Conditions de pré-abattage [4]	++	++
Conditions d'abattage et de refroidissement des carcasses [5]	+++	+++
Muscle/morceau [6]	+++ [6a]	+++ [6b]
Conditions de conservation [7]	++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[1] Race (+ caractère culard) ; [2] Ces 2 facteurs se combinent souvent (p.ex. : jeune taureau *vs* vache de réforme) ; [3] Antioxydants ; [4] Impact potentiel sur les réserves en glycogène (viandes « *D.F.D* ») ; [5] Effet de la vitesse de refroidissement sur la croissance microbienne en profondeur ; [6a] Teneur et solubilité du collagène, [6b] Sensibilité des lipides et de la myoglobine à l'oxydation ; [7] Conditions de maturation (durée, température) + mode de conditionnement (sous vide, sous atmosphère riche en oxygène) et maîtrise de la chaîne du froid (qualités microbiologique et physico-chimique)

Propriété sanitaire de la carcasse et de la viande de bovins

Facteurs	Risques microbiologiques	Risques chimiques
Génétique	-	-
Sexe [1]	-	+
Age [1]	-	+
Alimentation / système d'élevage [2]	+ [2a]	++ [2b]
Conditions de pré-abattage [3]	++	-
Conditions d'abattage et de refroidissement des carcasses [4]	+++	-
Muscle/morceau [5]	++	-
Conditions de conservation [6]	+++	+
Mode de cuisson [7]	+++ [7a]	++ [7b]

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

[1] Ces 2 facteurs se combinent souvent (p.ex. : jeune taureau *vs* vache de réforme) ; [2a] Portage EHEC ? [2b] Contaminants chimiques via alimentation ? ; [3] Hygiène et propreté des animaux, excrétion de germes pathogènes ?; [4] Bonnes pratiques d'hygiène et contamination microbienne, vitesse de refroidissement et croissance microbienne en profondeur ; [5] Variation de la contamination microbienne en fonction de la localisation dans la carcasse, « transformation » de la viande (p.ex. : viande hachée ou soumise à attendrissage mécanique) ; [6] Conditions de maturation (durée, température) + mode de conditionnement (sous vide, sous atmosphère riche en oxygène) et maîtrise de la chaîne du froid (qualités microbiologique et physico-chimique) ; [7a] Viande (hachée) consommée crue, degré de cuisson des viandes hachées (EHEC) ; [7b] Cuisson grill/BBQ excessive

Facteurs majeurs de variation des propriétés des carcasses et des viandes de bovins

	Qualité						
Facteurs	sanitaire (microbiologique / chimique)	commerciale	organoleptique	nutritionnelle	technologique	usage	image
Génétique	-/-	+++	+++	++	++	+	+++[1]
Sexe[2]	-/+	-/+	+	-/+	+	-	++
Age[2]	-/+	++	+++	++	++	-	++
Alimentation / système d'élevage	+/++	++[3]	++	++	+++	-	+++
Conditions de pré-abattage	++/-	-	+	-	++	-	+++[4]
Conditions d'abattage et de refroidissement des carcasses	+++/-	-	+	-	+++	-	+++[5]
Muscle/morceau	++/-	+++	+++	+++	+++	+++	++
Conditions de conservation	+++/+	+++	++	+	++	+++	+++[6]
Mode de cuisson	+++/++	N.A.	+++	++	NA	+++	+[7]

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

[1] Races locales (IGP), problématique de la césarienne ; [2] Ces 2 facteurs se combinent souvent (p.ex. : jeune taureau *vs* vache de réforme) ; [3] Cahiers des charges et SQO ; [4] Image : bien-être animal (transport, contention et/ou manipulation) ; [5] Problématique de l'abattage sans étourdissement ; [6] Viandes à maturation longue (« *dry-aged beef* ») ; [7] Grillades vs autres modes de cuisson ?

Ces facteurs de variation peuvent devenir facteurs de **différenciation positive** quand ils font l'objet de critères dans un cahier des charges. Les SIQO portant sur la viande bovine sont associés à de nombreux facteurs de différenciation tout au long de la chaîne de valeur, à commencer par le facteur racial et le lien avec le terroir.

Les bovins sont des ruminants avec les avantages (p.ex. peu de compétition alimentaire avec l'homme) et les inconvénients (p.ex. : émissions de gaz à effet de serre) qui y sont associés. Les **antagonismes entre les divers modes d'élevage** sont nombreux. A titre d'exemple, l'engraissement des gros bovins **à l'herbe**, lorsqu'il est comparé à l'engraissement à l'étable avec une ration riche en aliments concentrés, présente l'avantage de produire une viande plus « typée » sur le plan organoleptique (couleur plus sombre), plus maigre et contenant proportionnellement plus d'acides gras oméga 3 tout en présentant une stabilité oxydative supérieure. Ce mode de production présente par ailleurs de nombreux atouts en termes d'image : « naturalité » associée à la production en prairie et à la faible utilisation d'intrants. Cette dernière n'est cependant pas sans inconvénient : la diminution voire l'absence d'utilisation d'aliments concentrés limite la vitesse de croissance et le dépôt de graisse qui caractérise la période « d'engraissement ». Par ailleurs, en raison même du caractère saisonnier de la production d'herbe, ce mode d'élevage ne permet pas une production continue durant toute l'année et son impact carbone peut s'avérer plus défavorable lorsqu'il est exprimé par kg de viande produite (et sans tenir compte de l'effet puits de carbone associé aux prairies).

Effets positifs et négatifs associés à l'engraissement **à l'herbe des gros bovins (*vs*. engraissement avec une ration riche en aliments concentrés en étable)**

Dimensions	Effets positifs	Effets négatifs
Caractéristiques de la carcasse		• Etat d'engraissement moindre • (+ Conformation moindre et/ou poids plus faible)
Caractéristiques organoleptiques	• Viande plus sombre (pour ceux qui apprécient …)	• Viande plus sombre (pour ceux qui n'apprécient pas …) • Gras plus jaune ? • Flaveur plus forte et moins appréciée • Variabilité des effets selon la saison, l'animal, la nature de la prairie et la gestion de l'herbe (stade et quantité d'herbe offerte)
Caractéristiques nutritionnelles	• Meilleur profil en acides gras de la viande (acides gras n-3) • Viande plus maigre	• Variabilité des effets selon la saison, l'animal, la nature de la prairie et la gestion de l'herbe (stade et quantité d'herbe offerte)
Caractéristiques d'usage	• Meilleure stabilité oxydative de la viande (anti-oxydants de l'herbe)	• Production liée aux saisons => quid en hiver ? • Surfaces disponibles ? Autonomie alimentaire ? • Durée de l'engraissement plus importante ? • Coût => répercussion du surcoût vers le consommateur ?
Caractéristiques d'image	• Naturalité, animaux en plein air, moindre empreinte environnementale (moins d'intrants, entretien prairies, biodiversité, captation carbone…)	• Empreinte environnementale exprimée en kg CO_2/kg viande ? (vitesse de croissance plus faible, indice de consommation plus élevé)

Si la différenciation porte uniquement sur le caractère **biologique** de la production, et si celui-ci est comparé au mode de production conventionnel à l'herbe, les antagonismes paraissent plus faibles. Ils portent principalement sur l'autonomie alimentaire qui peut constituer un obstacle pour les élevages qui ne disposent pas des surfaces et/ou des conditions pédoclimatiques permettant la production des aliments nécessaires à la complémentation du régime à base d'herbe et à l'obtention d'un degré de finition suffisant.

Effets positifs et négatifs associés à l'élevage **biologique** des gros bovins à l'herbe (vs. élevage **conventionnel** des gros bovins à l'herbe)

Dimensions	Effets positifs	Effets négatifs
Caractéristiques de la carcasse		• Etat d'engraissement moindre • (+ Conformation moindre et/ou poids plus faible)
Caractéristiques organoleptiques	• Flaveur moindre (si viande plus maigre)	• Variabilité plus importante (si pas de compléments)
Caractéristiques nutritionnelles	• Viande plus maigre	• Variabilité plus importante (si pas de compléments)
Caractéristiques d'usage	•	• Autonomie alimentaire • Durée de l'engraissement plus importante ? • Coût => répercussion du surcoût vers le consommateur ?
Caractéristiques d'image	• Naturalité, animaux en plein air, moindre empreinte environnementale (moins d'intrants, entretien prairies, biodiversité, captation carbone…) • Produit différencié (SIQO)	• Empreinte environnementale exprimée en kg CO_2/kg viande ? (vitesse de croissance plus faible, indice de consommation plus élevé)

On observe par ailleurs des **antagonismes entre les volets de la qualité**, et ce pour tous les modes d'élevage. La maîtrise des facteurs de production est souvent guidée par des objectifs ou des critères de productivité (vitesse de croissance, indices de consommation) et de qualité commerciale et de qualité de carcasse (poids, conformation, état d'engraissement). La sélection génétique a souvent été orientée dans ce sens, sans prendre en compte le volet organoleptique. Des antagonismes sont possibles entre la qualité de la carcasse et la qualité de la viande, entre les volets de la qualité de la viande (p.ex. : viande maigre présentant un avantage en matière de qualité nutritionnelle mais un inconvénient en termes de qualité organoleptique à savoir une flaveur et une jutosité moindres).

La variabilité de la qualité peut être importante **entre animaux**, même lorsqu'ils sont issus d'un même système d'élevage et il n'est pas facile pour le consommateur d'évaluer cette variation, hormis sur le plan visuel. On perçoit de la part du consommateur une attention particulière sur la tendreté de la viande bovine, caractéristique extrêmement variable et difficile à évaluer lors de l'achat. La **prédiction des caractéristiques organoleptiques** de la viande est un objectif majeur pour les opérateurs de la chaîne de valeur. Celle-ci peut s'envisager de deux manières différentes. La première repose sur des modèles de prédiction de la qualité à partir de données collectées lors de la production et de l'abattage des animaux et de relations préalablement déterminées entre ces données. De tels modèles existants (MSA en Australie), à adapter ou à développer en France ou plus largement en Europe permettraient d'apporter des informations complémentaires utiles au consommateur pour orienter son choix. La deuxième approche est instrumentale, elle repose sur des méthodes physiques (p.ex. spectroscopie visible et/ou proche infra-rouge) applicable *on line* sur la carcasse lors de l'abattage et permettant de prédire certaines caractéristiques physico-chimiques de la viande sur base d'une calibration antérieure de l'équipement. Quelle que soit l'approche, elle est toujours associée à une erreur de prédiction, plus ou moins importante selon les méthodes et les paramètres prédits, et il convient donc de considérer les informations issues de ces méthodes comme des indicateurs ou des repères permettant aux consommateurs d'orienter et d'objectiver leur choix, aux opérateurs d'objectiver la qualité et la rémunération de celle-ci.

Les modes de distribution de la viande ont évolué au cours des dernières décennies. La viande fraîche est et reste un produit très périssable. Tenant compte de sa définition très restrictive, sa conservation repose principalement sur l'utilisation du froid et la

modification de l'atmosphère. **L'aptitude de la viande à la conservation** est donc une composante majeure de sa qualité, en particulier pour la viande bovine dont la durée de conservation est généralement supérieure à celle des autres espèces. Sa stabilité microbiologique repose sur l'application de bonnes pratiques d'hygiène et de conservation. Sa stabilité physico-chimique repose aussi si ces pratiques mais, par ailleurs, elle est influencée par certaines caractéristiques intrinsèques de la viande, en particulier sa capacité anti-oxydante. Une augmentation de la durée de conservation et une diminution des pertes suppose une meilleure compréhension des facteurs à l'origine de la variation de la stabilité physico-chimique, en particulier la stabilité de la couleur, premier critère perçu par le consommateur lors de l'achat. **La capacité anti-oxydante** mérite par ailleurs l'attention des chercheurs dans le cadre du lien épidémiologique qui a été établi entre la consommation de viande rouge et l'incidence du cancer colorectal, plus particulièrement l'implication du fer héminique dont la teneur est plus élevée dans les viandes rouges.

2.6. Chair de poissons

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Chair de poissons
Ce corpus contient 245 références dont 92% articles. La période couvre de 1983 à 2019 mais la majorité des publications sont comprises entre 2000 et 2019. 83 revues sont citées dans le corpus dont 3 majoritaires, Aquaculture et Aquaculture Research étant les plus citées (56 et 18). Le taux d'autocitation est de 10%.

2.6.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation

Le champ de la présente expertise se limite aux poissons issus de l'aquaculture, et parmi eux aux espèces principales produites en France et en Europe.

Parmi les produits animaux, une particularité des poissons est de recouvrir sous le nom générique de « poisson », une variété de genres et d'espèces dont les caractéristiques exploitées (taille, morphologie, aspect) conduisent à des produits variés. Ces différentes espèces peuvent être élevées dans des milieux variés (structure d'élevage, pisciculture continentale/marine) et conduisent à une diversité de produits commercialisés crus (poissons éviscérés, filets, darnes, pavés, …) ou transformés.

Les modes de production sont également variés. Ils dépendent bien sûr de l'espèce considérée, mais une même espèce peut être produite dans différents systèmes d'élevage. Pour la pisciculture continentale, on distingue une production extensive, qui concerne essentiellement la pisciculture d'étang, et une production intensive correspondant aux salmonidés d'eau douce. La pisciculture marine est mise en place dans des cages en mer, plus moins éloignées du littoral, mais aussi dans des structures à terre, avec des systèmes de pompage d'eau de mer. La partie écloserie pour les espèces marines est très technique, car les larves de ces espèces sont souvent très petites, nécessitent une alimentation par des proies vivantes, et peuvent même, pour certaines, subir une métamorphose (turbot). L'élevage du saumon Atlantique a la particularité de combiner une phase précoce d'éclosion/alevinage/croissance juvénile en eau douce, puis une période de grossissement en mer, qui accélère fortement la croissance des poissons.

La pisciculture mondiale en plein essor produit environ 50 millions de tonnes de poissons (pour 99 milliards d'USD) dont 87% en pisciculture continentale (FAO (2016), Tableau 2.6.1). Ce chiffre représente 44% de la production, le complément étant fourni par la pêche. La production mondiale de poissons d'aquaculture a connu une très forte croissance ces 40 dernières années (moyenne de croissance de 8,8% annuelle) et en 2011 elle a rejoint et désormais dépasse la production de viande bovine (site Earth Policy Institute). Cette production est largement dominée par la Chine (55% de la production totale) (FAO, 2016). L'Europe, quant à elle, produit 2,3 millions de tonnes de poissons dont 78% en pisciculture marine. Le principal pays producteur est la Norvège (72% en volume de la production marine) avec, comme principale production, le saumon Atlantique (FAO, 2016). La France produit presque 50 000 t de poisson (en 2014) pour un chiffre d'affaire de 184 millions d'euros (FranceAgriMer, 2017b). Cette production se répartit en 3 grands secteurs : la salmoniculture (truites, saumon) (35 650 t), la pisciculture marine (bar, dorade, turbot, maigre) (5 150 t) et la pisciculture d'étang (carpe, gardon, …) (8 150 t) dont une partie de la production est destinée au repeuplement (FranceAgriMer, 2017b). Les principales régions françaises de production sont la Nouvelle Aquitaine, la Bretagne et les Hauts de France qui totalisent 70% de la production nationale (source CIPA)[36].

Tableau 2.6.1. Production piscicole et consommation de poisson **PRODUCTION (chiffres 2014)**[1]

	Pisciculture continentale	**Pisciculture marine**	**Total**
Monde (en Mt)	43,6 (87% du total)	6,3 (%13 du total)	49,9
Europe (en Mt)	0,5 (22% du total)	1,8 (78% du total)	2,3
France (en t)	43 500	6 000	49 500
	CONSOMMATION TOTALE (pêche + élevage)		
	Monde	**Europe**	**France**
Consommation (kg/an/hab)	20.1[1]	22 [3]	24 (dont 22% issu de la pisciculture) [2]

[36] https://www.poisson-aquaculture.fr/chiffres-cles/

Contribution à l'apport en protéines animales (%) [3]	6,5	11,5	13,3
Contribution à l'apport protéique total (%) [3]	16,7	6,5	8,3

[1] FAO (2016) ; [2] France Agrimer (2017b); [3] FAO (2013) ; [4] Martinie-Cousty et Prévot-Madère (2017)

La consommation mondiale de poisson augmente régulièrement depuis les années 1960 pour atteindre un peu plus de 20 kg/an/habitant en 2014 (FAO, 2016). La part des produits aquacoles dans cette consommation a dépassé celle des produits de la pêche en 2014 et représentait 53% de la consommation en 2015. Les consommations européennes et françaises sont respectivement de 22 et 24 kg/an/habitant, ce qui représente 6,5 et 8,3% des apports protéiques, respectivement. Parmi les 24 kg de poissons consommés par an et par habitant en France, seulement 22% sont issus de la pisciculture (FranceAgriMer, 2017a) et moins de 2% serait issus de la pisciculture française (Martinie-Cousty et Prévot-Madère, 2017).

2.6.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits depuis l'élevage jusqu'à la consommation et leurs effets

Les poissons présentent, par rapport aux animaux terrestres, de nombreuses particularités qui vont déterminer les facteurs impactant leur propriétés. On peut noter, par exemple, que différentes espèces vont avoir des propriétés commerciales et organoleptiques distinctes. La domestication récente, voire en cours pour certaines espèces, conduit à une forte hétérogénité des lots, une marge de progrès importante par la sélection génétique, et un besoin constant de travaux de nutrition pour optimiser les besoins nutritionnels de chaque espèce. Leur milieu de vie aquatique les rend dépendant de la qualité écologique du milieu d'élevage. Les poissons sont pour la plupart poïkilothermes (ils ne régulent pas leur température corporelle) et sont donc en prise directe avec la température de l'eau qui est un des facteurs majeurs de leur capacité de croissance. On notera ainsi une certaine saisonnalité de certaines propriétés.

2.6.2.1. Propriétés commerciales

Croissance et poids des poissons

La première propriété commerciale est d'avoir des poissons correspondant au calibre attendu pour un type de produit commercialisé. Pour y parvenir, il faut maitriser la croissance des poissons en élevage. La plupart des espèces aquacoles sont de domestication récente, ce qui rend la croissance encore très variable, et conduit à une forte variabilité de poids à l'intérieur d'un lot.

La croissance est dépendante :

- De l'espèce : commercialisation à différentes tailles (maturité), sous différentes formes (entier/découpe), en lien avec tout ce qui suit…
- Des pratiques zootechniques : rationnement, type d'aliment, mode de distribution, système d'élevage…
- De l'origine génétique : souches, familles, sélection génétique
- Des conditions environnementales : température, photopériode, qualité d'eau (O_2, CO_2, …)
- Du « stress » d'élevage (dont Interactions sociales, densité)
- Du statut physiologique des poissons : âge, maturation sexuelle

Rendements de découpe

Comme pour les produits carnés, la consommation de poisson a évolué vers des produits prêts à cuisiner de type filets, pavés ou darne. L'obtention de ces produits à partir d'un poisson entier nécessite plusieurs étapes de découpe comme l'éviscération, le filetage, le parage (élimination des arêtes et tissu adipeux sous cutané) et le pelage. Les produits peuvent ensuite être mis en portions, darnes (section transversale) ou pavés (morceaux de filets). A chacune de ces étapes, des tissus sont éliminés et non utilisés pour la consommation humaine, il est donc important pour la filière, d'un point de vue économique et environnemental, de minimiser les pertes générées par les procédés de découpe et donc d'améliorer les rendements de transformation comme le rendement en filet (poids des filets/poids de l'animal entier).

La variabilité des rendements de découpe est liée à l'anatomie des poissons et au développement relatif des masses musculaires par rapport aux tissus qui seront éliminés lors de la découpe, principalement les tissus adipeux (viscéral, sous-cutané), les organes internes (foie, tube digestif, gonades) et les tissus osseux (tête, axe vertébral). Ainsi, les facteurs de variation des rendements sont ceux qui auront un impact sur le développement relatif de ces tissus. Il faut également tenir compte d'une notion plus complexe qui est « l'aptitude au filetage », certaines espèces présentant des morphologies moins aptes à être filetées que d'autres (carpe et turbot vs. saumon par exemple). En règle générale, les poissons ronds et plutôt longilignes comme le saumon sont les plus faciles à fileter car ils présentent de grandes masses musculaires situées symétriquement par rapport à l'axe vertébral, que cela soit sur l'axe de symétrie (droite-gauche) ou l'axe dorso ventral.

Par conséquent, **le principal facteur de variation des rendements de découpe au sein de la filière piscicole est l'espèce**. La proportion de muscle consommable, estimée par le rendement en filet fait ainsi partie des critères de qualité intervenant lors du choix d'une nouvelle espèce destinée à l'aquaculture (Lazo *et al.*, 2017). En effet les masses relatives du muscle sont des caractéristiques qui varient fortement d'une espèce à l'autre. Le tableau 2.6.2 montre qu'on ne peut pas prédire simplement le niveau de rendement en filet à partir de la forme générale du poisson (rond, plat, etc..). Ainsi un poisson plat comme le turbot présente un rendement en filet faible par rapport à un autre poisson plat comme le flétan. Le très bon rendement en filetage (60%) du flétan peut s'expliquer par une épaisseur musculaire importante pour un poisson plat (Roth *et al.*, 2007). De même parmi les poissons ronds des différences de rendement importantes existent entre la roussette (Scyliorhinus stellaris) (38%) et le saumon (58%).

Au sein d'une même espèce les facteurs de variation des rendements de découpe sont ceux qui vont modifier la morphologie générale et le développement relatifs des différents tissus notamment des tissus adipeux (peri viscéraux et sous cutané), la mise en réserve de l'énergie dans le foie, les tissus adipeux (autres que intramusculaires), les gonades, sera en effet un élément défavorable au rendement en filet.

L'analyse de la relation entre la morphologie externe et/ou interne des poissons et les rendements de découpe constitue une méthode non invasive permettant d'évaluer la quantité de tissu musculaire et donc d'estimer les performances au filetage des individus (Fauconneau *et al.*, 1996). Chez le saumon, le rendement en filet est lié à la fois à la taille des poissons et à leur forme, les poissons les plus grands et les plus épais présentant les meilleurs rendements. Il existe toutefois une morphologie « optimale » ; ainsi au-delà d'un coefficient de condition (=poids/longueur^3) de 1,5, le rendement au filetage décroît. Cela montre que ces sujets, bien que très épais et trapus, présentent une aptitude au filetage moindre et/ou un développement supérieur de tissus non musculaires (tissus adipeux, tissu osseux) par rapport à des poissons plus longilignes (Bencze-Rora *et al.*, 2001). La relation entre rendement en filet et morphologie externe a été démontrée chez de nombreuses espèces de poissons comme le poisson chat américain (Ictalurus *punctatus*) (Bosworth *et al.*, 2001), la carpe (Prchal *et al.*, 2018a), le tilapia (*Oreochromis niloticus*) (Rutten *et al.*, 2004) et la truite (Haffray *et al.*, 2013). La combinaison de mesures internes d'épaisseur musculaire par échographie avec des mesures externes permet d'améliorer nettement la prédiction des rendements par rapport à l'utilisation de mesures externes seules (Haffray *et al.*, 2013).

Tableau 2.6.2. Proportion en pourcentage du poids vif entier des principaux compartiments corporels chez quelques espèces de poissons.

Morphologie	Espèce (nom commun et latin)	viscères	foie	tête	axe vertébral	peau	filet sans peau
Plat	Flétan[1] (*Hipoglossus hipoglossus*)	9					60
Plat	Turbot[2] (*Psetta maxima*)	2,5	1,8				27
Rond	Bar* (*Dicentrarchus labrax*)	8	2,5	18		6	36
Rond	Baudroie[1] (*Lophius piscatorius*)	14		40-60			46 (vidé étêté)
Rond	Cobia[3] (*Rachycentron canadum*)	4,7	0,8				33
Rond	Congre[1] (*Conger conger*)	10		17-20	13-14	13-14	47-52
Rond	Hareng[1] (*Clupea harengus*)	11		19	18		52 avec peau
Rond	Lieu[1] (*Pollachius pollachius*)	15	5-6	14-19	22-25	3	46-53
Rond	Maquereau[1] (*Scomber scombrus*)	11		19	17		53 avec peau
Rond	Morue[1] (*Gadus morhua*)	18	10-12	19-23	22-29	4-5	37-43
Rond	Morue[4] (*Gadus morhua*)		13-15				35-38
Rond	Pagre à tête noire[5] (*Acanthopagrus schlegelii schlegelii*)	2,1 (tissu adipeux périviscéral)	1,4				35
Rond	Poisson chat américain[6] (*Ictalurus punctatus*)	13		23		5,6	46
Rond	Roussette[1] (*Scyliorhinus stellaris*)	18		5		6	38 étêté pelé
Rond	Saumon[1] (*Salmo salar*)	13	1	10	18	6	53

Rond	Saumon[7] (*Salmo salar*)	7	1,2				58
Rond	Thon germon[1] (*Thunnus alalunga*)	13		20	21	6	40
Rond	Thon rouge[1] (*Thunnus thynnus*)	14		23	11	7	45
Rond	Tilapia[8] (*Oreochromis niloticus*)	11		22		6	34
Rond	Truite arc en ciel[1] (*Oncorhynchus mykiss*)	14		9	18	6	53
Rond	Truite fario* (*Salmo trutta*)	7	1	12	8	6	60

[1] Andrieux (2004), [2] Regost *et al*. (2001), [3] Mach et Nortvedt (2013), [4] Jobling *et al*. (1994), [5] Ji *et al*., (2003), [6] Bosworth et Wolters (2004), [7] Einen *et al*. (1998), [8] Silva *et al*. (2009), * Données non publiées

Le déterminisme génétique est également observé en comparant différentes souches de truite qui présentent des rendements carcasse et filets différents (Crouse *et al.*, 2018; Paaver *et al.*, 2004).

L'estimation des paramètres génétiques (héritabilités, corrélation) a permis de mettre en évidence le déterminisme génétique des rendements de découpe chez de nombreuses espèces de poissons comme la truite, le bar, la daurade, la carpe, il semble donc possible d'améliorer ces caractères avec un schéma de sélection adapté (Fraslin *et al.*, 2018 ; Prchal *et al.*, 2018a).

Par exemple, chez la truite arc-en-ciel une étude rapporte des héritabilités de 0,49 et 0,35 pour le rendement carcasse et filet respectivement. Il a également été montré qu'il pouvait être plus simple et plus efficace de sélectionner sur le rendement en carcasse éviscérée étêtée (RCEE) que directement sur le rendement en filet pour améliorer ce dernier. En effet, le RCEE est plus héritable (h^2=0,55) et il est très bien corrélé (rg=0,98) avec le rendement en filet. Il est également plus simple à mesurer car ne nécessite que l'éviscération et la découpe de la tête et permet ainsi de s'affranchir du filetage qui est une opération plus complexe et donc une source de variabilité technique (Haffray *et al.*, 2012). La surface des tissus adipeux gras sous cutané qui seront éliminés au parage présente une héritabilité comprise entre 0,57 et 0,7 (Kause *et al.*, 2008). Bien que ce caractère soit plus difficile à mesurer car il nécessite des techniques d'imagerie (IRM, vision numérique) Il est possible de l'améliorer en indexant les candidats à la sélection avec la performance de collatéraux caractérisés après découpe.

Récemment, c'est chez la truite qu'il a été montré pour la première fois une réponse à la sélection sur le rendement en filet (Vandeputte *et al.*, 2019).

Les techniques modernes de génotypage avec des puces SNP permettent d'identifier, de plus en plus précisément, des régions du génome, associées aux différences de rendement en filet, ainsi chez la truite 23,2% de la variance du rendement en filet est expliqué avec deux loci (Salem *et al.*, 2018).

La demande du marché en grande et très grande truite pour la production de filets fumés a nécessité de produire des animaux stériles afin d'éviter la perte de croissance et de qualité observée lors de la maturation sexuelle (*cf.* effet de la maturation sexuelle). C'est la production de population de truite monosexe femelle **triploïde** qui a permis de s'affranchir des effets délétères de la reproduction sur les paramètres de qualité. En général, les poissons triploïdes présentent de meilleurs rendements en carcasse par rapport aux diploïdes autour de la reproduction du fait de l'absence du développement des gonades. Chez la truite, le rendement en carcasse et en filet est inférieur chez les diploïdes matures par rapport à des poissons diploïdes immatures ou des triploïdes (Janhunen *et al.*, 2019) ce qui démontre que c'est bien l'absence de maturation sexuelle qui apporte les gains en rendement chez les triploïdes.

Lors de la **reproduction** les poissons investissent une grande partie de leur énergie dans la production de gonades (ovocyte et sperme) et ce au détriment de la croissance d'autres tissus comme le muscle squelettique mais aussi les tissus adipeux péri viscéraux et sous cutanés (Weil *et al.*, 2013). Ainsi le RGS peut atteindre 10 à 20% chez la truite et cela constituera une perte dès l'étape d'éviscération au cours de laquelle, en plus du tube digestif, les gonades seront éliminées ce qui entrainera une diminution du rendement carcasse. La croissance musculaire est également affectée avec une moindre croissance du muscle ce qui accroit d'autant plus la diminution du rendement en filet (Aussanasuwannakul *et al.*, 2011; Paaver *et al.*, 2004). Le maximum de rendement en filet est ainsi observé autour de 20 mois chez la truite, moment à partir duquel les gonades se développent et le rendement filet diminue (Davidson *et al.*, 2014b). La maturation sexuelle est donc un facteur qui altère les rendements de découpe et qu'il est nécessaire d'éviter soit en commercialisant les poissons avant la période de reproduction, soit après une phase d'élevage permettant de restaurer les paramètres de qualité, soit enfin en les stérilisant avec des méthodes de triploïdisation.

L'âge ou le stade de développement a un impact sur les rendements car une évolution de la morphologie générale est observée avec par exemple une augmentation du coefficient de condition avec l'âge, qui passe ainsi chez la truite de 1,6 à 2,2 pour des poissons de 130 g et 4 kg respectivement (Davidson *et al.*, 2014b). Cette évolution s'explique par l'allométrie de croissance des différents tissus, c'est-à-dire la vitesse de développement de chaque tissu par rapport à l'ensemble du corps. Ainsi, il apparait chez la truite que le muscle présente une allométrie légèrement positive, c'est-à-dire que pour des animaux en croissance, avec l'âge (et donc le poids)

la masse musculaire augmente plus vite que le reste du corps, ce qui peut donc potentiellement améliorer le rendement en filet. Toutefois, d'autres tissus présentent des allométries de croissance positives comme les tissus adipeux périviscéraux (Weatherley et Gill, 1983) ce qui va entrainer une diminution du rendement en carcasse et donc s'opposer à l'amélioration du rendement en filet. Les tissus osseux, notamment la tête, présentent une allométrie de croissance négative. La tête grossit donc moins vite que le reste du corps. Au final, le développement relatif de ces différents tissus avec l'âge montre que les poissons les plus gros (ou les plus âgés) présentent de meilleurs rendements en filet (Crouse *et al.*, 2018). Toutefois, comme on l'a vu précédemment un optimum est atteint juste avant que le poisson n'entre en maturité sexuelle.

Comme on l'a vu précédemment les rendements sont liés à la morphologie et à l'état d'engraissement, plus précisément à la localisation des dépôts lipidiques. **L'alimentation** ayant un impact direct sur la croissance et la mise en réserve de l'énergie, la quantité de l'aliment distribué et sa qualité vont influencer les rendements.

En terme de quantité d'aliment il apparait qu'un rationnement partiel va limiter les dépôts lipidiques notamment périviscéraux donc améliorer le rendement en carcasse, mais réduire également la croissance musculaire ce qui ne favorise donc pas forcément une augmentation du rendement en filet qui peut même diminuer en cas de fort rationnement (0,25% g/j) (Einen *et al.*, 1999). Lors d'une période de jeûne le poisson va utiliser ses réserves, notamment hépatiques et périviscérales ce qui va entrainer une amélioration du rendement en carcasse. Toutefois, pour un jeûne supérieur à 30 jours la masse musculaire va également être diminuée et au final une diminution du rendement en filet est observée chez le saumon (Einen *et al.*, 1998).

La composition de l'aliment notamment sa teneur en lipides et protéines peut également modifier la mise en réserves de l'énergie dans les tissus adipeux et par conséquent avoir un impact sur les rendements de découpe.

Ce sont les protéines et les lipides qui apportent de l'énergie dans l'alimentation des poissons carnivores comme les salmonidés. Les aliments commerciaux modernes contiennent la plus grande partie de leur énergie sous forme de lipides, alors que la teneur en protéines a diminué au fil des ans, ce qui a entraîné une réduction progressive du rapport protéines/lipides dans l'alimentation. Cette stratégie s'est avérée efficace pour favoriser une bonne croissance et une épargne protéique mais favorise également les dépôts adipeux. Ainsi la formulation d'un aliment à énergie constante plus riche en protéines (ratio protéines/lipides > 1,1) et donc moins riche en lipides réduit l'adiposité globale (musculaire et péri viscérale) et améliore le rendement en carcasse (Weihe *et al.*, 2019). En général, les salmonidés et principalement la truite ont donc tendance à déposer l'énergie excédentaire sous forme de tissus adipeux péri viscéral ce qui réduit leur rendement en carcasse.

Le développement de l'aquaculture a eu pour conséquence l'évolution de l'origine des matières premières utilisées dans l'aliment basée au départ sur les farines et huiles de poissons issues de la pêche minotière. C'est l'incorporation progressive des farines et huiles végétales qui a permis de réduire les farines et huiles de poisson. Toutefois, de forts taux de substitution (> 80%) de la farine et de l'huile de poisson par des farines et des huiles végétales affectent les performances de croissance et l'efficacité alimentaire (Medale *et al.*, 2013).

L'origine des matières premières de l'aliment peut également affecter les dépôts lipidiques ainsi de fortes substitutions qui portent à la fois sur les protéines et les lipides modifient l'adiposité. Par exemple, chez le saumon une proportion de 80% de protéines et 70% d'huile d'origine végétale entraine une augmentation d'un point de la proportion de lipides péri viscéraux sans modification des lipides intramusculaires (Torstensen *et al.*, 2011). Cet effet est également observé chez la truite arc-en-ciel nourrie avec des aliments d'origine végétale (Panserat *et al.*, 2009). Les mécanismes d'orientation des dépôts lipidiques vers la cavité abdominale plutôt que vers le muscle reste à expliquer (Medale *et al.*, 2013).

Outre les ingrédients d'origine végétale les recherches s'orientent également vers l'incorporation de nouvelles sources comme les farines d'insecte.

Chez le saumon, une substitution partielle à totale de farine de poisson par de la farine de larves d'insecte entraine une augmentation des rapports hépato et viscéro somatiques selon le taux de substitution et la qualité de la farine d'insectes (Lock *et al.*, 2016), chez la truite aucun effet n'est observé avec des taux de substitution de 50% (Iaconisi *et al.*, 2018).

De nombreux **facteurs environnementaux** peuvent avoir un impact sur l'état d'engraissement des animaux et leur morphologie et donc leur rendement de transformation. Toutefois, il s'agit souvent d'effet indirect, par exemple chez la daurade, les effets saisonniers qui peuvent être observés avec une augmentation des dépôts lipidique à la fin de l'été et début de l'automne ou de faibles dépôts après l'hiver sont attribués aux variations de la prise alimentaire qui est elle-même lié à la température de l'eau (Grigorakis, 2007).

Plus généralement, les facteurs qui vont moduler la croissance peuvent également avoir un impact sur le développement des tissus adipeux et donc des rendements de découpe. On peut citer ainsi les effets de paramètres de qualité de l'eau (O_2, CO_2 dissout, température) ou la photopériode. Par exemple, pour des valeurs de CO_2 supérieure à 40 mg/l des effets négatifs apparaissent sur la croissance ainsi que sur le rendement en filet (Hafs *et al.*, 2012). Des poissons élevés avec un taux d'oxygène de l'eau proche de 120% de la normoxie présentent de meilleurs rendements en filet par rapport à des animaux élevés à 80% (Lefevre *et al.*, 2007).

Le niveau d'exercice, qu'il est possible de moduler en contrôlant la vitesse du courant, peut modifier la morphologie des poissons qui présentent un coefficient de condition supérieur quand la vitesse du courant augmente, et un rendement filet supérieur (Nilsen *et al.*, 2019). Cet effet n'est toutefois pas systématique puisque les mêmes auteurs lors d'une seconde expérience n'observent plus aucune différence significative sur ces paramètres. Il existe pour chaque espèce une vitesse de courant optimale au-delà de laquelle des effets délétères sont observés sur la croissance car l'exercice nécessite une dépense énergétique supérieure à la mise en réserve des ressources alimentaires. Il y a globalement peu d'effet majeur de l'exercice sur les rendements de découpe.

La photopériode (alternance jour et nuit) peut être modifiée en élevage en utilisant des systèmes d'éclairage qui permettent ainsi de s'affranchir de la photopériode naturelle. Chez la morue, comparée à une photopériode naturelle, une photopériode continue améliore la croissance et le rendement carcasse avec une diminution du rapport hépato et gonado somatique qui témoigne d'une inhibition de la maturation sexuelle chez ces poissons (Bjornevik *et al.*, 2017). Une photopériode artificielle appliquée en novembre entraine lors de l'abattage en juin une dégradation du rendement en carcasse avec également un rendement hépato somatique plus fort par rapport à des animaux pour lesquels la photopériode artificielle a été appliquée pendant l'été (Hagen et Johnsen, 2016).

La température de l'eau est le premier facteur qui influe sur la croissance globale, les poissons ayant un optimum thermique en deçà et au-delà duquel la croissance est réduite voire nulle. En ce qui concerne les rendements il est donc difficile de discriminer la part liée à la croissance de celle spécifique de la température qui d'ailleurs passe par une variation de la prise alimentaire.

Déformation / Malformation / Intégrité des poissons

Des anomalies du squelette notamment au niveau de l'axe vertébral sont fréquentes chez les poissons d'élevage qui peuvent présenter des défauts comme des lordoses, cyphoses, fusions vertébrales. Il s'agit d'un problème de qualité pour la filière à la fois pour la commercialisation des poissons entiers qui présentent alors des morphologies externes anormales mais aussi pour l'industrie de la transformation principalement au moment du filetage où la présence de déformation ou fusion de vertèbres rend difficile la découpe. Il s'agit d'un problème très fréquent, chez les poissons marins (bars et daurades) une incidence de 30 à 100% de poissons présentant des anomalies à différents stades de développement peut être observée (Costa *et al.*, 2013). En général, les animaux présentant des déformations visibles sont éliminés le plus tôt possible au cours de tri qualité. Toutefois, une étude comparative a révélé que dans des piscicultures françaises 22% des truites présentaient des anomalies vertébrales dites discrètes, c'est-à-dire non décelables par un examen externe (Deschamps *et al.*, 2010).

De nombreux facteurs d'élevage sont susceptibles d'avoir un impact sur la croissance du squelette et les malformations, notamment dans les jeunes stades ou la moindre carence ou facteurs environnementaux stressants peuvent altérer la croissance du squelette (voir revue de Deschamps *et al*. (2010)).

On peut ainsi citer des facteurs alimentaires comme les apports en minéraux notamment en calcium, lorsque les eaux sont faiblement minéralisées, et en phosphore dont l'apport est limité pour respecter les normes de rejets. Les apports en vitamines et en premier lieu les vitamines C et D doivent être maitrisés afin d'éviter une carence qui engendrerait des défauts d'ossification.

Les pratiques d'élevage comme les manipulations que subissent les poissons au cours d'un cycle d'élevage (tris, vaccinations, changement de bassins, stripping) sont également sources de stress mécanique qui peuvent engendrer des lésions du squelette.

Les poissons triploïdes présentent généralement les mêmes types de déformations que les poissons diploïdes mais avec des incidences plus élevées (Babaheydari *et al.*, 2016).

Des facteurs environnementaux comme la vitesse du courant peuvent réduire l'incidence des déformations ainsi avec un courant de 1,5 L/s les truites présentent moins de vertèbres fusionnées et présentent un plus fort taux de calcitonine circulante. Cette hormone jouant un rôle clé dans la minéralisation osseuse (Deschamps *et al.*, 2009). Toutefois chez les juvéniles de poissons marins un courant trop rapide est source d'importantes malformations (Chatain, 1994).

Une faible teneur en oxygène de l'eau (60% de la normoxie) au cours des stades précoces de développement peut conduire à des déformations de l'axe vertébral, préjudiciables à la qualité commerciale ultérieure des saumons (Sanchez *et al.*, 2011).

2.6.2.2. Propriétés sanitaires

Les poissons sont concernés par une grande diversité de dangers microbiologiques (Huss *et al.*, 2000). Ces dangers sont pris-en-compte dans les plans de maîtrises sanitaires des entreprises. Les principaux dangers microbiologiques sont les *Vibrio* pathogènes (Copin *et al.*, 2015), les bactéries productrices d'histamine (Guillier *et al.*, 2011) et *Listeria monocytogenes* (Ricci *et al.*, 2018) pour les dangers bactériologiques. Pour les dangers parasitaires, les parasites de la famille des Anisakis (Bao *et al.*, 2017) sont des dangers importants de la filière.

Facteurs de risque au niveau de la production primaire

La prévalence des parasites peut être différente en fonction des zones de pêche. Par exemple, les maquereaux capturés dans les zones de pêche de l'Atlantique présentaient des niveaux d'infection par Anisakis spp. nettement plus élevés que les poissons méditerranéens (Levsen *et al.*, 2018).

De la même façon, la prévalence des espèces de Vibrio pathogènes est modifiée par l'origine des zones de pêche des produits de la mer (Copin *et al.*, 2015).

Importance des procédés de transformation

Les procédés de transformation jouent un rôle essentiel dans la maîtrise des risques microbiologiques. Seule une analyse croisée des procédés appliqués et des propriétés écologiques des pathogènes permet de déterminer le niveau de risque. A titre d'exemple, compte tenu de la prévalence et/ou de la possibilité de croissance de Listeria monocytogenes, les produits suivants ont été considérés à risque (Anses, 2013) : tarama, crustacés décortiqués vendus cuits et les poissons crus soumis à des manipulations (sushi, sashimi, carpaccio, ainsi que le tartare de poissons).

La congélation joue également un rôle essentiel. Les poissons destinés à être consommés crus devraient faire l'objet d'une congélation préalable afin de maîtriser les parasites potentiellement présents dans les filets.

Importance des pratiques des consommateurs

La maîtrise de la chaîne du froid et le respect des durées de vie jour un rôle prépondérant dans les produits à base de poisson (Anses, 2015b).

Contaminants chimiques

Il y a une très abondante production scientifique sur les contaminants dans le poisson (1 400 articles sous WoS avec comme mots clés du titre fish AND (contaminants OR PCB OR PCBs OR PCDD/Fs OR OCP OR mercury). Les données d'exposition européennes et les évaluations de risque qui en découlent montrent deux éléments principaux : d'un côté le mercure (principalement sous forme méthylée ou MeHg) véhiculé par les poissons prédateurs marins ou dulçaquicoles (haut de chaîne trophique et âgé), de l'autre les polluants organiques persistants, les plus étudiés étant comme pour les œufs de poule, les PCB et les PCDD/F.

D'intenses controverses ont eu lieu sur respectivement la contamination des poissons sauvages versus poisson d'élevage ou de l'origine géographique (cas du saumon *cf.* Hites *et al*. (2004) ; Lundebye *et al*. (2017)) ou sur l'intérêt d'augmenter la consommation de poisson, particulièrement en vue d'atteindre les recommandations nutritionnelles pour le DHA et l'EPA tout en évitant les contaminants précédemment cités (...).

Deux grands types de systèmes d'élevage peuvent être distingués, d'un côté un élevage basé sur l'utilisation d'une chaîne trophique aquatique, de l'autre un élevage pour lequel le milieu est artificialisé, l'eau permettant la respiration du poisson et l'évacuation de ses déchets métaboliques, l'alimentation étant strictement apportée par l'éleveur, sous forme d'aliment formulé. Cette opposition peut être figurée par une opposition entre une polyculture d'étang extensive et un élevage en bassin recirculé en bâtiment, considéré comme intensif. Il y a néanmoins un gradient entre ces deux extrêmes, les poissons d'étang peuvent recevoir un complément alimentaire (céréales brutes ou aliment composé), et l'élevage intensif peut avoir lieu dans des cages immergées en mer (daurades, bars, saumons) ou dans des bassins connectés à des cours d'eau (truites). Par apport à la question posée, la contamination de la chair des poissons n'a pas la même origine principale entre ces deux types de systèmes. Dans les élevages agroécologiques en milieu semi-naturel, c'est la contamination du milieu qui va influencer celle des poissons car leur niche trophique est une composante de l'écosystème étang. Dans les élevages où l'eau n'est qu'un support, c'est principalement l'aliment composé qui est le vecteur de contaminants. L'eau peut également être un vecteur mais les contaminants d'intérêt définis en début de chapitre sont principalement lipophiles, bioaccumulables et bioamplifiés. Ainsi la voie branchiale (faible solubilité dans l'eau) ou transdermale (les salmonidés en particulier sont plutôt élevés dans des eaux fraîches de tête de bassin peu chargées en matières en suspension) est insignifiante comparée à la voie trophique. L'aliment étant exogène, le milieu contribue peu, d'autant que pour les modes d'élevage intensif (principalement les salmonidés) et pour les modes extensifs. De même les volumes de consommation de poissons d'élevage extensif principalement issus de la polyculture d'étang sont minimes.

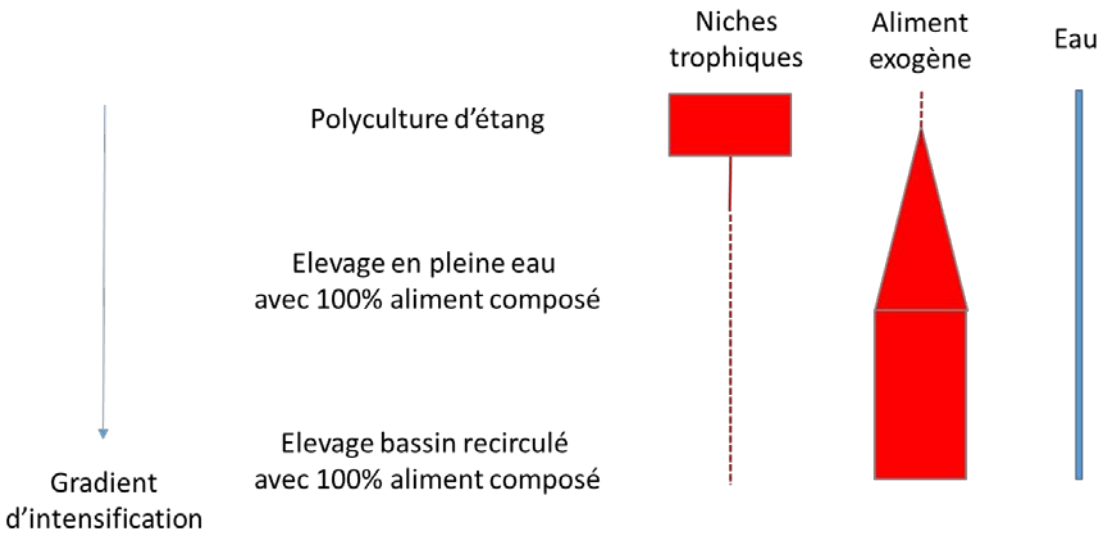


Schéma 2.6.1. Rôles des différentes composantes sur l'exposition potentielle aux contaminants des poissons en fonction du système d'élevage

Effet de la composition de l'aliment composé sur la contamination des poissons

Le tableau 2.6.3. montre la répercussion des matières premières utilisées dans l'élaboration de l'aliment pour poisson sur la contamination des filets chez le saumon Atlantique. Le scénario 1999 est basé sur la composition la plus fréquente à l'époque (Ytrestoyl *et al.*, 2015) soit abondance d'huile (24%) et de farine (65%) de poisson par rapport aux protéines végétales (10%). Le scénario 2013 est basé sur une substitution végétale telle qu'observée en 2013 avec des proportions en farine de poisson, huile de poisson, protéines végétales et huile végétale respectivement de 18, 11, 48 et 20%. Les 2 derniers scénarios sont basés sur une substitution drastique, les proportions devenant 8, 6, 58 et 24%. La différence entre ces 2 scénarios provient du fait que dans le dernier l'huile de poisson utilisée est décontaminée. Le premix qui peut également être contributeur à l'exposition est fixé à 1% dans le premier scénario et à 4% dans les 3 autres.

Tableau 2.6.3. Effet de la stratégie d'élaboration de l'aliment sur la contamination des filets de saumon (Berntssen *et al.*, 2016)

Scénario	1999	2013	Futur	Futur
Huile de poisson	++++	++	+	+ décontaminée
Farine de poisson	+++	++	+	+
PCDD/F TEQ	0,22	0,10	0,06	0,05
dl-PCB TEQ	0,55	0,25	0,15	0,07
Total TEQ	0,77	0,35	0,21	0,12

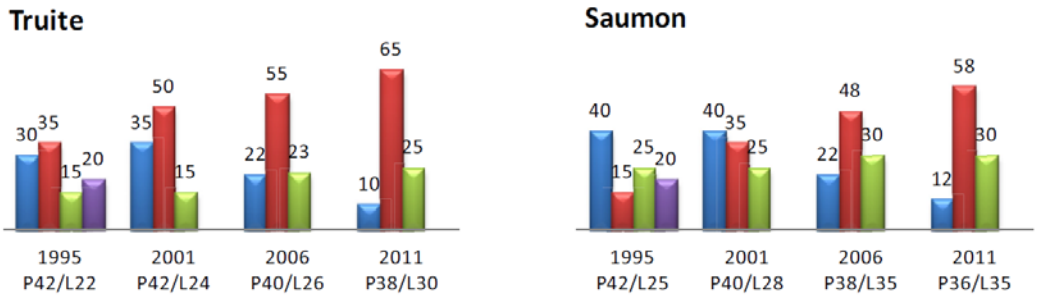
Tableau 2.6.4. Teneur en PCD-DL des ingrédients dans l'alimentation des saumons en ng.kg-1 PF en fonction du type et de la matrice d'origine (Berntssen *et al.*, 2016)

	poisson	végétal
Farine (ou tourteau)	0,3	0,003
Huile	2,6	0,08
Huile décontaminée	0,4	

Tableau 2.6.5. Contamination en PCDD/F et PCB de type dioxin-like des matières premières utilisées en alimentation animale (*Efsa (2010) en base TEQ_{1998}, ¤2012 en italique en base TEQ_{2005})

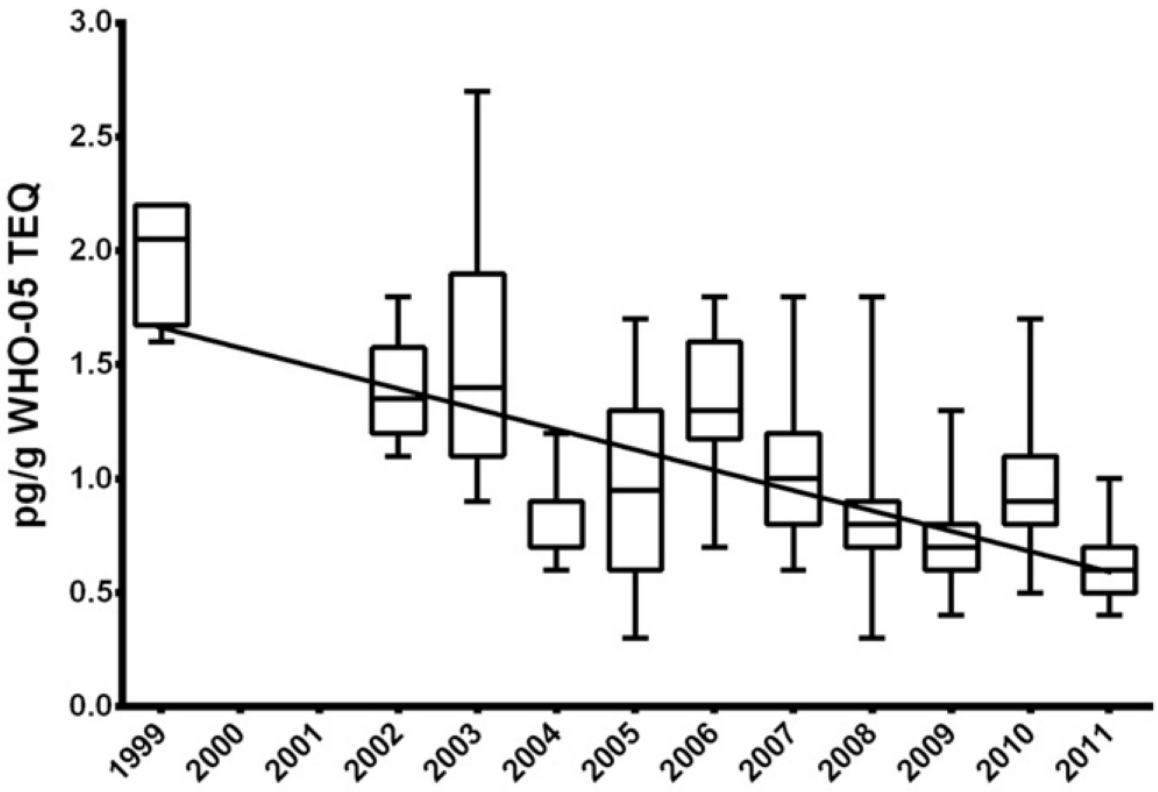
Terrestre	N	pg TEQ/g	**Aquatique**	N	pg TEQ/g	**Aliment formulé**	N	pg TEQ/g
Origine végétale hors huile	378 *966*	**0,12*** ***0,24¤***	Animaux aquatiques hors huile	128 *295*	**1,23** ***0,96***	Premix	91 *83*	**0,04** ***0,09***
Huiles végétales et leurs sous-produits	68 *34*	**0,10** ***0,60***	Huile de poisson	89 *192*	**9,89** ***8,55***	Aliments composés sauf groupe suivant	482	**0,33**
Origine minérale	114 *144*	**0,04** ***0,04***				Aliments pour animaux à fourrure, pets et poissons	143 *482*	**2,03** ***1,21***
Matière grasse d'origine animale	37 *29*	**0,44** ***0,55***						

Figure 2.6.1. Evolution de 1995 à 2011 des matières premières incorporées dans l'alimentation des truites et des saumons – en bleu farine de poisson, en rouge autres (végétal, premix..), en vert huile, en violet produit animaux terrestres ; les valeurs sous les années indiquent la proportion de protéines et de lipides dans la ration (d'après Burel et Médale (2014))



La crise de l'ESB, les critiques sur la pêche minotière et le règlement européen visant à réduire les teneurs en PCDD/F et PCB dans les poissons d'élevage ont entraîné une profonde modification de la composition à la fois des aliments et de la chair des poissons d'élevage. Cette modification repose principalement sur une substitution de produits animaux d'origine aquatique par des produits végétaux terrestres, potentiellement couplée à un traitement des huiles de poisson afin de réduire leur teneur en POP.

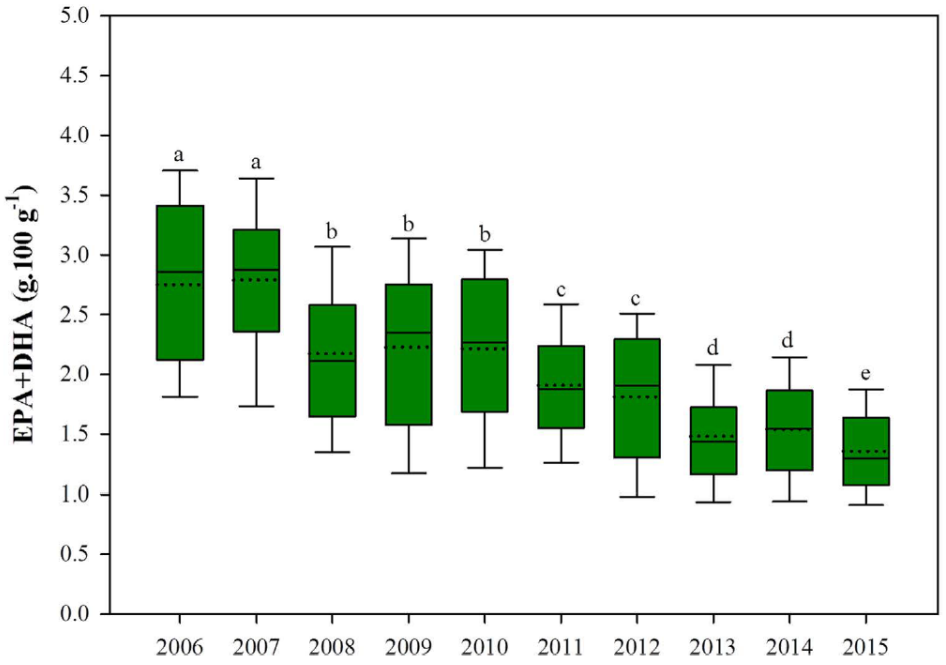
Figure 2.6.2. Réduction de la teneur en PCDD/F + DL-PCB entre 1999 et 2011 dans la chair de saumon norvégien (pg TEQ $OMS_{2005}.g^{-1}$) d'après Nostbakken *et al.* (2015)



Cette réduction est également observée pour les poissons commercialisés en Allemagne (Karl et Lahrssen-Wiederholt, 2013) entre 1997 et 2004 pour le saumon et la truite d'élevage. De la même façon en Italie, une réduction significative est observée chez la truite d'élevage (*Oncorhynchus mykiss*) entre 2005 et 2011 pour les 6 PCB-NDL (Perugini *et al.*, 2013). La teneur passe de 3,5 à moins de 2 $ng.g^{1}$ ($p<0,05$), diminution expliquée par une chute dans l'aliment qui passe de 11,1 à 4 $ng.g^{-1}$ ($p< 0,01$).

Ainsi la maîtrise de la contamination de l'aliment, basée sur une réduction de la part animale aquatique, a-t-elle historiquement permis de réduire la contamination de la chair des poissons gras d'élevage en POP. Néanmoins cette évolution a eu des conséquences négatives sur les teneurs en PUFA de la chair des saumons d'élevage (figure 2.6.3.). Deux alternatives sont actuellement proposées et partiellement mises en œuvre, la décontamination de l'huile de poisson principal vecteur des POP (Berntssen *et al.*, 2010 ; Friesen *et al.*, 2015; Lall, 2010 ; Sprague *et al.*, 2010) ou l'utilisation d'algues marines riches en PUFA (Sprague *et al.*, 2015). Le premier abaisse la teneur en polluants par un traitement (par exemple au charbon actif) tout en conservant les PUFA, la deuxième conserve une source marine riche en PUFA mais située en bas de la chaîne trophique donc pauvre en POP.

Figure 2.6.3. Réduction de la teneur en DHA et EPA dans le saumon écossais entre 2006 et 2015, en lien avec la réduction des sources marines dans leur alimentation, d'après Sprague *et al*. (2016)



Il faut souligner que cette substitution massive des matières premières animales vers des matières premières végétales est susceptible de faire émerger d'autres polluants comme les pesticides, les mycotoxines ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (Nacher-Mestre *et al.*, 2018). En effet les végétaux peuvent avoir été contaminés par des traitements post-récolte (chlorpiryphos-méthyl), des mycotoxines au champ ou lors du stockage (déoxynivalénol) et par des HAP souvent introduits lors de l'extraction à chaud des huiles végétales. Pour les deux premiers types, l'influence du système de production de la matière végétale brute pourra avoir une incidence (agriculture biologique versus conventionnelle), pour le troisième de type néoformé c'est l'étape de transformation qui sera critique.

Effet des cahiers des charges de démarche qualité via l'alimentation composée

Il a été montré que la composition de l'aliment jouait un rôle fondamental dans la contamination de la chair de poisson par les POP de type PCB (ou PCDD/F) avec une corrélation entre part d'origine aquatique et contamination. Or les cahiers de charges de type AB ou LR, imposent une teneur minimale de 30 à 50% en produits d'origine aquatique.

Les cahiers des charges (CDC) peuvent avoir une influence sur la contamination de la chair. Deux types de CDC seront discutés ici les démarches LR et AB. En ce qui concerne la contrainte alimentaire les 2 CDC ont en commun d'imposer une teneur minimale en produits dits d'origine aquatique dans l'alimentation des poissons de type carnivore. Dans le contexte AB (CDC concernant le mode de production et de préparation biologiques des espèces aquacoles et leurs dérivés, JORF du 13 février 2007 (République Française, 2007a), la motivation est le respect des niches trophiques d'origine selon la formule : « … de par la nature du milieu de vie des animaux concernés et du fait de la dominante carnivore du régime alimentaire spécifique de certaines familles d'espèces aquatiques (salmonidés, bar, daurade, crevettes…) majoritairement élevées et consommées, les fractions protéiniques et lipidiques de l'aliment doivent majoritairement être d'origine aquatique ». S'en suit la définition d'une part minimale d'ingrédients végétaux, fixée à 30% pour les poissons d'élevage, ingrédients végétaux issus de l'agriculture biologique. En résumé, plus de 50% d'aliments d'origine aquatique. Dans le CDC du saumon atlantique LR les éléments sont décrits plus précisément, notamment en fonction du stade d'élevage.

Tableau 2.6.6. Composition relative de l'aliment formulé distribué aux saumons LR en fonction du stade d'élevage - Taux d'incorporation (%) minimal et maximal autorisé (source : * CDC LR N°LA31/05 « Saumon Atlantique » (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016)et¤Annexe III du CDC LR N°LA 33/90 « Saumon » JORF du 12 avril 2018 (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018b)

Stade d'élevage	Eau douce * (fry ¤)	Eau de mer initial * (smolts ¤)	Eau de mer final * (en cours de croissance ¤)
Produits d'origine marine*	20 - 100	15 - 100	50 - 100
Farine de poissons ¤	30-70	30-70	30-70
Huile de poisson ¤	0-20	10-30	10-30
Protéines de poisson concentré ¤	0-20	0-15	0-10
Farine de crustacés ¤	0-15	0-15	0-15
Total origine marine ¤	30-100	40-100	40-100

La description plus précise de ces aliments d'origine marine apparaît dans ce CDC, sur la base par exemple de la liste positive sont cités : farine et huile de poisson, farine de crustacé et hydrolysat de poisson. Le terme poisson exclut les salmonidés pour des raisons sanitaires. La part des végétaux est détaillée par stade et par type (tourteaux/graine/céréales/oléagineux). Le stade final est défini comme étant la période 800°C.j minimum avant la mise à jeun qui précède l'abattage. Les motivations sont cette fois plus liées à la qualité finale du produit, teneurs en DHA et EPA (qui doivent représenter plus de 15% des lipides alimentaires totaux afin de garantir une teneur élevée dans le filet) et en pigments d'origine naturelle.

Ainsi les deux cahiers des charges convergent vers une alimentation majoritairement d'origine marine. A comparer au pourcentage observé en 2013 chez le saumon conventionnel : 28% (Berntssen *et al.*, 2016) ou au pourcentage dans un scénario post-2020 (14%). Ceci signifie qu'il est plus difficile de réduire la contamination de l'aliment composé dans ces filières, ce qui pourrait entraîner des teneurs en POP ou en MeHg supérieures dans la chair à celles obtenues pour des saumons conventionnels recevant une alimentation très végé-substituée. Cela peut être compensé par une sélection drastique de l'origine géographique des farines et des huiles de poisson et éventuellement par un traitement des huiles.

Il n'est malheureusement pas possible par le biais de publications référencées dans le WoS d'avoir accès à des données de contamination des salmonidés issus des CDC AB ou LR, et de les comparer aux autres systèmes de production. Les seules informations disponibles au niveau EFSA sont récapitulées dans le tableau 2.6.7, avec un faible effectif pour la production biologique (n=18). Deux éléments ressortent, la plus faible contamination des saumons et truites d'élevage (0,43) versus les captures sauvages (3,9), et un taux moyen ou médian en production biologique (1,05 – 1,18) supérieur à celui de la production non organique (0,41 – 0,26) ou moyenne (0,43 – 0,31). Ceci a tendance à corroborer l'impact de l'inclusion élevée de matières premières d'origine animale aquatique dans le CDC AB.

Tableau 2.6.7. Synthèse des données EFSA sur la contamination par les PCDD/F et les PCB-DL du saumon en fonction du mode d'approvisionnement (Efsa, 2012), exprimée en pg TEQ par g de poids frais

	n	moyenne	médiane	P95
Organic production	18	1,05	1,18	-
Non organic production	66	0,46	0,31	0,98
Farmed domestic or cultivated	168	0,48	0,38	0,94
Wild or gathered or hunted	83	3,98	3,85	8,82

Tableau 2.6.8. Contamination des poissons en PCB-NDL (ng.g^{-1} lipides) suivant leur origine (Efsa, 2012), anguilles exclues

Origine	N	Moyenne	P50	P95
Saumon, truite sauvages	704	16.8	2.9	67
Saumon, truite d'élevage	525	3.6	0.0	15.2
Autres poissons marins sauvages	1993	18.8	2.2	99.1
Autres poissons marins d'élevage	96	7.9	6.7	21.3
Poissons d'eau douce sauvages	482	17.8	3.6	85.4

Effet des cahiers des charges de démarche qualité LR ou AB via des exigences de qualité du milieu d'élevage

Une différence apparaît dans la définition de la qualité du milieu de vie telle qu'elle est définie dans le CDC AB. En effet dans les annexes 4, 5 des prérequis qualitatifs sont définis pour le site d'élevage des salmonidés d'eau douce ou d'eau de mer. En eau douce (truites fario ou arc en ciel, ombles commun, chevalier ou d'Amérique et huchon) pour le grossissement, il est précisé que la prise d'eau en rivière doit se faire sur un cours d'eau classé BLEU au Système d'évaluation de la qualité de l'eau pour les eaux courantes (SEQ EAU – cours d'eau – usage aquaculture) ou à défaut sur des cours d'eau classés 1A (cours d'eau de très bonne qualité). Il est également spécifié qu'en l'absence de classement l'opérateur doit procéder à des analyses d'eau non filtrée dont les caractéristiques doivent être conformes à la classification BLEU du SEQ EAU – cours d'eau (spécifications pour Hg, Pb, Cu, Zn et cyanures). Pour les polluants organiques, une analyse des pratiques agricoles à risque sur le bassin versant doit être menée en ce qui concerne les pesticides autorisés (les principales familles sont listées). Il est également mentionné que toujours en absence de classement l'organisme certificateur doit faire procéder avant la récolte à des analyses dans les muscles dorsaux pour les composés cités dans le règlement CE n°1881/2006 (Commission européenne, 2006) (Cd, Hg, Pb, B[a]P, PCB et PCDD/F). En milieu littoral pour le saumon, les truites fario ou arc-en-ciel, la référence qualitative retenue est celle du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin et les logiques sont identiques à la partie dulcicole précédente en absence de classement (la différence est que le contrôle se fait sur les coquillages de référence et non sur l'eau). Ainsi le CDC AB anticipe l'effet potentiel de la contamination du milieu sur la qualité sanitaire chimique du filet. Sans s'intéresser au milieu de vie le CDC LR 31-05 impose une recherche des PCB et PCDD/F dans la chair en auto-contrôle.

Il n'y a pas de données permettant d'estimer l'impact de ces contraintes sur la contamination de la chair des poissons.

Cas des additifs (astaxanthine et ethoxyquine)

Même si le terme contamination n'est pas adéquat, il est nécessaire d'aborder la question des additifs. En effet dans les aliments pour poisson l'utilisation d'antioxydants est essentielle pour stabiliser la matière première pendant le transport ou dans l'aliment formulé. Le cas de l'éthoxyquine mérite d'être signalé. En effet en 2015 lors de la réévaluation du dossier (règlement CE 1831/2003 (Commission européenne, 2003)), l'EFSA a constaté un manque flagrant de données quant à l'innocuité de l'éthoxyquine (Efsa Panel on Additives Products or Substances used in Animal Feed, 2015). Son utilisation en guise d'additif alimentaire (E324) a été officiellement suspendue par la Commission européenne le 7 juin 2017 (Règlement (UE) 2017/962 (Union Européenne, 2017)). C'est notamment la p-phénétidine, impureté dont la mutagénicité est suspectée, qui est une des causes principales de cette prise de position (la toxicité d'un de ses métabolites : ethoxyquin quinone imine doit également être approfondie). Les professionnels des aliments aquacoles (dans la cadre de l'International Fishmeal and Fish Oil) travaillent actuellement sur le sujet (Merel *et al.*, 2019), la protection des acides gras polyinsaturés étant cruciale pour le maintien des qualités nutritionnelles du poisson d'élevage. Le dossier sera réévalué par l'EFSA en décembre 2020.

Pour l'astaxanthine, la différence entre les CDC est basée sur son origine, naturelle ou de synthèse, sans que cela puisse être reliée à un enjeu sanitaire. Un rapport de l'Efsa (Efsa Panel on Additives Products or Substances used in Animal Feed, 2014) a conclu à l'absence de risque lors de l'utilisation d'astaxanthine de synthèse jusqu'à un seuil d'incorporation de 100 mg par kg d'aliment composé.

2.6.2.3. Propriétés organoleptiques

Description des caractéristiques organoleptiques et déterminisme

Cette partie sera fortement centrée sur les salmonidés, mais nous essaierons, quand les données sont disponibles, de traiter les espèces aquacoles marines (bar, dorade, turbot, sole, maigre, …) et les espèces d'eau douce d'élevage souvent plus extensif (carpe, perche, tanche, …).

Perception sensorielle globale

Les propriétés sensorielles de la chair des poissons sont très différentes de celles des viandes. La qualité sensorielle de la chair de poisson fraîche est difficile à évaluer de par une odeur et une flaveur subtiles, une texture plutôt molle et une jutosité limitée par rapport à la viande (Fauconneau *et al.*, 1996). Toutes ces propriétés diffèrent très fortement d'une espèce à l'autre et entre poissons d'eau douce et poissons marins (Alexi *et al.*, 2018).

Un déterminant majeur des propriétés sensorielles est la fraicheur des produits. En effet le temps de stockage affecte négativement l'ensemble des propriétés sensorielles des produits jusqu'à un rejet par le consommateur, qui survient généralement au bout de 2 à 3 semaines de conservation (Rodriguez *et al.*, 2016). Les facteurs de variation de la durée de conservation seront traités plus loin dans ce chapitre.

La perception sensorielle globale de la chair de poisson est analysée par un jury d'analyse sensorielle, avec des critères adaptés à chaque espèce évaluée, mais aussi à l'objectif de l'analyse (description du produit, évalutaion de la durée de vie du produit, …). Cette perception regroupe trois composantes que sont l'aspect ou la couleur du produit, la flaveur, et la texture.

Aspect / Couleur des filets

La perception visuelle de l'aspect et de la couleur des filets ou darnes est la première appréciation de qualité perçue. La couleur attendue des filets de poisson est fortement dépendante de l'espèce. Chez les salmonidés, une chair pigmentée rose-orangée est généralement attendue, tandis que la chair est plutôt blanc laiteux pour les espèces non pigmentées.

Pigmentation et aspect des filets de salmonidés

La couleur rose-orangée de la chair des salmonidés est due à la présence de pigments caroténoïdes (le plus souvent de l'astaxanthine), apportés par l'alimentation. Son déterminisme nutritionnel chez l'animal en croissance, par la nature et la quantité du pigment fourni, et la quantité de pigment fixée par le muscle, est connu de longue date (Choubert, 1992). Plus récemment, un déterminisme génétique a été mis en évidence, et permet d'expliquer, dans un lot nourri avec le même aliment, la variabilité individuelle de pigmentation. La pigmentation de la chair varie, en fonction de la nature du pigment présent dans l'aliment, de sa quantité fixée dans le muscle, et du statut physiologique de l'animal (croissance, reproduction). Elle dépend également de l'organisation (structure) musculaire, en particulier de la taille des fibres musculaire (Johnston *et al.*, 2000). La couleur peut être évaluée visuellement avec des échelles de références adaptées à chaque produit/espèce ou avec un colorimètre.

L'aspect des filets de salmonidés pigmentés correspond également à l'organisation même de la musculature des poissons. En effet, le muscle des poissons a une organisation métamérique, où alternent des feuillets musculaires (myomères) et des feuillets de tissu conjonctifs (myosepte). Seuls les feuillets musculaires sont pigmentés, et on observe donc, sur les filets comme sur les darnes, des stries blanches, dont l'épaisseur dépend de l'infiltration du tissu conjonctif par du tissu adipeux. L'épaisseur de ces stries blanches varie donc en fonction de leur position anatomique, qui correspond à des parties plus ou moins grasses du filet, et en fonction du niveau d'engraissement musculaire de l'animal. L'importance et la répartition de ces stries blanches dans la darne peuvent être évaluées par vision numérique à partie de photos macroscopiques. Des adipocytes sont également présents entre les faisceaux musculaires et participent au « persillage » de la chair. Bien que ce critère ne soit pas évalué directement, on sait que la luminance de la chair est corrélée avec la teneur en lipides et la surface des myoseptes (Marty-Mahe *et al.*, 2004).

Espèces à chair non pigmentée

Chez les espèces à chair non pigmentée, communément appelées « poissons blancs », la couleur dépend de l'espèce, de la présence possible de pigments dans l'aliment, même s'ils ne sont pas fixés spécifiquement dans le muscle, de la teneur en lipides musculaires et de la structure musculaire (quantité de tissu conjonctif, taille des fibres musculaires). Chez ces espèces, la présence visuelle de sang est particulièrement importante, et peut être détectée par des méthodes novatrices en cours de développement (Misimi *et al.*, 2017; Skjelvareid *et al.*, 2017a).

Défauts de couleur et d'aspect

Les défauts de couleur observés peuvent être des dépigmentations globales ou partielle des filets, une couleur non homogène, ou la présence de « points de sang » (blood spot) souvent liés à un défaut de saignée. Le « gaping », qui correspond à un détachement des feuillets musculaires, et donc à l'apparition de trous dans le filet, est un défaut majeur d'aspect, mais aussi de texture, particulièrement impactant chez certaines espèces dont les salmonidés. Ses causes sont mal connues et son déterminisme probablement multifactoriel (biologique et technologique). L'implication de le nature et des propriétés de composés matriciels (Tingbo *et al.*, 2005) et du tissu conjonctif (Bjornevik *et al.*, 2004 ; Espe *et al.*, 2004) a été démontrée, ainsi qu'une corrélation avec la taille des fibres musculaires (Bjornevik *et al.*, 2004 ; Johnston *et al.*, 2000) ou la teneur en cuivre (cofacteur d'une enzyme de biosynthèse des composés matriciels) (Morkore et Austreng, 2004). Le gaping peut être évalué visuellement sur une échelle allant de plus souvent de 0 (pas de « gaping ») à 5 (filet totalement déstructuré) (Morkore et Austreng, 2004).

Flaveur

La flaveur, qui regroupe la perception de saveur et d'odeur, est une propriété importante chez les poissons même si la flaveur des poissons frais est relativement neutre. Les composés déterminants de la saveur sont les acides aminés libres, les peptides, les acides organiques, les bases quaternaires ammoniaquées et les minéraux (Haard, 1992). Pour ce qui est de l'odeur, les composés d'arômes volatiles sont dérivés de l'oxydation des acides gras polyinsaturés qui seraient ainsi à l'origine des flaveurs spécifiques des poissons (Haard, 1992). La flaveur des poissons est très dépendante de l'espèce, les poissons d'eau douce et d'eau de mer ont des composés volatils différents (Haard, 1992) et certaines espèces, dont les salmonidés, ont une flaveur caractéristique qui est recherchée par le consommateur. La flaveur dépend très fortement de la fraicheur du produit et de la qualité d'eau d'élevage du poisson. Par exemple, en eau douce, un défaut majeur de flaveur, nommé « off-flavor », correspondant à un gout de terre ou de vase, est lié à la présence dans l'eau de composés (géosmine et isobornéol) synthétisés par micro-organismes (cyanobactéries et actinomycètes) présents dans l'eau d'élevage (Robin *et al.*, 2006).

Le meilleur moyen d'évaluer la flaveur est l'évaluation sensorielle par un jury entrainé. Les principaux facteurs de variation de la flaveur sont ceux qui impacte les déterminant décrits, à savoir principalement la nature de l'aliment et la qualité d'eau d'élevage.

Texture

La texture est une perception complexe qui recouvre l'ensemble des propriétés mécaniques, géométriques et de surface d'un produit perceptibles par les mécano-récepteurs, les récepteurs tactiles et éventuellement par les récepteurs visuels et auditifs (ISO 5492). Les propriétés mécaniques sont celles liées à la réaction du produit à une contrainte. Elles sont divisées en cinq caractéristiques : fermeté, cohésion, viscosité, élasticité et adhérence, Les propriétés géométriques sont celles liées aux dimensions, à la forme et à l'arrangement des particules dans un produit (par exemple granuleux, fibreux). Les propriétés de surface sont celles liées aux sensations telles que celles produites par l'eau et/ou les matières grasses. Dans la cavité buccale, cela correspond aussi à la façon dont ces constituants sont libérés (par exemple humidité, exsudation, gras).

Dans le cas des poissons, leurs caractéristiques biologiques et leur environnement expliquent les différences de texture mesurées. Les propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la quantité et des propriétés des protéines de structure. Ainsi, la teneur en collagène (principal constituant du tissu conjonctif) peut être corrélée à la résistance mécanique (Hatae *et al.*, 1986) mais au-delà de la quantité, ses propriétés (degré de réticulation) conditionnent la résistance mécanique des filets de saumon (Li *et al.*, 2005). Néanmoins, du fait de la faible teneur en collagène de la chair de poisson et de sa faible stabilité thermique, on peut penser qu'une part importante du déterminisme de la fermeté revient aux protéines contractiles. De plus la structure musculaire, et en particulier la taille des fibres musculaires déterminent fortement les propriétés géométriques. Une originalité de la croissance musculaire des poissons est de conserver tardivement une croissance hyperplasique, c'est-à-dire de recruter de nouvelles petites fibres musculaires ce qui donne, à l'échelle microscopique, un aspect mosaïque au muscle. Ainsi, une relation entre taille des fibres musculaire et résistance mécanique est fréquemment rapportée chez différentes espèces et types de produits (Bugeon *et al.*, 2003 ; Johnston *et al.*, 2000 ; Lefevre *et al.*, 2015). Cette relation entre taille des fibres et texture du produit n'est néanmoins pas systématiquement observée (Sigurgisladottir *et al.*, 2000), et peut dépendre des modalités de mesures de la texture. Les propriétés de surface quant à elles sont très liées à la composition de la chair, et en particulier à sa teneur en lipides. La chair des poissons les plus gras est perçue comme plus humide et plus juteuse, mais également souvent, mais pas systématiquement, moins ferme (Green-Petersen et Hyldig, 2010 ; Lefevre *et al.*, 2015; Robb *et al.*, 2002). La texture de la chair de poisson peut donc dépendre de tous les facteurs susceptibles d'affecter la composition (protéines et lipides) et l'organisation musculaire (taille des fibres, trame conjonctive) à savoir, l'origine génétique, le stade physiologique, le rationnement, la nature de l'aliment, les conditions d'élevage et d'abattage, … Une variation de texture est également observée à l'intérieur même d'un filet où l'on mesure un gradient antéropostérieur croissant de fermeté, en lien avec une proportion croissante de muscle rouge et de tissu conjonctif, et une plus grande résistance de la partie dorsale du filet comparée à la partie ventrale, en raison vraisemblablement de la plus forte présence de tissu adipeux dans la musculature ventrale qui entoure la cavité abdominale. On peut noter, comme pour la flaveur, une évolution rapide, *en post-mortem*, de la texture, en lien avec la dégradation enzymatique des protéines musculaires (Cheng *et al.*, 2014).

Quelques défauts majeurs de texture peuvent être observés chez les salmonidés, dont le « gaping » décrit précédemment. Un autre défaut est le phénomène de « chair molle » qui est une déstructuration des fibres musculaires, qui est associé, chez le saumon Atlantique à une accumulation de glycogène dans les fibres musculaires, des mitochondries anormales, un détachement des cellules musculaires et une altération des protéines de la matrice extracellulaire (Torgersen *et al.*, 2014) et à des niveaux plus élevés d'activation des différents systèmes protéolytiques (Martinez *et al.*, 2011).

Pour évaluer la texture dans toutes ses dimensions l'analyse sensorielle par un jury entrainé est le meilleur outil, mais des mesures de résistance mécanique, avec des outils adaptés, permettent de mesurer très précisément des variations de fermeté en particulier.

Présence d'arêtes / Désarrêtage

Une caractéristique de la chair de poissons, souvent énoncée comme une limite à sa consommation, est la présence d'arêtes. Etonnamment, il n'y a pas de données disponibles sur une possible variabilité de cette propriété. Le nombre d'arêtes (épiphyse dorsale) est caractéristique de l'espèce de poisson considérée, mais on peut imaginer une variabilité biologique des caractéristiques mécaniques ou de thermo-sensibilité de ces arêtes. Pour contrer ce défaut, les filets peuvent être désarêtés manuellement ou mécaniquement, ce qui n'est pas sans conséquence sur l'intégrité et la texture des filets. Des travaux récents sur la truite et le saumon montrent que l'attachement des arêtes, et donc la difficulté à les extraire, dépend de leur position anatomique (antéro-postérieure), de la présence de « gaping » dans le filet, et que cet attachement est réduit après un traitement à la collagénase (Schroeder *et al.*, 2018). Des technologies pour réduire l'attachement des arrêtes et faciliter leur extraction sont testées, telle que l'utilisation de « HIFU » (High Intensity Focused Ultrasound) chez la morue et le saumon, avec une efficacité limitée et une dénaturation des filets due à l'échauffement (Skjelvareid *et al.*, 2017b).

Variation des caractéristiques organoleptiques

Impact de la génétique

L'origine génétique des animaux ou la **sélection** impactent les propriétés sensorielles, en particulier la couleur et la texture des filets. Par contre, le « marbling » et le gaping sont peu héritables (Garber *et al.*, 2019). Le caractère héritable de l'aptitude à la pigmentation des filets des salmonidés a été démontré chez le saumon Atlantique (Garber *et al.*, 2019; Powell *et al.*, 2008), comme chez la truite arc-en-ciel (Kause *et al.*, 2008). Plus récemment, l'héritabilité de la résistance mécanique des filets a également été démontrée chez la truite (Dupont-Nivet *et al.*, 2012). En conséquence, ces propriétés sensorielles peuvent rentrer dans les schémas de sélection génétique pour améliorer la qualité des produits. Néanmoins, pour le moment, aucune étude ne rapporte les éventuels effets d'une telle sélection génétique. Les mécanismes biologiques qui sous-tendent ces déterminismes restent à explorer, même si quelques travaux récents rapportent l'identification de SNPs (Single Nucleotide Polymorphism) associés à des traits de qualités organoleptiques tels que la "blancheur" ou la résistance mécanique des filets chez la truite (Al-Tobasei *et al.*, 2017). De même, des travaux de séquençage de micro-ARN ont révélé un polymorphisme de ces éléments régulateurs associé à des traits de qualité tels que la croissance, les rendements filets, la teneur en lipides, la résistance mécanique et la blancheur des filets (Paneru *et al.*, 2017).

Les programmes de **sélection génétique** actuels portent sur les performances de croissance, l'adiposité et les rendements de découpe, ce qui pose la question d'un éventuel lien entre ces paramètres et les propriétés sensorielles des produits. Un lien génétique entre croissance et couleur des filets est démontré par certains travaux (Powell *et al.*, 2008), mais d'autres études ne rapportent pas de corrélation génétique (Garber *et al.*, 2019). Pour ce qui est de la résistance mécanique, une corrélation phénotypique négative entre vitesse de croissance et fermeté est parfois rapportée (Folkestad *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2007), mais elle n'est pas systématique (Johnston *et al.*, 2007). Par contre, le nombre de fibres musculaires et la densité de fibres sont des paramètres héritables (Vicira *et al.*, 2007), et ces paramètres contribuent au déterminisme de la résistance mécanique. Il n'a pas été montré de lien entre vitesse de croissance et défaut de texture tels que le « gaping » ou la « chair molle » (Johnston *et al.*, 2007). Pour ce qui est de l'adiposité, une sélection divergente sur la teneur en lipides musculaires chez la truite a montré avoir un effet sur la couleur et la résistance mécanique des filets, mais impacte également la taille de fibres musculaires (Lefevre *et al.*, 2015). Une forte corrélation génétique entre nombre de fibres et adiposité a été rapportée chez le saumon (Vicira *et al.*, 2007).

En conséquence de l'existence d'un déterminisme génétique de la couleur et de la texture des filets**, la comparaison de différentes familles ou souches de poissons** rapporte le plus souvent des différences de qualités sensorielles (Bahuaud *et al.*, 2010 ; Choubert *et al.*, 1997 ; Martelli *et al.*, 2014).

Quelques études sur des **poissons marins** rapportent également une héritabilité de la teneur en lipides musculaires et de la fermeté chez la dorade, paramètres qui sont corrélés génétiquement avec le poids des poissons (Garcia-Celdran *et al.*, 2015).

Impact de la triploïdie

Chez les salmonidés, la production de poissons monosexes femelles **triploïdes** permet de s'affranchir des effets négatifs de la maturation sexuelle sur la qualité des produits, mais, avant même la maturation sexuelle des poissons, la triploïdie n'est pas sans conséquence sur les propriétés sensorielles des produits. La couleur des filets est généralement affectée avec une luminosité plus élevée (Werner *et al.*, 2008) et des filets plus colorés chez les poissons triploïdes (Lefevre *et al.*, 2015; Poontawee *et al.*, 2007), mais cet effet n'est pas toujours observé et peut dépendre du stade des poissons mesurés (Bjornevik *et al.*, 2004 ; Lerfall *et al.*, 2017). La résistance mécanique des filets de poissons triploïdes est moins élevée que celle des poissons diploïdes, ce qui peut être relié à des fibres musculaires plus grosses chez ces poissons triploïdes (Bjornevik *et al.*, 2004 ; Lefevre *et al.*, 2015; Poontawee *et al.*, 2007). Cette différence de fermeté est toutefois limitée et peut ne pas être perçue en analyse sensorielle (Lefevre *et al.*, 2015). Une étude rapporte également une moindre capacité de rétention d'eau des truites triploïdes, comparées aux diploïdes (Werner *et al.*, 2008). L'effet de la triploïdie sur la fermeté n'est pas rapporté chez le turbot, bien que les poissons triploïdes aient des fibres musculaires plus grosses (Hernandez-Urcera *et al.*, 2017), ce qui suggère un déterminisme de la texture différent chez cette espèce de poisson plat. En analyse sensorielle, des truites portion (≈300 g) triploïdes ont une intensité globale d'odeur plus faible, plus d'exsudation et une perception d'humidité plus élevée que les truites diploïdes (Lefevre *et al.*, 2015). Enfin une étude sur le saumon Atlantique rapporte une plus forte incidence du « gaping » chez les poissons triploïdes, comparés aux diploïdes (Bjornevik *et al.*, 2004).

Effet de l'âge, du sexe et de la maturation sexuelle

Les poissons ont la particularité de pouvoir être commercialisés à des **âges/stades** différents qui peuvent correspondre à des poissons sexuellement matures ou non. Chez les salmonidés, l'âge des poissons affecte la couleur et la texture des filets, les poissons plus gros ayant une couleur plus prononcée et une moindre fermeté (Crouse *et al.*, 2018 ; Werner *et al.*, 2008), ce qui peut être mis en relation avec une plus forte teneur en lipides et des fibres musculaires plus grosses chez les poissons les plus gros. Les poissons les plus âgés ont également une moindre capacité de rétention d'eau (Werner *et al.*, 2008). En analyse sensorielle, l'intensité de l'odeur augmente,

tandis que la jutosité diminue avec l'âge, chez la truite (Johansson *et al.*, 2000). Chez la dorade, la taille des poissons n'affecte pas les propriétés organoleptiques (Hurtado-Rodriguez *et al.*, 2010).

Chez les salmonidés, avant la maturation sexuelle, le **sexe** des poissons impactent peu les propriétés organoleptiques (Bahuaud *et al.*, 2010; Choubert *et al.*, 1997). Néanmoins quelques études rapportent une teinte et une résistance mécanique des filets plus élevées chez les femelles (Choubert *et al.*, 1997 ; Manor *et al.*, 2015). Une perception d' « odeur fraiche » plus intense chez la femelle que chez le male a été rapportée chez le saumon (Morkore *et al.*, 2010).

La **maturation sexuelle** impacte fortement la qualité sensorielle des produits. Les pigments musculaires sont mobilisés et se concentrent dans les ovaires pour la femelle et la peau chez le male ce qui provoque une décoloration importante du muscle (Janhunen *et al.*, 2019). La résistance mécanique des filets crus augmente (Davidson *et al.*, 2014b), ce qui peut être mis en relation avec une plus forte teneur en collagène insoluble (Aussanasuwannakul *et al.*, 2011), et ce malgré une augmentation de l'activité protéolytique dans le muscle au cours de la maturation (Cleveland *et al.*, 2012). En analyse sensorielle, la flaveur est moins prononcée et la texture est plus « aqueuse » et plus dure (Aksnes *et al.*, 1986).

Effets du jeûne et du rationnement

Les poissons, de par leur cycle biologique naturel, peuvent supporter de longues périodes de **jeûne**. Une jeûne long de plusieurs semaines affecte la croissance et les réserves corporelles, en particulier le glycogène musculaire et l'adiposité ce qui impacte les propriétés organoleptiques (Rasmussen, 2001). Le jeûne augmente le pH et la fermeté des filets crus, modifie la flaveur, mais a un impact limité sur la couleur des filets (Bugeon *et al.*, 2004; Einen *et al.*, 1998 ; Gomez-Guillen *et al.*, 2000 ; Rasmussen, 2001). Après une période de jeûne, la **réalimentation** des poissons induit une croissance compensatrice qui restaure les propriétés des produits (Bugeon *et al.*, 2004). Une période de jeune plus courte, de l'ordre de quelques jours est systématiquement appliquée avant l'abattage des poissons pour vider le tube digestif et limiter ainsi les risques sanitaires. Cette pratique impacte peu les propriétés organoleptiques des produits (Lopez-Luna *et al.*, 2014).

La réduction du **taux de rationnement** des poissons est une pratique courante en élevage qui peut être faite en réduisant la taille de la ration ou la fréquence d'alimentation. La diminution de la ration va limiter leur croissance et impacte les qualités organoleptiques. Comme le jeûne, mais dans une moindre mesure, la baisse du taux de rationnement impacte la flaveur et la texture des filets (Einen *et al.*, 1999 ; Johansson *et al.*, 2000 ; Johnsen *et al.*, 2013), mais peu la couleur (Sun *et al.*, 2015; Young *et al.*, 2005a). Le taux de rationnement a également un impact sur le gaping (Johnsen *et al.*, 2013) dont l'occurrence augmente avec le taux de rationnement (Einen *et al.*, 1999).

Impact de l'aliment

La **composition de l'aliment** en termes de macro-nutriments (protéines, lipides, glucides) a un impact majeur sur la croissance et l'adiposité des poissons, et va donc affecter les propriétés sensorielles des produits. Des aliments plus gras ou plus énergétiques conduisent à des animaux plus gras, ce qui affecte la couleur, la flaveur et la texture des filets (Suarez *et al.*, 2014). Des filets plus gras peuvent ainsi être plus lumineux, plus colorés (Choubert et Baccaunaud, 2006 ; Jensen *et al.*, 1998; Nickell et Bromage, 1998), moins fermes et avoir une flaveur plus prononcée (Chaiyapechara *et al.*, 2003; Einen et Skrede, 1998). Ces effets sont néanmoins limités et peuvent n'être perçus qu'avec des analyses instrumentales ou ne pas être mesurées (Johnsen *et al.*, 2011; Young *et al.*, 2005a). La teneur en protéines de l'aliment n'a par ailleurs pas montré d'impact sur les qualités sensorielles chez le saumon (Johnston *et al.*, 2002).

La couleur rose – orangée des filets de salmonidés d'élevage est conditionnée par l'ajout de **pigments caroténoïdes** dans l'aliment. La quantité de pigment dans l'aliment, dont dépend, jusqu'à un certain seuil, la quantité de pigments déposée dans le filet, est le facteur déterminant de l'intensité de la coloration (Choubert, 1992 ; Jensen *et al.*, 1998). Le principal pigment utilisé comme additif alimentaire pour la pigmentation est l'astaxanthine. Cette molécule peut être de synthèse ou purifiée à partie de levures ou d'algues capables de la synthétiser (Lim *et al.*, 2018). La majorité des études sur la pigmentation des salmonidés utilisent de l'astaxanthine de synthèse. Néanmoins, quelques études récentes rapportent l'effet de différentes sources d'astaxanthine sur la pigmentation des filets de salmonidés. Ainsi, dans le cadre d'un remplacement de la farine de poissons par de la farine de krill, pour une même quantité d'astaxanthine dans l'aliment, la fourniture d'astaxanthine naturelle par la farine de krill conduit à une moindre teneur en astaxanthine dans le muscle de truite et à une coloration moins intense des filets (Roncarati *et al.*, 2011). Des essais de pigmentation par d'autres sources de pigments sont également rapportés. L'ajout d'algues rouges (*Palmaria palmata*) dans l'alimentation de saumon n'a pas démontré son efficacité pour pigmenter les filets (Moroney *et al.*, 2015), mais l'ajout de piment, riches en pigments caroténoïdes, a induit un dépôt de pigment dans le muscle de truite arc-en-ciel, et une coloration supérieure (Yanar *et al.*, 2016).

Une des grandes problématiques actuelles de l'élevage piscicole est de **remplacer**, dans les aliments des poissons, **les farines et huiles d'origine marine** par de nouvelles sources de nutriments. Ce remplacement s'est d'abord tourné vers des matières premières végétales, et plus récemment vers de nouveaux ingrédients alimentaires tels que les algues, les levures ou des insectes. De très

nombreuses études rapportent les effets de ces substitutions, partielles ou totales, des huiles et/ou des farines de poissons sur les propriétés organoleptiques des produits. Globalement les propriétés sensorielles des produits sont peu affectées par ces substitutions, le plus souvent partielles. Un effet peut néanmoins être mesuré quand la substitution affecte l'adiposité des filets ou quand le taux de substitution est important. Dans ce dernier cas, la flaveur est généralement modifiée avec une moindre perception des flaveurs de poisson. Ces modifications de flaveur peuvent être liées à une différence de teneur en lipides ou à la modification de la composition en acides gras (Rasmussen, 2001).

Au-delà de la nécessité de substitution des matières premières, des **additifs alimentaires** sont utilisés tels que des antioxydants qui permettent une meilleure conservation des poissons particulièrement riches en acides gras polyinsaturés. Ces additifs peuvent affecter les propriétés sensorielles mais leur effet est le plus souvent limité.

Effets de la saison

Les poissons sont des animaux poïkilothermes, ils ne régulent pas leur température corporelle, et sont donc pleinement dépendants de la température de leur milieu de vie aquatique. Chaque espèce a un préférendum thermique avec une tolérance thermique, plus ou moins grande, autour de ce préférendum.

La **saison** impacte donc les propriétés organoleptiques des poissons car elle détermine les phases de croissance, qui est optimale quand la température est optimale, et les dépôts de tissus adipeux associés. Ainsi, chez les salmonidés, un effet saisonnier peut être mesuré sur la couleur de filets qui est généralement plus intense pendant les phases de croissance accrue (Espe *et al.*, 2004 ; Morkore et Rorvik, 2001 ; Roth *et al.*, 2005). Un effet est également mesuré sur la fermeté des filets qui est plus faible dans ces mêmes périodes de croissance rapide (Espe *et al.*, 2004 ; Merkin *et al.*, 2014; Morkore et Rorvik, 2001). Le gaping est également un phénomène saisonnier, avec un degré d'incidence plus élevé au printemps et en été (Morkore et Rorvik, 2001). Une étude sur le saumon rapporte un effet de la saison sur la flaveur, en lien avec la teneur d'hypoxanthine qui varie avec la saison (Morkore et Rorvik, 2001). Un article récent portant sur le possible impact du réchauffement climatique, induisant une hausse des températures estivales, rapporte un impact drastique sur la couleur des filets avec une partie de la production présentant des filets totalement dépigmentés, ne permettant pas leur commercialisation (Wade *et al.*, 2019).

Le contrôle de la **température**, en conditions expérimentales chez le saumon, affecte également les propriétés sensorielles, en particulier la couleur des filets, en lien avec la croissance des poissons (Lerfall *et al.*, 2017). De même, chez l'omble chevalier, qui est une espèce d'eau très froide, la température d'élevage impacte la couleur et la texture, évaluées par des mesures instrumentales ou en analyse sensorielle (Gines *et al.*, 2004b).

Chez les salmonidés, la **photopériode** seule a peu d'impact sur la qualité des produits (Vieira *et al.*, 2005) sauf si elle permet de décaler la maturation sexuelle, ce qui permet dans ce cas d'améliorer la qualité des produits (Linhartova *et al.*, 2018). Par contre, chez la morue, quelques études rapportent un effet de la photopériode sur le gaping et la texture (Hagen et Johnsen, 2016; Hemre *et al.*, 2004).

Conditions d'élevage

Bien qu'elle affecte la croissance, la **densité d'élevage** affecte peu les propriétés organoleptiques. Chez la truite, des densités d'élevage de 15 ou 40 kg/m^3 ont un léger effet sur la couleur et la fermeté des filets (Suarez *et al.*, 2014) mais des densités d'élevage de 5, 15 ou 25 kg/m^3 n'affectent ni couleur ni la texture des filets (Cagiltay *et al.*, 2015).

L'impact de la **qualité d'eau** (teneurs en O_2, CO_2, composés azotés, matières en suspension, pH, …), largement documenté sur les performances zootechniques, n'est presque pas étudié sur les qualités organoleptiques. Une étude sur la truite rapporte que la teneur en oxygène de l'eau (proche de la normoxie) affecte peu la qualité des produits (Lefevre *et al.*, 2008).

La plupart des salmonidés sont euryhalins, c'est-à-dire qu'ils peuvent s'adapter à différentes **salinités** de l'eau, et si l'élevage en eau douce est incontournable pour les stades précoces et juvéniles, le transfert en mer permet d'accélérer fortement la croissance. L'âge des poissons au moment du passage en mer, dans la 1ère ou la 2ème année de vie chez le saumon, impacte la couleur et la fermeté des filets, en lien avec la teneur en pigment caroténoïdes, la vitesse de croissance et la taille des fibres musculaires (Johnsen *et al.*, 2013; Ytrestoyl *et al.*, 2004).

L'**exercice** musculaire, conditionné chez les poissons par la vitesse du courant, impacte la masse musculaire et affecte modérément les propriétés organoleptiques (Palstra et Planas, 2011). Ainsi un effet modéré de la vitesse du courant (0,1 et 2 BL/s = longueur de poisson/s) sur la résistance mécanique des filets est rapporté chez la truite (Bugeon *et al.*, 2003), tandis qu'un exercice modéré (0,9 BL/s) est sans effet (Rasmussen *et al.*, 2011). Un effet significatif de l'exercice sur la texture a également été rapporté chez le bar, mais pas chez la morue (Shi *et al.*, 2019).

Plusieurs études rapportent l'impact de **pathologie** sur la qualité des produits chez le saumon. Ainsi les poissons atteints de « pancreas disease » (PD) ont des propriétés organoleptique très altérées avec des filets dépigmentés et très durs (Larsson *et al.*,

2012 ; Lerfall *et al.*, 2012). Après guérison, des altérations musculaires peuvent subsister et être associées à des filets plus pales, plus jaunes et plus fermes que la normale, mais sans effet sur le gaping ni des off-odour (Taksdal *et al.*, 2012). De plus, la présence de spots noirs de mélanine dans le filet, peut résulter d'une telle infection (Dessen *et al.*, 2019; Krasnov *et al.*, 2016).

Système d'élevage (intensif/extensif, circuits recirculés, SIQO…)

Il y a très peu d'études rigoureuses sur l'impact du **système d'élevage** sur les propriétés sensorielles des poissons. La plupart des études comparant des poissons issus de différents sites incluent en plus de l'effet de systèmes d'élevage différents, des différences d'alimentation, d'origine génétique des poissons et des paramètres physico-chimiques de l'eau, et rapportent le plus souvent des différences de qualité organoleptique, mais sans qu'on puisse les imputer au système d'élevage à proprement parler.

La plupart des salmonidés sont élevés dans des systèmes intensifs. Par contre, pour les espèces de domestication plus récente ou traditionnellement élevées de façon extensive, des études rapportent des effets d'un **élevage intensif vs. extensif** sur les propriétés sensorielles. Le paramètre le plus affecté par ce facteur est la texture des filets qui sont généralement plus fermes pour les poissons issus de systèmes extensifs, souvent en relation avec une moindre teneur en lipides (Masilko *et al.*, 2015 ; Stejskal *et al.*, 2011 ; Vacha *et al.*, 2013 ; Valente *et al.*, 2011).

Chez les salmonidés, le développement d'élevage en **circuits recirculés** permet à la fois de limiter les besoins en eau, et de contrôler les rejets polluants dans l'environnement. Très peu d'études rapportent le potentiel effet de ces conditions d'élevage pas rapport à un circuit ouvert. La principale différence entre les deux systèmes concerne la qualité d'eau et le profil thermique souvent plus stable en circuit recirculé. Chez la truite, aucun effet majeur de ce type d'élevage n'a été rapporté sur la couleur ou la texture des filets (Labbe *et al.*, 2014). Le principal risque de ce type d'élevage sur les propriétés sensorielles des filets est l'apparition d'off-flaveurs, liée à la présence de micro-organismes qui synthétisent des composés comme la géosmine ou l'isobornéol dans l'eau (Auffret *et al.*, 2013), et qui persistent dans le système du fait de la recirculation de l'eau. Pour remédier à ce problème, des méthodes de traitement de l'eau ont été testées (Davidson *et al.*, 2014a), mais la stratégie la plus efficace pour remédier au problème est de prévoir une phase de finition des poissons en eau claire (Lindholm-Lehto et Vielma, 2019). Chez la truite, la teneur en geosmine dans le filet est corrélée à la concentration dans l'eau du bassin, et peut être reliée à la teneur en phosphore (P) de l'aliment et aux rejets de P dans le système (Sarker *et al.*, 2014). Néanmoins, une variabilité entre les poissons est observée, et la proportion de poissons dans le système présentant un défaut de flaveur dépend de la concentration des composés d'odeur dans le circuit, ce qui permet de définir des teneurs seuil (par exemple 10 ng/L pour la géosmine) en dessous desquelles l'apparition du défaut est négligeable (Petersen *et al.*, 2011).

Très peu d'études rapportent les effets d'un élevage sous signes d'identification de la qualité et de l'origine (**SIQO**) sur les caractéristiques sensorielles chez les poissons. Chez le saumon Atlantique, la fourniture de pigments caroténoïdes naturels dans l'aliment bio conduit à une plus grande diversité de pigments dans le muscle. Les filets des poissons conventionnels sont plus lumineux que ceux des « bio », mais aucune différence de couleur (composante rouge ou jaune) n'est mesurée (Lerfall *et al.*, 2016). Chez le bar, l'élevage « bio » ou conventionnel n'affecte pas la texture, mais modifie la couleur de la robe et de la chair (Trocino *et al.*, 2012). Une étude plus récente sur le bar et la dorade ne rapporte aucun effet de l'élevage « bio » sur la qualité organoleptique (Di Marco *et al.*, 2017).

Conditions d'abattage (méthode / stress)

Les poissons, de par leur milieu de vie aquatique, sont particulièrement exposés à un stress au moment de l'abattage puisque la plupart des manipulations impliquent de les sortir de leur milieu de vie (pêche). L'abattage des poissons comporte généralement une période de mise à jeun plus ou moins longue, une étape de « serrage » dans les bassins d'élevage, pour faciliter la pêche, un transport ou non selon la proximité du lieu d'abattage, avec dans ce dernier cas, un temps d'attente après le transport, et enfin l'euthanasie (Lines et Spence, 2012). Etonnamment, il n'y a pas de législation sur les méthodes d'étourdissement et de mise à mort des poissons. D'après l'organisation mondiale de la santé animale (OIE)[37], les **méthodes** pratiquées sont la percussion, la décérébration et l'électrocution. D'autres méthodes telles que le glaçage vivant, l'asphyxie au CO_2 ou à l'air, et la saignée peuvent également être pratiquées. Pour le bien-être des poissons, l'OIE préconise d'utiliser des méthodes de percussion, décérébration ou électrocution, les autres méthodes étant jugées « peu respectueuses du bien-être des animaux (Robb et Kestin, 2002 ; van de Vis *et al.*, 2003). Une étape de saignée des poissons, dans l'eau, après la mise à mort est généralement pratiquée.

La méthode d'abattage, mais aussi les étapes qui précèdent l'abattage (confinement, transport, …), induisent un **stress** chez les poissons, et l'impact du stress, souvent associé à une intense activité musculaire, sur la qualité des produits est bien documenté chez plusieurs espèces (Terlouw *et al.*, 2015). Le stress et/ou l'activité intense au moment de l'abattage accélèrent les processus *post-mortem* (installation de la rigor, chute de pH, dégradation des nucléotides, …), et un impact négatif modéré sur la couleur des filets et des filets moins fermes sont le plus souvent observés (Erikson *et al.*, 2018; Kiessling *et al.*, 2004 ; Lefevre *et al.*, 2008 ; Lefevre *et*

[37] https://www.oie.int/ index.php?id=171&L=1&htmfile=chapitre_welfare_stunning_killing.htm

al., 2016 ; Roth *et al.*, 2002). Un effet modéré du stress a pu également être observé sur l'odeur des filets chez le saumon (Sigholt *et al.*, 1997). De plus, la comparaison, par des tests de préférence, de la qualité sensorielle montre que l'abattage manuel (percussion) conduit à une meilleure qualité que l'utilisation du CO_2 ou de l'électricité (Marx *et al.*, 1997). Récemment, le test d'une nouvelle méthode utilisant du monoxyde de carbone pour abattre des truites a montré une effet sur les caractéristiques sensorielles avec une intensité d'odeur et de flaveur plus faible pour des truites abattues au monoxyde de carbone (Concollato *et al.*, 2016 ; Concollato *et al.*, 2019). Un possible impact du stress à l'abattage sur l'appartion du gaping a également été rapporté (Roth *et al.*, 2006) mais n'est pas systématiquement observé (Erikson *et al.*, 2018; Kiessling *et al.*, 2004).

Traitement des carcasses

Les caractéristiques sensorielles des poissons peuvent également être impactées par les opérations qui suivent l'abattage. L'efficacité de la **saignée** impacte directement la couleur des filets et la présence de « blood spots » (Borderias et Sanchez-Alonso, 2011; Erikson *et al.*, 2010). Par contre, le fait **d'éviscérer** on non les poissons est sans effet sur la couleur des filets (Erikson *et al.*, 2018). Un **lavage** minutieux de la cavité abdominale, après éviscération, a un effet positif sur la fermeté des filets et sur le « gaping » chez le saumon (Jacobsen *et al.*, 2017). La découpe (**filetage**) rapide des poissons après l'abattage, avant l'installation de la rigor-mortis, permet de limiter la présence de « bloodspot » (Erikson *et al.*, 2010).

Effet de la durée et des conditions de conservation – Fraicheur des produits

La fraîcheur des produits est une caractéristique majeure de qualité pour les poissons. Les poissons sont en effet des produits fragiles qui évoluent rapidement et nécessitent une conservation au froid rigoureuse. Cette caractéristique est à relier au caractère poïkilotherme de ces espèces, dont tous les équipements enzymatiques de dégradation des composés musculaires fonctionnent à basse température, en particulier pour les poissons d'eau froide. L'évolution *post-mortem* a un impact majeur sur les propriétés sensorielles, si bien que l'évaluation sensorielle est une méthode d'évaluation de la fraîcheur des produits dans des index tels que le QIM (« quality index method ») qui regroupe la notation de divers critères sensoriels incluant la couleur, l'odeur et la texture (voir chapitre 1) (Sveinsdottir *et al.*, 2002).

La **durée de conservation** affecte fortement l'odeur et la flaveur des poissons qu'ils soient conservés entiers ou découpés. Ainsi on peut mesurer une évolution des composés volatiles, en lien avec le développement d'une flore d'altération (Kawai, 1996). C'est d'ailleurs la flaveur du produit qui détermine la durée d'acceptabilité du produit, qui est, dans de bonnes conditions de conservation, de l'ordre d'une dizaine de jours. De plus un lien entre les composés de dégradation de l'ATP, également utilisés comme indicateur de fraîcheur, et la flaveur a été rapporté (Hong *et al.*, 2017). Par ailleurs, la présence dans les filets de poissons de fortes teneurs en acides gras polyinsaturés conduit à des phénomènes d'oxydation qui peuvent produire des composés d'arôme défavorable (Ackman *et al.*, 1997). La texture évolue également notablement, avec le plus souvent une perte de fermeté de la chair et une perte de l'intégrité des filets (gaping) (Cheng *et al.*, 2014; Espe *et al.*, 2004), en lien avec la protéolyse *post-mortem (Delbarre-Ladrat et al., 2006)*. La couleur évolue également, mais dans une moindre mesure. On peut ainsi mesurer une baisse de la luminosité et de l'intensité de couleur des filets de salmonidés jusqu'à environ 2 jours *post-mortem* suivie d'une augmentation de ces paramètres (Erikson et Misimi, 2008 ; Lerfall *et al.*, 2016). Cette évolution dépend des conditions d'abattage (Erikson et Misimi, 2008).

Les **conditions de conservation** ont une incidence majeure sur les caractéristiques organoleptiques des poissons. La conservation au froid est la règle et les conditions de refroidissement et de stockage ont été largement étudiées. Les technologies utilisées pour les autres produits carnés telles que l'utilisation d'atmosphères modifiées ou le traitement par des hautes pressions peuvent également être utilisées, et sont efficaces pour la conservation des filets de poisson (Sampels, 2015). De nombreuses études récentes, testant l'ajout d'additifs le plus souvent naturels, ont démontré l'efficacité de ces traitements pour maintenir plus longtemps les qualités organoleptiques des produits (Gokoglu, 2019).

En conclusion, les propriétés organoleptiques de la chair des poissons sont très différentes de celles des autres produits carnés, mais également caractéristiques de chaque espèce. Ces propriétés varient sous l'influence de facteurs intrinsèques et extrinsèques lors de l'élevage, mais également lors de l'abattage, des premières étapes de transformation et de la conservation. Néanmoins, ces variations sont souvent limitées et pas nécessairement perceptibles par le consommateur non expert du produit.

2.6.2.4. Propriétés nutritionnelles

Les parties comestibles du poisson sont essentiellement les muscles composant les filets. On distingue 2 types de muscles : le muscle blanc, quantitativement le plus important puisqu'il représente jusqu'à 50% de la masse corporelle du poisson et le muscle rouge, petit muscle superficiel de la ligne latérale, dont la proportion varie d'une espèce à l'autre (<10% de la musculature à l'exception de certaines espèces comme le thon, poisson le plus consommé en France, issu de la pêche) (Medale *et al.*, 2003). Les principaux atouts nutritionnels de la chair de poissons résident dans la composition en acides aminés des protéines, la composition en acides gras des lipides, le poisson étant la principale source d'acides gras longs (C> 18) polyinsaturés n-3 (AGPI-LC n-3) dans l'alimentation humaine, et la composition en certains micronutriments (Lund, 2013 ; Tilami et Sampels, 2018).

La teneur en protéines de la chair des poissons est comprise entre 16 et 22% selon les espèces (Tableau 2.6.9). Ce sont des protéines hautement digestibles et leur profil en acides aminés essentiels, proche des besoins de l'homme, leur confère une valeur biologique élevée. La teneur en protéines et le profil en acides aminés de la chair des poissons sont stables au sein d'une espèce et sont très peu affectés par le génotype, l'âge, la saison ou les conditions d'élevage y compris l'alimentation (Cardinal *et al.*, 2011 ; Medale *et al.*, 2003 ; Tacon et Metian, 2013).

Les lipides sont les constituants de la chair des poissons qui présentent les variations les plus fortes tant en quantité qu'en composition. Ils sont constitués essentiellement de triglycérides (80%) caractérisés par une proportion élevée d'AGPI-LC n-3 ; ils contiennent peu de cholestérol (20 à 80 mg/100 g de chair selon les espèces) principalement sous forme d'esters. Les phospholipides (~20%) constituants majeurs des membranes cellulaires sont caractérisés par une très grande richesse en AGPI-LC n-3 (jusqu'à 60%) et leur composition est relativement stable (Corraze et Kaushik, 1999 ; Medale *et al.*, 2003).

La teneur en lipides de la chair varie d'une espèce à l'autre car les compartiments corporels de stockage préférentiel (foie, tissu adipeux périviscéral, muscle) sont différents selon les espèces. Ainsi la gamme de variation des teneurs en lipides de la chair s'étend de moins de 1 g/100 g à plus de 18 g/100 g selon la capacité de l'espèce à stocker des lipides dans ses tissus musculaires (Tableau 2.6.9). Cette capacité de stockage des lipides dans les muscles est utilisée pour classer les espèces : on distingue des espèces à chair maigre comme la sole ou la perche dont la teneur en lipides dans le muscle est inférieure à 1 g/100 g ; des espèces à chair grasse comme le saumon avec des teneurs en lipides dans le muscle supérieures à 10 g/100 g et des espèces intermédiaires comme la truite qui stockent leurs lipides dans le muscle mais aussi dans d'autres sites comme le tissu adipeux périviscéral (Corraze et Kaushik, 1999 ; Medale *et al.*, 2003). La répartition des lipides n'est pas homogène dans le filet : la partie ventrale est plus riche en lipides que la partie dorsale chez salmonidés (Katikou *et al.*, 2001) mais également chez le bar ou la daurade (Grigorakis, 2007).

Tableau 2.6.9. Teneurs en nutriments et micronutriments majeurs dans 100 g de chair de différentes espèces de poissons d'élevage

	Sole tropicale	Perche du Nil	Tilapia	Turbot	Bar commun	Daurade royale	Truite	Saumon
Protéines (g)	15,7	19,1	18,1	18,3	21,4	20,8	19,1	20,0
Lipides (g)	0,3	0,3	2,1	3,8	4,1	4,8	6,0	12,9
EPA+DHA (g)	0,09	0,10	0,08	0,79	1,02	0,88	1,15	1,48
Vit A (µg)	<2	7	<2	9,6	14,71	4,5	17,1	8,5
Vit D (µg)	<0,5	0,46	15,61	0,71	2,31	4,32	5,25	5,69
Vit E (mg)	0,22	0,49	0,93	3,63	1,35	0,87	2,44	2,32
Vit B6 (mg)	0,1	0,11	0,23	0,19	0,39	0,44	0,38	0,59
VitPP (mg)	1,14	2,01	3,28	3,49	6,79	6,88	5,8	7,12
Potassium (mg)	125	308	282	306	430	461	398	374
Phosphore (mg)	80,4	156	131	134	209	248	184	186
Magnésium (mg)	20,1	26,8	25,4	24,9	32,3	31,4	27,1	26,2
Sélénium (µg)	31	31	18	18	8	7	9	12
Iode (mg)	22	7	6	24	9	7	12	14
Fer (mg)	0,22	0,26	0,27	0,16	0,39	0,46	0,34	0,24

Données issues du projet « Composition nutritionnelle des produits aquatiques », www.nutraqua.com. Les valeurs représentent la moyenne de 5 échantillons différents. Les espèces sont classées des plus maigres à gauche vers les plus grasses à droite.

La teneur en lipides de la chair des poissons augmente avec l'âge et la taille des poissons mais elle peut aussi varier en fonction de la saison et du cycle de reproduction (Fontagné-Dicharry et Médale, 2010). Chez le saumon, on observe une diminution des lipides musculaires en hiver en lien avec la maturation sexuelle (mobilisation des lipides corporels vers les gonades) puis une augmentation entre juillet et novembre (+12%) (Morkore et Rorvik, 2001). Chez la daurade, on observe aussi des variations saisonnières avec des teneurs en lipides élevées en fin d'été - début d'automne et plus faibles en fin d'hiver (Cardinal *et al.*, 2011; Grigorakis, 2007). Cette baisse des teneurs en lipides musculaires résulte de la maturation sexuelle et de la plus faible consommation alimentaire durant la période hivernale. Des modifications de la composition en acides gras sont aussi observées avec une mobilisation des acides gras saturés du muscle mais aussi des AGPI-LC n-3 comme l'EPA et le DHA. Afin de s'affranchir de ces variations de composition lipidique liées à la reproduction et préserver la qualité de la chair, des stratégies sont mises en place dans les élevages : soit la commercialisation est réalisée avant la maturation sexuelle (vente au stade portion ou souches sélectionnées pour une maturation sexuelle tardive), soit les animaux sont stérilisés par un choc thermique ou de pression appliqués sur les œufs peu après la fécondation, ce qui permet d'obtenir des poissons triploïdes stériles.

Les lipides de la chair des poissons sont caractérisés par une forte proportion d'AGPI-LC de la série n-3, en comparaison des animaux terrestres, l'EPA et le DHA pouvant représenter jusqu'à 25% des lipides de la chair (Medale *et al.*, 2003). Plus la chair de poisson est grasse plus elle apporte d'EPA et de DHA, ainsi chez la sole ou la perche la teneur en EPA+DHA est de l'ordre de 0,1 g/100 g contre

1,48 chez le saumon (Tableau 2.6.9). L'alimentation est le principal facteur de variation de la composition en acides gras de la chair des poissons, qui reflète assez fidèlement celle des aliments ingérés.

La chair de poisson contient par ailleurs plus de 60 micronutriments qui proviennent à la fois de la nourriture et de l'eau (Tacon et Metian, 2013). Les principaux minéraux et oligo-éléments caractéristiques des poissons sont le potassium, le phosphore (8 à 15 fois plus que dans les viandes), le magnésium, le sélénium, l'iode, le fer et le fluor (5 à 10 fois plus que dans les viandes). Des différences sont observées entre espèces de poissons (Tableau 2.6.9) et selon le milieu d'élevage. En effet, le contenu en ces divers éléments est principalement affecté par la composition minérale de l'eau, l'apport par le milieu étant généralement plus important en eau de mer, en particulier pour l'iode et le fluor (synthèses dans Médale *et al*. (2008; 2003). L'effet des autres facteurs potentiels de variation est peu documenté à l'exception de l'apport alimentaire pour certains d'entre eux. C'est le cas pour le sélénium, qui est souvent ajouté aux aliments aquacoles comme antioxydant ; sa concentration dans la chair des poissons augmente avec l'apport alimentaire.

Les principales vitamines apportées par la chair de poissons sont d'une part les vitamines liposolubles A, D, et E, d'autre part certaines vitamines hydrosolubles présentes dans les muscles (PP, B12 et surtout B6). Leur contenu est très variable selon les espèces mais comme pour les lipides, le principal facteur de variation connu est l'apport alimentaire (synthèses dans Médale *et al*. (Médale; 2003). A noter également chez les salmonidés, la présence de pigments caroténoïdes (essentiellement astaxanthine) qui sont apportés par l'alimentation car les poissons ne sont pas capables de les synthétiser. La teneur moyenne de la chair est de l'ordre de 1 mg/100 g. L'astaxanthine étant une provitamine A, la chair des salmonidés nourris avec des aliments supplémentés en astaxanthine est enrichie en vitamine A, suite à une conversion au niveau hépatique.

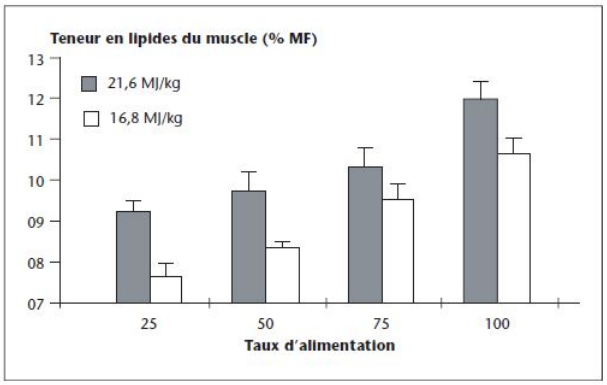
Effet de l'alimentation

Quelles que soient les espèces de poissons, l'alimentation est le principal facteur induisant des modifications importantes des caractéristiques nutritionnelles de la chair. Ces modifications concernent majoritairement la composition lipidique de la chair et les teneurs en vitamines liposolubles comme la vitamine E. En effet, comme signalé précédemment, la teneur en protéines et la composition en acides aminés de la chair des poissons varient peu en fonction des espèces, de l'alimentation ou des conditions d'élevage.

L'augmentation du taux d'alimentation et du contenu énergétique de l'aliment conduit à une élévation de la teneur en lipides du muscle chez la truite arc-en-ciel. La figure 2.6.4. (Medale, 2010) en montre une illustration chez des truites arc-en-ciel de grande taille.

Dans une autre étude conduite chez cette même espèce durant la phase de croissance, il a été montré que la teneur en lipides du muscle pouvait varier de 8,8 à 13,3 g/100 g selon que les aliments contenaient 15 ou 30% de lipides. Chez le saumon Atlantique, on observe également une augmentation de la teneur en lipides musculaires qui passe de 8,5 à 12 g/100 g avec des aliments contenant respectivement 21 et 32% de lipides. Ce type de réponse est observé chez toutes les espèces de poissons dont le muscle est un site de stockage des lipides. En effet, chez une espèce « maigre » comme le turbot, l'augmentation du taux lipidique des aliments de 10 à 20% n'induit pas de modifications de la teneur en lipides du muscle qui reste de l'ordre de 1 à 1,5 g/100 g (Corraze et Kaushik, 2009).

Figure 2.6.4. Effet du taux d'alimentation* et du contenu énergétique de l'aliment sur la teneur en lipides du muscle de la truite arc-en-ciel au stade « grande truite » (poids compris entre 1,8 et 3,2 kg)

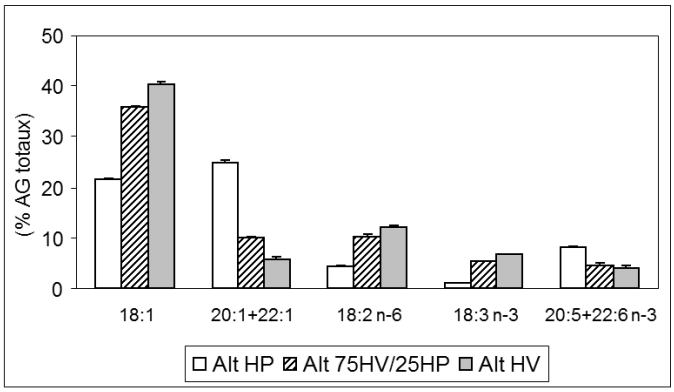


* le taux d'alimentation 100 correspond à une alimentation « *ad libitum* »

La nature des lipides incorporés dans les aliments (huiles de poisson vs. huiles végétales) n'induit pas de modification de la teneur en lipides de la chair des poissons, par contre elle modifie fortement la composition en acides gras de la chair, qui reflète, dans une large mesure, celle des aliments.

L'incorporation d'huiles végétales dans les aliments en remplacement de l'huile de poisson (dont les stocks sont limités) entraîne une augmentation des acides gras caractéristiques des huiles végétales (18:1, 18:2 n-6, 18:3n-3) et une diminution des teneurs en EPA et DHA dans la chair (Figure 2.6.5). Ces changements sont d'autant plus marqués que le taux de substitution est élevé.

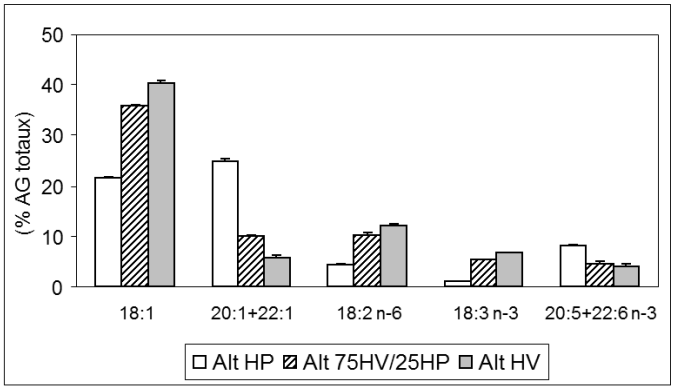
Figure 2.6.5. Composition en acides gras des lipides du muscle chez la truite arc-en-ciel ayant reçu des régimes contenant 100% d'huile de poisson (Alt HP), 75% d'huile végétales/25% d'huile de poisson (Alt 75HV/25HP) ou 100% d'huiles végétales (Alt HV) pendant 62 semaines (% AG totaux)



Globalement, quelle que soit l'espèce, la réponse des AG du muscle suit une simple loi de dilution, à l'exception du DHA dont les variations dans les tissus sont de moindre importance du fait d'une rétention sélective de cet acide gras (Corraze et Kaushik, 2009 ; Fontagné-Dicharry et Médale, 2010).

Du fait de la grande plasticité des lipides musculaires, il est possible de restaurer les teneurs en EPA et DHA et diminuer celles en 18:2 n-6 et 18:3 n-3 avec une alimentation à base d'huile de poisson durant les derniers mois précédant l'abattage. Chez le saumon Atlantique ayant reçu pendant 50 semaines des aliments contenant 100% d'huile de lin ou de colza, une période d'alimentation de finition de 20 semaines permet d'obtenir des teneurs en EPA et DHA équivalentes à 80% de celles de saumons ayant reçu un aliment à base d'huile de poisson pendant tout le cycle d'élevage (Figure 2.6.6.). Des résultats similaires ont été obtenus chez le bar et la daurade ayant reçu des aliments contenant 60% d'huiles végétales, la teneur en DHA de leur chair est restaurée à 100% et celle de l'EPA à 70-80 %, après une période de finition de 22 ou 12 semaines avec un aliment à base d'huile de poisson (Corraze et Kaushik, 2009). L'incorporation de nouveaux ingrédients comme des micro algues riches en AGPI-LC n-3 dans les aliments aquacoles est aussi une solution pour préserver la teneur en ces acides gras et donc la valeur nutritionnelle de la chair des poissons d'élevage tout en limitant l'utilisation d'huile de poissons (Turchini *et al.*, 2009) cependant leur disponibilité est encore limitée et leur coût élevé.

Figure 2.6.6. Composition en acides gras (% AG totaux) des lipides musculaires de saumon atlantique nourris avec des aliments contenant de l'huile de poisson (HP), de l'huile de lin (HL) ou de l'huile de colza (HC) pendant 50 semaines puis nourris avec l'aliment de finition HP pendant 20 semaines (Bell *et al.*, 2003).



Les relations entre conditions d'élevage et teneur en vitamines de la chair sont peu documentées pour les poissons, à l'exception de la vitamine E. En effet, des tocophérols sont fréquemment ajoutés aux aliments aquacoles riches en AGPI-LC n-3 pour protéger ces derniers de l'oxydation à laquelle ils sont sensibles. Les études réalisées chez différentes espèces démontrent que la teneur en vitamine E de la chair des poissons augmente avec le taux de vitamine E de l'aliment et préserve les acides gras longs polyinsaturés de l'oxydation durant le stockage (Bai et Gatlin, 1993 ; Frigg *et al.*, 1990 ; Sigurgisladottir *et al.*, 1994).

Sélection génétique

De nombreuses études ont été consacrées à l'estimation de l'héritabilité des caractères de composition du corps entier des poissons ou de certains compartiments corporels dont le muscle. Des résultats concordants ont été obtenus pour les différentes espèces démontrant une héritabilité quasi nulle pour la teneur en protéines et une héritabilité modérée (0,2 à 0,45 selon les conditions de test) pour la teneur en lipides de la chair. Le caractère "teneur en lipides de la chair" fait souvent partie maintenant des critères de sélection des poissons d'élevage, notamment chez les salmonidés (truite, saumon) pour lesquels une chair riche en lipides est recherchée quand elle est destinée à être fumée, alors qu'une chair à teneur modérée en lipides est préférée pour les produits vendus frais. Les analyses réalisées sur des lignées de truite arc-en-ciel divergentes pour la teneur en lipides du muscle (Kamalam *et al.*, 2013) ou des familles de carpe (Li *et al.*, 2018) ou de saumon (Morais *et al.*, 2011) sélectionnées pour ce caractère montrent que l'augmentation de la teneur en lipides de la chair ne s'accompagne pas d'une proportion plus élevée d'AGPI-LC n-3. Des analyses d'héritabilité démontrent que la proportion de DHA du muscle est un caractère potentiellement héritable (Horn *et al.*, 2018 ; Prchal *et al.*, 2018b) mais, à notre connaissance, il n'existe pas encore de familles ou lignées sélectionnées pour ce caractère.

Facteurs environnementaux (température, salinité, photopériode, saison)

Les facteurs environnementaux peuvent influencer la teneur en lipides de la chair des poissons et sa composition en acides gras.

La température d'élevage est un facteur important car les poissons sont des animaux poïkilothermes (température corporelle semblable à celle du milieu par absence de thermorégulation), cependant elle n'a pas d'effet direct sur les teneurs en lipides corporels. C'est un effet indirect, lié à la consommation alimentaire qui est plus élevée dans la zone de préférendum thermique de l'espèce considérée, ce qui conduit à une meilleure croissance et une augmentation des lipides tissulaires (Corraze et Kaushik, 1999). D'une manière générale, la température d'élevage a peu d'effet sur la composition en acides gras de la chair, car elle influence surtout la proportion d'acides gras polyinsaturés des phospholipides qui est plus élevée à basse température afin de maintenir la fluidité membranaire (Corraze et Kaushik, 1999 ; Grigorakis, 2007). Chez le bar, aucun effet de la température d'élevage (22 vs. 29°C) n'a été observé sur la composition en acides gras des lipides neutres du muscle (Skalli *et al.*, 2006).

La salinité n'a pas non plus d'influence nette sur la teneur en lipides et la composition en acides gras de la chair, car les modifications induites portent essentiellement sur la fraction phospholipides (Corraze et Kaushik, 1999 ; Grigorakis, 2007).

Chez le saumon, la photopériode modifie la teneur en lipides de la chair mais de façon différente en fonction de la saison. Entre janvier et mars, on observe une diminution de la teneur en lipides de la chair chez les poissons élevés en condition de jour permanent comparé à ceux élevés en photopériode naturelle, alors qu'entre juin et août la teneur en lipides de la chair est augmentée (Nordgarden *et al.*, 2003 ; Oppedal *et al.*, 2006). Chez la daurade élevée en condition d'éclairage artificiel, l'augmentation de la durée du jour de 16 à 24 h se traduit par une diminution de la teneur en lipides de la chair, qui serait liée à la plus grande période d'activité (Gines *et al.*, 2004a). Par contre, chez une espèce « maigre » telle que la morue, aucun effet de la saison ou de la photopériode sur la composition du muscle n'a été observé (Hemre *et al.*, 2004).

Systèmes d'élevage

La majeure partie des élevages est réalisée dans des systèmes en eau libre (bassins alimentés par de l'eau de source ou de rivière en eau douce, étangs ; bassins ou cages en mer) mais des systèmes en eau recyclée se développent de plus en plus car ils permettent de gérer plus finement les quantités et paramètres de l'eau ainsi que les effluents. Les analyses comparatives de poissons produits en systèmes en eau libre ou recyclée ne font pas apparaitre de modifications notables des caractéristiques nutritionnelles de la chair (Labbe *et al.*, 2014).

La densité d'élevage peut induire dans certains cas des variations de la teneur en lipides de la chair. Chez la truite, lorsque la densité d'élevage est augmentée de 15 à 45 kg/m^3, on note une diminution de la teneur en lipides du muscle (4,9 vs. 3,4 g/100 g), cependant cet effet n'est observé que si les poissons sont nourris avec un régime à faible taux de lipides (14%). Par contre avec un régime à 33% de lipides, on n'observe pas d'effet de la densité (Suarez *et al.*, 2014), ce qui confirme l'effet prépondérant de l'alimentation. Chez le saumon de grande taille (>5 kg), Lerfall *et al*. (2016) n'ont pas trouvé de différence de teneur en lipides entre des poissons produits à une densité de 25 kg/m^3 (système conventionnel) et leurs congénères produits à une densité de 10 kg/m^3 (système biologique).

Dans les quelques études qui ont comparé des poissons élevés en systèmes de production conventionnels et sous cahier des charges de production biologique, les principales différences rapportées concernent la teneur en AGPI-LC n-3. Cependant, les résultats sont divergents car les modifications du profil en acides gras sont principalement attribuables à la composition des aliments bio offerts aux poissons plutôt qu'aux systèmes de production en eux-mêmes. Par exemple, Trocino *et al*. (2012) en comparant des bars élevés dans les deux systèmes à la même densité (15 kg/m^3), observent des proportions d'AGPI-LC n-3 plus élevées chez le bar bio alors que Di Marco *et al*. (2017) chez la même espèce (densité identique dans les deux systèmes 10 kg/m^3) observent des proportions d'AGPI-LC n-3 plus faibles. Dans cette dernière étude, l'aliment bio contenait, en plus de la farine de poisson, du soja (dépourvu d'AGPI-LC

n-3) alors que l'aliment conventionnel n'en contenait pas. De ce fait, l'aliment bio était moins riche en AGPI-LC n-3 que l'aliment conventionnel, ce qui était reflété dans le profil en acides gras du muscle des bars.

Conditions d'abattage

Les différentes méthodes d'abattage qui peuvent être utilisées pour les poissons (percussion, anesthésie gazeuse par CO_2, électrocution, asphyxie…) n'ont pas d'effet marqué sur les caractéristiques nutritionnelles de la chair. La teneur en lipides, en produits de peroxydation des lipides, ainsi que le profil en acides gras de la chair ne sont pas modifiés (Duran *et al.*, 2008 ; Secci *et al.*, 2016a ; Secci *et al.*, 2016b ; Simitzis *et al.*, 2014), seul le pH de la chair est abaissé en conditions de stress. Le jeûne (de 1 à 3 jours selon l'espèce et la température d'élevage) qui est généralement imposé aux poissons avant l'abattage afin de vider leur tube digestif, n'affecte pas la composition de la chair.

2.6.2.5. Propriétés technologiques

La chair de poisson est un produit fragile qui nécessite, pour sa conservation, un strict respect de la chaine du froid. Ceci est principalement dû au caractère poïkilotherme des poissons, dont les sytèmes enzymatiques fonctionnent à basse température. L'aptitude à la conservation peut être améliorée par des additifs alimentaires (en particulier des antioxidants) mais aussi par des procédés technologiques de refroidissement et de conservation.

Chez les poissons, le pH de la chair est très différent de celui de la viande puisque le pH ultime reste supérieur à 6. Ce paramètre dépend essentiellemnt de l'état nutritionnel des animaux et impacte peu, dans des conditions d'élevage habituelles, la qualité des produits.

La chair de poisson présente certaines aptitudes technologiques permettant de produire une grande diversité de produits transformés. Pour ce qui concerne les espèces piscicoles européennes, la principale propriété technologique exploitée est l'aptitude au fumage des salmonidés. La transformation en filets fumés comporte deux étapes : une étape de salage et une étape de fumage. Différentes technologies peuvent être appliquées pour ces deux étapes. Le procédé traditionnel combine un salage au sel sec suivi d'un fumage à froid, le plus souvent avec de la fumée de bois de hêtre. Les procédés industriels actuels peuvent utiliser ce procédé traditionnel (plutôt pour les produits haut de gamme), ou des procédés plus rapides de type saumurage ou injection de saumure pour le salage, ou fumée liquide pour le fumage. Les rendements au salage/fumage des filets de salmonidés dépendent des caractéristiques initiales du produit brut (teneur en lipides, épaisseur du filet) mais aussi des procédés appliqués.

2.6.2.6. Propriétés d'usage

A l'état brut, la chair de poisson ne présente pas de propriétés d'usage particulièrement favorable., si ce n'est sa facilité de découpe qui permet de l'incorporer dans des produits élaborés de type sushi ou sashimi. Par contre le poisson bénéficie de procédés de conservation ancestraux, qui le transforme en un produit beaucoup plus facile d'usage (filets séchés, fumés, surimi, …).

2.6.2.7. Propriétés d'image

Le poisson a souvent l'image d'un produit "nature" et plus diététique que la viande. Une étude récente, sur les préférences des consommateurs portugais, montre que les principales attentes des consommateurs vis-à-vis des poissons sont la fraicheur, la flaveur, la qualité (en général) et le prix, et que le concept de "fortification" du poisson (enrichissement alimentaire) est accepté par plus de la moitié des personnes, avec en tête des composés acceptés, les antioxydants et les acides gras n-3 (Ribeiro *et al.*, 2019). De plus, la perception de la qualité du poisson par rapport à la viande dépend du niveau d'implication des personnes interrogées dans la qualité de leur alimentation (FRL = Food-Related Lifestyles) : les consommateurs "fortement impliqués" attribuant de meilleurs scores au poisson par rapport à la viande, mais le poisson a une perception de produit cher et peu disponible comparé à la viande (Torrissen et Onozaka, 2017).

L'intérêt nutritionnel de la consommation de poisson est généralement bien perçu. Néanmoins, une étude norvégienne, examinant les contraintes qui pèsent sur une alimentation saine (fruit/légumes, poisson) rapporte que bien que les Norvégiens perçoivent généralement le poisson comme un aliment sain, plus de la moitié de la population a une consommation bien inférieure aux deux à trois portions de poisson recommandées chaque semaine, et les limites exprimées à cette consommation sont la « compétence » par rapport au produit (connaissance du produit et habitude à le cuisiner) et la qualité perçue du produit (Skuland, 2015).

Les poissons d'élevage souffrent toujours d'un défaut d'image, en comparaison des poissons **sauvages issus de la pêche**, en particulier pour les espèces dont la domestication est récente. Les critères de qualité les plus mis en avant sont la moins bonne qualité organoleptique des poissons d'élevage comparés aux poissons sauvages (Claret *et al.*, 2016). Une étude espagnole, portant sur quatre espèces marines montre que si le consommateur est informé de l'origine du poisson, il préfère le poisson sauvage, tandis que sa préférence va au poisson d'élevage quand le test est fait à l'aveugle. De plus on peut noter que l'évaluation des poissons d'élevage

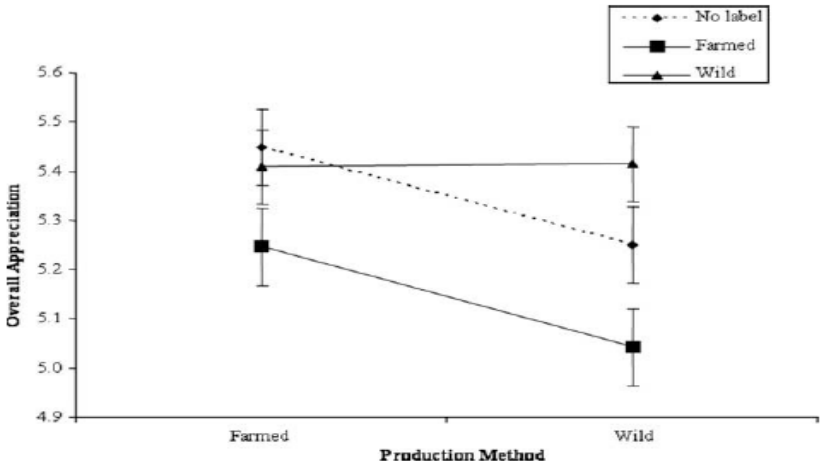
est similaire dans les deux conditions de tests (informé ou aveugle) tandis que les poissons sauvages ont une meilleure évaluation quand le consommateur est informé de leur provenance (Figure 2.6.7) (Claret *et al.*, 2016 ; Kole *et al.*, 2009).

Une qualité essentielle des poissons, plus facilement maitrisée pour les poissons d'élevage, est la **fraicheur** des produits. Une étude norvégienne rapporte que la perception d'un produit frais varie de 3 à 5 jours selon l'âge des personnes interrogées, et que le temps moyen de conservation à domicile avant consommation est de l'ordre de 1 jour. Par ailleurs, l'affichage de la date de capture ou d'abattage influence la perception de fraicheur puisque la limite d'acceptabilité est de 11 jours sans affichage et de 7 jours avec affichage de la date de pêche (Ostli *et al.*, 2013).

Parmi les considérations rentrant dans la qualité d'image des poissons d'élevage, le **bien-être** animal est important. Une étude danoise évaluant le consentement à payer pour un label « bien-être » en élevage chez la truite, rapporte que presque la moitié des personnes interrogées sont prêts à payer 25% plus cher pour ce label, avec une surreprésentation d'un type de population dans ce groupe (femme, haut niveau d'éducation, niveau de revenu élevé, personnes âgées) (Solgaard et Yang, 2011). Parmi les reproches faits à l'élevage intensif, l'image de cages d'élevage surpeuplées est néfaste, surtout qu'elle est souvent associée à l'utilisation d'**antibiotiques**. Les cahiers des charges des SIQO le prennent en compte en limitant la **densité** en élevage. Un autre élément déterminant de l'image des poissons d'élevage est la **nature des aliments** distribués. La substitution des matières première d'origine marines (farine et huile de poisson) par des matières premières végétales terrestres ne semble pas poser question, même pour des espèces carnivores. Dans la même mouvance, l'introduction de nouvelles matières premières (insectes, algues, levures, …) est bien perçue, tandis que l'on peut noter que l'utilisation des PAT, autorisés de nouveau pour l'alimentation des poissons depuis 2013, reste limitée aux productions standards, à l'exclusion de tous les cahiers des charges des SIQO.

Parmi les points négatifs de la perception de la production piscicole, il y **l'impact environnemental** des élevages, pointés du doigt en particulier pour ses rejets (matières en suspension, composés azotés, phosphore, …) dans le milieu naturel. Le développement actuel de systèmes d'élevage en circuits recirculés permet de limiter les besoins en eau de l'élevage et de limiter et gérer les rejets (Labbe *et al.*, 2014). De plus ces circuits peuvent être intégrés dans des systèmes aquaponiques, dans lesquels les effluents d'élevage alimentent des cultures végétales, permettant de combiner une épuration de ces effluents et une production valorisable. Néanmoins, la perception, en termes d'image, des circuits recirculés est médiocre car elle s'éloigne de l'image « nature » des produits et augmente la technicité de l'élevage. Par contre l'aquaponie bénéficie d'une image plutôt favorable auprès du grand public.

Figure 2.6.7. Effet de la méthode de production, élevage (farmed) vs sauvage (wild), et de l'affichage de cette méthode de production sur l'appréciation globale du produit (Source Kole et al., 2009)



2.6.3. Conclusions

Même si la chair de poisson est un produit carné, similaire d'un point de vue nutritionnel à la viande pour ses apports en protéines et acides aminés indispensables, elle se distingue par de nombreuses caractéristiques. Du point de vue nutritionnel, son intérêt majeur est son fort apport en oméga 3 par les poissons gras, dont les teneurs sont fortement dépendantes de la nature des aliments distribués aux poissons. Le maintien de cette proprété est donc conditionné par une vigilance sur la composition en acides gras des différentes matières premières de formulation des aliments, et de nombreux programmes de recherches explorent l'impact de nouveaux ingrédients pour préserver cette caractéristique. D'un point de vue sanitaire, les poissons sont directement dépendant de la qualité écologique de leur milieu de vie, et du niveau de contamination des aliments par des molécules toxiques. L'élevage piscicole s'inquiète également de son impact environnemental en développant de nouveaux systèmes plus économes en eau et permettant de valoriser ses effluents, systèmes qui impactent peu les propriétés nutritionnelles et organoleptiques des produits.

Pour finir, l'impact de modes de production sous SIQO sur la qualité des poissons, très peu documenté, mériterait de nouvelles études.

Propriétés commerciales des carcasses des poissons (Salmonidés)

Facteurs :	Poids vif	Morphologie	Rendement carcasse	Rendement en filets
Génétique (Sélection/Souche/ Lignées/Familles)	+++	+++	+++	+++
Triploïdie	+	+	+	+
Maturation sexuelle	++	++	++	++
Age / Stade	+++	++	++	++
Aliment : composition (prot/lip/glucides)	+	-	+	+
Aliment : Origine des matières premières	+	-	+	+
Rationnement / Jeûne	++	+	++	+
Environnement d'élevage (densité, qualité d'eau, exercice …)	+/-	+/-	+/-	+/-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
Le sexe a un effet sur les animaux matures sexuellement. En production les GT (> 2 kg) sont monosexes triploïdes.

Propriétés organoleptiques de la chair de poissons (salmonidés)

Facteurs :	Aspect filet : gaping	Aspect filet : stries blanches	Couleur	Fermeté	Flaveur
Génétique (Sélection/Souche/ Lignées/Familles)	-	++	++	++	-
Triploïdie	-?	+	++	++	-
Maturation sexuelle	?	+	+++	+++	+?
Age / Stade	+	+	++	++	+
Aliment : composition (prot/lip/glucides)	+?	++ (lipides)	+ (lipides)	+	+?
Aliment : Origine des matières premières	?	?	++ (selon mat 1ère)	+	++
Présence de pigment caroténoïdes dans l'aliment	-	++	+++	-	-
Rationnement / Jeûne	+?	+	+	++	?
Environnement d'élevage (densité, qualité d'eau, exercice…)	++ saison	+	+/-	+/-	+++ (défaut de flaveur)
Conditions d'abattage (méthode / stress)	+	-	+	+	-
Durée de conservation Fraîcheur	+	-	+	++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
Gaping = destructuration des filets

Propriétés nutritionnelles de la chair de poissons (salmonidés)

Facteurs :	Protéines et acides aminés	Lipides	Composition en acides gras	Minéraux, vitamines et oligo-éléments
Génétique (Sélection/Souche/ Lignées/Familles)	-	+++	+	-

Triploïdie	-		-	
Maturation sexuelle	+?	+++	++	+?
Age / Stade	+/-	++	-?	-?
Nature de l'aliment formulation (prot/lip/glucides)	-	+++	-	+
Nature de l'aliment – origine des matières premières	-	++	+++	+
Rationnement / Jeûne	-?	+++	-	?
Environnement d'élevage (densité, qualité d'eau…)	-	+	-	-
Conditions d'abattage (méthode / stress)	-	-	-	-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Propriétés technologiques de la chair de poissons (salmonidés)

Facteurs :	Aptitude à la Conservation	pH et pouvoir de rétention d'eau	Aptitude à la Fumaison
Génétique (Sélection/Souche/ Lignées/Familles)	-	+	+ (adiposité)
Triploïdie	-?	+	+
Maturation sexuelle	?	++	++
Age / Stade	+	+	++
Aliment : composition (prot/lip/glucides)	+	+?	+ (adiposité)
Nature de l'aliment formulation (prot/lip/glucides)	-?	-?	-?
Nature de l'aliment – origine des matières premières	++	+/-	+?
Présence de pigment caroténoïdes dans l'aliment)	-	-	-
Rationnement / Jeûne	+	++	+
Environnement d'élevage (densité, qualité d'eau, exercice…)	+	+	+
Conditions d'abattage (méthode / stress)	++	++	+
Conditions de conservation	++ (éviscération, saignée)	++	+ filetage pre/post-rigor, saignée ?

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

Facteurs majeurs de variation des qualités de la chair de poissons

Facteurs	Qualité commerciale	Qualité organoleptique	Qualité nutritionnelle	Qualité technologique
Facteurs génétiques	+++	++	+	+
Statut physiologique	+++	++	+	++
Facteurs nutritionnels	++	++	+++	+
Conditions d'élevage	++	++	+	+

Conditions d'abattage	+	+	-	++
« Fraicheur »	+++	+++	+/-	+

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)

2.7. Le lait et les produits laitiers

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Lait et produits laitiers
Ce corpus contient 415 références dont 81% sont des articles et 9% sont des conference papers. La période couvre de 1980 à 2019 mais la majorité des publications sont comprises entre 2000 et 2019. 99 revues ont été utilisées mais six sont majoritaires en relation avec la production laitière. Journal of Dairy Science est le plus cité (84). L'autocitation s'élève à 14%. La place d'INRAE dans le corpus est importante, tant pour le nombre d'auteurs que pour la revue INRA Prod Anim (citée 19 fois).

2.7.1. Caractéristiques et importance des différents modes de production et de transformation par filière dans l'Union Européenne

L'Union Européenne (UE - 28 pays) comptait **1 485 000 exploitations bovines laitières** en 2014, avec un effectif de vaches relativement stable sur les cinq dernières années (23,1 millions de vaches en 2017). L'Allemagne et la France détiennent les cheptels les plus importants (18% et 16% du cheptel total respectivement) (CNIEL, 2019). La taille des cheptels est très variable, avec une majorité de troupeaux de très petite taille dans huit pays (70 à 100% des troupeaux avec 1 à 9 vaches en 2014 en Bulgarie, Croatie, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Pologne, Roumanie, Slovaquie, Slovénie), alors que des troupeaux de très grande taille sont présents de façon significative au Danemark, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas et en Suède (20 à 50% des troupeaux avec 100 vaches et plus) (CNIEL, 2019).

La part de lait produit dans l'UE **collectée par l'industrie laitière** est très importante et en augmentation régulière (87,4% en 2000, 93,7% en 2017), au détriment de la production fermière. Le **prix moyen payé aux éleveurs** a progressé de +9,7% entre 2015 et 2018. Il était de 356,8 euros pour 1 000 litres en 2018, le prix le plus bas étant relevé en Lituanie et le plus élevé à Chypre (292,3 et 576,4 euros pour 1 000 litres respectivement). Le lait collecté est principalement transformé en lait liquide conditionné, fromage, lait fermenté (yaourt), crème, beurre, lait en poudre, lactosérum, lait concentré ou lait d'allaitement pour animaux (CNIEL, 2019).

La **production laitière européenne** a progressé de +9,6% entre 2000 et 2017. Elle a progressé dans 17 pays, de façon très significative à Chypre (+47%), au Luxembourg (+47%) et en Irlande (+44%) et, dans une moindre mesure, aux Pays-Bas (+28%), en Estonie (+25%) et en Lettonie (+21%). À l'inverse, elle a diminué dans les autres pays, en particulier en Bulgarie (-31%), en Roumanie (-24%), en Slovaquie (-17%) et en Suède (-16%). La progression de la production laitière a été sur la même période de l'ordre de +15% en Allemagne, en Espagne, en Italie ou en Pologne, alors qu'elle a stagné en France (CNIEL, 2019).

Cent-soixante-cinq millions de tonnes de lait ont été produites en 2017. Huit pays produisent 78% du volume total, l'Allemagne et la France étant à l'origine des plus gros volumes de lait (tableau 2.7.1.). Le Royaume-Uni est le premier fournisseur de lait liquide conditionné, alors que l'Allemagne et la France fabriquent les plus gros volumes de fromage, de beurre, de crème et de lait en poudre. Les Pays-Bas et l'Allemagne produisent presque 70% du lait concentré européen et les Pays-Bas, 45% des aliments d'allaitements pour animaux (CNIEL, 2019).

Le **solde commercial** (exportations – importations) des productions laitières de l'UE est largement positif (environ +10 milliards d'euros en 2017 ou 2018), alors que celui relatif à l'ensemble des produits alimentaires est négatif (-1,3 milliards d'euros en 2017, -2,4 en 2018). Les exportations (vers les pays de l'UE ou des pays tiers) concernent majoritairement le fromage, le lait en poudre et la matière grasse laitière (5 235, 2 150 et 1 203 milliers de tonnes en 2018, respectivement). Les principaux pays tiers clients de l'UE sont la Chine, les États-Unis et le Japon, qui ont absorbé respectivement 12%, 11% et 5% des exportations vers l'ensemble des pays tiers (en valeur en 2018) (CNIEL, 2019).

La **consommation moyenne par habitant** de l'UE était en 2017 de 60,7 kg de lait liquide conditionné (y compris aromatisé et fermenté), 18,7 kg de fromage (tous laits y compris fromage frais) et 3,8 kg de beurre (et butteroil). Ces consommations apparaissent relativement stables entre 2015 et 2017 (-2,6%, -2,1% et +1,1% pour le beurre, le lait et le fromage, respectivement). Le lait est plus consommé en Irlande, en Finlande et à Chypre (> 100 kg/habitant) et moins consommé en Roumanie et Bulgarie (< 20 kg/habitant). Les Français restent les champions de consommation de beurre, suivis des Danois et des Allemands (8,0, 6,2 et 5,9 kg/habitant en 2017), alors que ce produit est très peu prisé à Malte, en Grèce ou en Bulgarie (≤ 1 kg/habitant). Le fromage tient une place prépondérante dans l'alimentation des Danois, des Luxembourgeois, des Français et des Chypriotes (> 25 kg/habitant) et est peu importante dans celle des Roumains et des Espagnols (< 10 kg/habitant) (CNIEL, 2019).

L'élevage de chèvres et de brebis laitières dans l'Union européenne est beaucoup moins important que celui des vaches. Le cheptel caprin laitier de l'UE était estimé en 2018 à 9,4 millions de têtes, dont environ 30% étaient en Grèce, 20% en Espagne, 14% en Roumanie et 11% en France (Idele, 2019). La production de lait de chèvre a été estimée en 2018 à 2,35 milliards de litres, dont 73% ont été collectés, le reste correspondant à la transformation fermière. Cinq pays ont produit plus de 80% du volume total : la France (environ 25%), l'Espagne (environ 20%), les Pays-Bas, la Grèce et la Roumanie (environ 16%, 13% et 9% respectivement) (Idele, 2019). Entre 2000 et 2017, les volumes de lait de chèvre collectés ont plus que triplé aux Pays-Bas ou en Roumanie et ont augmenté de +40 à +50% en France ou en Espagne, alors qu'ils ont diminué en Grèce (-27%) (CNIEL, 2019). Le cheptel de brebis laitières de

l'UE se trouve en presque totalité dans les pays du sud de l'Europe, soit 24,4 millions de têtes, réparties principalement en Roumanie, en Grèce et en Italie (31%, 25% et 21% du cheptel total respectivement en 2017) (Idele, 2018a). Le cheptel européen a perdu 5% de son effectif depuis 2010, avec une tendance à la diminution dans tous les pays, sauf en Roumanie où une progression de +13% a été observée (Idele, 2018a). Entre 2000 et 2017, les volumes de lait de brebis collectés ont augmenté en Roumanie, en Espagne, en Grèce et en France (de +87% à +25%), alors qu'ils ont légèrement diminué en Italie (-5%) (CNIEL, 2019). Les conduites d'élevages de brebis dans les pays du sud de l'Europe intègrent généralement des brebis laitières et des brebis pour la production de viande. Les volumes de lait produits sont globalement élevés dans les pays qui ont une tradition de fabrication fromagère (Dreve *et al.*, 2016). Les exportations de fromages de brebis sont dynamiques, avec une progression de +43% depuis 2010. Plus de 160 000 tonnes ont été exportées en 2017, principalement de Grèce (A.O.P. Féta) et d'Italie (Pecorino). Environ un quart de ces exportations était destiné aux pays tiers, en particulier les États-Unis, dont les importations de fromages de brebis ont augmenté de +20% par rapport à l'année précédente (Idele, 2018a).

Les pays de l'UE (sauf l'Estonie et Malte) sont tous concernés par les signes de qualité liés à l'origine ou à la tradition des produits agricoles et agroalimentaires (hors vins et spiritueux), que sont l'AOP (Appellation d'origine protégée), l'IGP (Indication géographique protégée) et la STG (Spécialité traditionnelle garantie). Ces signes de qualité, reconnus à l'échelle européenne depuis 1992, se sont largement répandus, puisque le nombre de produits enregistrés en AOP, IGP ou STG. était de 329 en 1996 et a atteint 1441 en 2018, dont 44% d'AOP et 52% d'IGP (Bentivoglio *et al.*, 2019a). Les principaux détenteurs sont l'Italie, la France puis l'Espagne (Agreste, 2018b ; Bentivoglio *et al.*, 2019a). Parmi tous les produits européens sous signe de qualité, les fromages arrivent en 2ème position derrière les fruits, légumes et céréales (17% et 27% des produits respectivement) (Joseph et Marmier, 2018). L'Italie et la France totalisent 96 des AOP laitières de l'UE, soit plus de la moitié (CNIEL, 2014).

En 2012 est apparue la mention européenne facultative « produit de montagne », avec pour objectif d'identifier la spécificité de ces produits, qui n'était pas signalée par les dénominations déjà existantes, alors que les zones montagneuses couvrent environ 36% du territoire européen et environ 15% de la SAU (DGCCRF, 2019; Finco *et al.*, 2017 ; Martin *et al.*, 2014). La mention « produit de montagne » peut se cumuler avec les autres dénominations (AOP, IGP ou STG). En 2016, 11% du volume de lait de vache a été produit dans les zones de montagne (13% en valeur). La France a fourni la majeure partie de ce lait (23%), suivie de l'Autriche (16%), de l'Italie (16%) et de l'Allemagne (6%). Il apparaît donc que les Alpes et le Massif central (France) contribuent fortement à la production de lait de montagne européen (Idele, 2018b). L'Italie est actuellement le plus important producteur de produits de montagne, toutes catégories confondues, devant la France et l'Espagne (Bentivoglio *et al.*, 2019a).

L'Agriculture biologique constitue un autre signe de qualité de l'Union européenne, qui est le 1er producteur mondial de lait de vache biologique, avec 4,6 millions de tonnes produits en 2016 (3% de la production européenne), devant les États-Unis (1,8 millions de tonnes) et la Chine (moins de 1 million de tonnes) (Blanc *et al.*, 2018; Idele, 2017). Six pays fournissaient 70% de la collecte de lait biologique en 2016, l'Allemagne étant en tête avec 18% de la collecte, suivie de la France (13%), du Danemark (12%), de l'Autriche (11%), du Royaume-Uni et de la Suède (Idele, 2017). La production de lait biologique a beaucoup progressé ces dernières années (+30% de 2012 à 2016) en particulier en France, en Allemagne et en Autriche (Blanc *et al.*, 2018), cette dynamique se confirmant de 2016 en 2018 en France (+52%), en Allemagne (+40%) et au Danemark (+30%) (CNIEL, 2019). Le lait liquide conditionné « bio » est le produit le plus consommé (6% de la consommation de lait liquide en 2016), en particulier au Danemark, en Autriche, en Allemagne et en France (respectivement 30%, 18%, 16% et 10% des ventes de lait conditionné en valeur). La consommation des autres produits laitiers biologiques occupe une part plus modeste, mais en progression (Idele, 2017).

En 2016, le Danemark et l'Autriche étaient les deux premiers pays exportateurs de lait biologique (50% et 40% de leurs collectes nationales respectivement), en partie vers l'Allemagne, qui a importé 1/3 de sa consommation nationale. Le marché chinois du lait infantile biologique se déploie actuellement, ce qui a incité notamment la France et l'Allemagne, ainsi que le Danemark à augmenter la production de poudre de lait, de lactosérum ou de lait UHT biologiques (Idele, 2017).

Dans les années à venir, la production et la consommation de lait biologique devraient poursuivre leurs progressions, d'autant plus que le prix du lait biologique est globalement en progression depuis 2009 (Blanc *et al.*, 2018; Idele, 2017). Cependant, le maintien des exploitations converties au bio pourrait s'avérer difficile, en particulier dans les pays où les aides au maintien sont peu élevées (de 46 à 74 euros/ha en Angleterre *versus* 225 à 230 euros/ha en Autriche), ou dans les pays où la production est devenue intensive dans des exploitations très spécialisées et peu autonomes, dont l'approvisionnement en céréales biologiques pourrait devenir problématique (Danemark, par exemple) (Idele, 2017). La consommation de lait biologique est avant tout appuyée sur la confiance des consommateurs envers un système de production qu'ils perçoivent comme vertueux vis-à-vis de l'environnement, du bien-être animal et de leur santé. Une intensification trop importante de la production est susceptible de détourner une partie des consommateurs de lait biologique vers d'autres laits différenciés qui apparaissent sur le marché, comme le lait de foin en Autriche ou le lait de pâturage en France (Blanc *et al.*, 2018).

Pour conclure, la France fait partie des quelques pays de l'Union européenne majeurs en termes de production laitière et de fabrication de produits laitiers, ainsi qu'en termes de production sous signe de qualité, comme le lait biologique ou de montagne.

La France est un pays de tradition laitière comme en témoignent les 50 produits laitiers enregistrés en AOP, soit 45 fromages (28 au lait de vache, 14 au lait de chèvre et 3 au lait de brebis), 3 beurres et 2 crèmes (CNIEL, 2014) (tableau 2.7.2).

Tableau 2.7.1. La production de lait et de produits laitiers de l'Union européenne (28 pays) en 2017. Zoom sur les 8 pays principaux producteurs de lait (1 000 t (% de la production totale de l'UE).

	Allemagne	France	Royaume-Uni	Pays-Bas	Pologne	Italie	Irlande	Espagne	UE
Production et cheptel									
Production de lait (1 000 t)	32 598	25 008	15 443	14 000	13 694	12 199	7 499	7 229	164 750
Evolution 2000-2017 (%)	*+15,1*	*+0,3*	*+6,5*	*+27,7*	*+15,2*	*+13,2*	*+43,9*	*+14,9*	*+9,6*
Part dans la production de l'UE (%)	19,8	15,2	9,4	8,5	8,3	7,4	4,6	4,4	-
Nombre vaches (1 000 têtes)	4 218	3 630	1 898	1 794	2 130	1 822	1 343	823	23 286
Lait produit collecté (%)	98,0	98,6	98,1	98,6	85,0	87,3	99,8	97,2	93,7
Production moyenne par vache (kg/an)	7 729	6 889	8 136	7 804	6 430	6 696	5 791	8 664	7 075
Evolution 2012-2017 (%)	*+5,6*	*+2,1*	*+5,7*	*-1,2*	*+24,2*	*+2,2*	*+11,1*	*+6,3*	*+7,0*
Fabrications (1 000 t)									
Lait liquide conditionné	4 817	3 303	6 911	514	1 734	2 459	554	3 538	30 930
Evolution 2012-2017 (%)	*-8,3*	*-8,2*	*-0,02*	*-1,9*	*+14,8*	*-6,1*	*+10,4*	*-1,5*	*-2,6*
Lait fermenté	1899	1451	339	289	510	325	17	1022	8220
Evolution 2012-2017 (%)	*+1,4*	*-14,8*	*+27,4*	*-10,0*	*-6,3*	*-1,2*	*+70,0*	*+29,0*	*+0,9*
Beurre et beurre concentré	488	415	161	248	214	91	258	51	2410
Evolution 2012-2017 (%)	*-0,4*	*-0,5*	*+11,0*	*+27,2*	*+29,7*	*-9,9*	*+27,8*	*+37,8*	*+11,6*
Crème de consommation	578	478	307	---	261	132	14	119	2 790
Evolution 2012-2017 (%)	*+6,6*	*+16,3*	*+19,0*	---	*+7,0*	*+11,9*	*+33,3*	*-22,2*	*+10,7*
Fromage (tous laits, toutes catégories) [1]	2 305	1 913	457	896	841	1 261	220	481	10 330
Evolution 2012-2017 (%)	*+2,9*	*-0,8*	*+2,8*	*+14,3*	*+16,6*	*+4,7*	*+20,2*	*+52,2*	*+10,5*
Economie									

Prix du lait [2] (euros/1 000 l hors taxes)	357,5	357,0	333,1	371,2	329,4	369,4	360,9	321,7	356,8
Evolution 2015-2018 (%)	*+17,4*	*+7,3*	*-1,7*	*+17,8*	*+14,9*	*+3,4*	*+17,8*	*+3,6*	*+9,7*
Solde export - import [3] (millions euros)	1 889	2 348	-1 303	4 257	1 137	-519	1 655	-471	-
Consommation [4] (kg/habitants)									
Lait liquide	53,4	47,4	104,6	42,2	39,8	47,5	123,3	79,2	60,7
Evolution 2015-2017 (%)	*-0,2*	*-8,0*	*-0,4*	*-14,8*	*+1,5*	*-5,4*	*-0,7*	*-1,6*	*-2,1*
Beurre (et butteroil) [5]	5,9	8,0	2,7	4,0	4,5	2,6	2,4 [5]	0,3	3,8
Evolution 2015-2017 (%)	*-3,3*	*-2,4*	*-12,9*	*+1,0*	*+4,7*	*+4,0*	=	*-25,0*	*-2,6*
Fromage [6] (y compris fromage frais)	24,3	26,4	11,8	21,7	18,8	22,2	6,6	9,0	18,7
Evolution 2015-2017 (%)	*-0,8*	*-1,9*	*-0,8*	*-6,5*	*+9,3*	*-1,8*	=	*+1,1*	*+1,1*

Source : CNIEL (2019)
[1] hors fromage fondu [2] prix moyen à la production, moyennes arithmétiques de données mensuelles [3] Différence exportations - importations (hors caséine, lactose, lait infantile) [4] consommation apparente : production + imports – exports [5] hors utilisation industrielle [6] fromages tous laits

Tableau 2.7.2. La place de la France dans la production laitière de l'Union européenne (28 pays) en 2017

	Rang de la France	Valeur en 2017
Cheptel de vaches laitières	2ème	3 630 (1 000 têtes)
Production laitière	2ème	25 008 (1 000 t)
Fabrications (1 000 t)		
Fromage (tous laits, toutes catégories, hors fromage fondu)	2ème	1 913
Lait fermenté	2ème	1 451
Lactosérum en poudre	1ère	566
Crème	2ème	478
Lait en poudre	2ème	459
Beurre et beurre concentré	2ème	415
Aliment d'allaitement pour animaux	2ème	232
Caséines	2ème	47
Consommation (kg/habitant)		
Beurre (ou butteroil)	1ère	8,0
Fromage	3ème	26,4
Commerce extérieur (1 000 t)		
Exportations de fromage	3ème	679
Exportations de lait en poudre	2ème	310

Exportations de poudre de lactosérum	2ème	313
Importation de matières grasses laitières (beurre, butteroil, pâte à tartiner laitière, en équivalent beurre)	1ère	219
Solde des échanges de produits laitiers (exportations – importations, hors caséines, lactose et lait infantiles)	2ème	+2 348 millions d'euros
Petits ruminants		
Production de lait de chèvre	1ère	613 (1 000 t)
Exportation de fromage de brebis	3ème	9% des exportations en 2017
Production sous signe de qualité		
Lait biologique	2ème	13% de la production en 2016
Lait de montagne	1ère	23% de la production en 2016
AOP laitières	1ère	27% des AOP laitières en 2012

Sources : CNIEL (2019) ; CNIEL (2014) ; Idele (2017) ; Idele (2018a) ; Idele (Idele, 2018b) ; Idèle (2019)

2.7.2. Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits, depuis l'élevage jusqu'à la consommation, et leurs effets

2.7.2.1. Produit non transformé : le lait cru collecté à la ferme

Caractéristiques commerciales du lait cru

Le lait collecté à la ferme est payé aux éleveurs en fonction de la quantité livrée et de critères de composition chimique et microbiologique définis par la législation (*cf*. Chapitre 1). Les critères de composition chimique obligatoires sont les teneurs du lait en **matières grasses et protéiques**, appelées parfois « matières utiles du lait », ainsi que le comptage des **cellules somatiques** et des **germes totaux**. Ces critères de qualité commerciale sont aussi des critères importants des qualités technologique ou sanitaire du lait cru, notamment lorsqu'il est utilisé pour des fabrications de beurre ou de fromage.

Teneurs en protéines et en matières grasses (taux protéique et butyreux) du lait cru

Les facteurs de variation de la teneur du lait en protéines et matières grasses ont fait l'objet de nombreux travaux et synthèses bibliographiques. L'effet de ces facteurs a par ailleurs été modélisé et les modèles obtenus ont été intégrés dans des outils tels que le logiciel INRAtion®, à destination des éleveurs ou des techniciens agricoles.

La teneur du lait en protéines et matières grasses est très variable. Les principaux facteurs de variation sont liés aux caractéristiques des animaux et de l'environnement dans lequel ils sont élevés. Les facteurs animaux sont relatifs à leurs caractéristiques génétiques (espèce, race et différences individuelles), physiologiques (stade de lactation principalement et parité) et sanitaires (mammites notamment). Les facteurs environnementaux sont relatifs à la saison, aux pratiques de traite et surtout à l'alimentation des animaux.

Effet des caractéristiques des animaux

La composition du lait des différentes **espèces de mammifères** est très variable ; la teneur du lait en éléments nutritifs pour le jeune est généralement d'autant plus élevée que la croissance du jeune est plus rapide. Le lait de vache contient en moyenne 32,3 g/kg de protéines et 39,3 g/kg de matières grasses. Le lait de brebis est presque deux fois plus riche en protéines et matières grasses que le lait de vache ou de chèvre.

Parmi les trois principales **races de vaches laitières** élevées en France, la race Prim'Holstein est la plus répandue et la plus productive devant les races Montbéliarde et Normande. Le lait des vaches Prim'Holstein est en moyenne moins riche en protéines (-1,1 g.kg-1) et légèrement plus riche en matières grasses (+0,3 g.kg-1) que celui des Montbéliardes. Les vaches de race Normande produisent un lait plus riche que celui des vaches Prim'Holstein ou Montbéliardes, à la fois en matières protéiques et en matières grasses. Dans la mesure où les différentes races ne sont pas élevées dans les mêmes conditions de milieu, les valeurs moyennes présentées précédemment ne sont pas dues uniquement à un effet de la race au sens strict. Par exemple, lorsque les vaches Prim'Holstein et Montbéliardes sont élevées dans les mêmes conditions, les différences rapportées précédemment sont plus importantes (Ferlay *et al.*, 2010 ; Pires *et al.*, 2015). Chez les **chèvres, seulement deux races** sont largement utilisées en France (Alpine et Saanen). Le lait des chèvres de race Alpine est associé à des teneurs en matières grasses et protéiques plus élevées, par rapport à celui des chèvres de race Saanen, ainsi qu'à une production laitière légèrement plus faible. La race de **brebis** Lacaune, élevée dans le rayon de

Roquefort, est très majoritaire en France. Elle produit plus de lait et son lait est plus riche en matières protéiques et matières grasses que celui des brebis des autres races.

Au-delà de la variabilité observée entre espèces et entre races d'une même espèce, il existe une grande **variabilité individuelle**, y compris lorsque les conditions d'élevage et le statut physiologique des animaux sont identiques. L'amplitude de cette variabilité individuelle est nettement supérieure à celle observée entre races.

Le **stade de lactation** (ou stade physiologique) des femelles laitières joue également un rôle très important sur la production et la composition du lait. Avec l'avancement du stade de lactation, les teneurs du lait en matières grasses et protéiques évoluent inversement à la quantité de lait produite. Entre la fin de la phase colostrale (une semaine après la mise bas) et le pic de production (3 à 7 semaines après la mise bas), la production laitière augmente rapidement chez la vache et la chèvre, alors que les teneurs en matières grasses et protéiques diminuent rapidement. Elles sont minimales au pic de lactation et augmentent ensuite régulièrement jusqu'au tarissement (de l'ordre de +6,4 et +7,0 g/kg, respectivement), lorsque la quantité de lait diminue progressivement (Legarto *et al.*, 2014 ; Sauvant *et al.*, 2012). Chez les brebis, le premier mois de lactation est consacré à l'allaitement des agneaux et la production laitière diminue régulièrement au fil des cinq mois suivants, alors que les taux butyreux et protéiques augmentent régulièrement (de l'ordre de +22 et +15 g/kg, respectivement) (Fraysse *et al.*, 1996 ; Legarto *et al.*, 2014). Les teneurs en matières grasses et protéiques du lait augmentent de façon plus importante quand les femelles sont gravides.

La production laitière des **vaches**, des chèvres ou des brebis est plus faible en première lactation, comparativement aux suivantes, cet effet étant d'autant plus marqué que la première mise bas est précoce. L'effet de la **parité** sur les taux butyreux et protéique du lait de vache est faible ; les variations restent inférieures à 1 g/kg au cours des quatre premières lactations, le taux butyreux ayant tendance à augmenter et le taux protéique à diminuer (Bittante *et al.*, 2015 ; Legarto *et al.*, 2014 ; Yang *et al.*, 2013). Les variations observées entre les deux premières lactations sont d'autant plus importantes que les génisses vêlent jeunes et que leur croissance n'est pas terminée (Legarto *et al.*, 2014). Au-delà de quatre lactations, les taux butyreux et protéiques ont tendance à diminuer, surtout lorsque la mamelle a subi des mammites récurrentes. Chez la **chèvre**, le taux butyreux du lait diminue régulièrement dès la deuxième lactation, de l'ordre de -1 g/kg par lactation supplémentaire (Carnicella *et al.*, 2008 ; Institut de l'élevage *et al.*, 2015 ; Legarto *et al.*, 2014). Les variations du taux protéique sont plus variables. Chez la **brebis**, les taux butyreux et protéiques du lait augmentent entre la première et la troisième ou quatrième lactation, de l'ordre de +10 g/kg et de +3 g/kg, respectivement (Jaramillo *et al.*, 2008 ; Nudda *et al.*, 2003 ; Sevi *et al.*, 2000).

Effet de la saison et de la température

Indépendamment des effets de l'alimentation (fourrages secs à l'étable en hiver *versus* pâturage en période estivale) et du stade de lactation, le lait est globalement plus riche en matières grasses et protéiques pendant les jours courts de l'hiver (+3 et +2 g/kg, respectivement) que pendant les jours longs de l'été, inversement à la production laitière, qui est maximale en juin (+2,5 kg) et minimale en décembre. En fait, les quantités de matières grasses et protéiques sécrétées sont constantes au cours de l'année et les variations observées résultent d'un effet de dilution des matières.

Au-delà d'une température de 25°C, les vaches subissent un stress thermique ; elles ingèrent nettement moins de fourrages et s'abreuvent davantage (Bouraoui *et al.*, 2002). La production laitière est réduite d'autant plus fortement que la chaleur est élevée (de -5 à -30%), ainsi que les teneurs du lait en matières grasses et protéiques, qui diminuent linéairement avec l'élévation de la température (jusqu'à -3 et -2 g/kg, respectivement) (Bertocchi *et al.*, 2014). Les petits ruminants sont considérés comme plus tolérants à la chaleur que les vaches, mais les conséquences de leur exposition au stress thermique sont cependant similaires.

Effet des pratiques de traite

La traite deux fois par jour en salle de traite demeure la pratique la plus répandue. Afin de réduire la pénibilité du travail, certains éleveurs choisissent de moduler la fréquence de traite (passage à une traite par jour, ou monotraite) ou optent pour une traite automatisée (robot). La fréquence et le mode de traite peuvent modifier sensiblement la teneur du lait en matières protéiques et matières grasses.

La **monotraite** est à l'origine d'une baisse de la production laitière relativement importante : elle est en moyenne de -20 à -45% pour les vaches, de -10 à -15% pour les chèvres et les brebis (Pomies *et al.*, 2010 ; Vanbergue *et al.*, 2013). Elle s'accompagne d'une augmentation notable des taux butyreux et protéique (de l'ordre de +3 g et +2 g/kg, respectivement) chez les vaches, du taux protéique seulement chez les chèvres (Lefrileux *et al.*, 2008). La conduite de brebis Lacaune en monotraite a fait l'objet d'essais expérimentaux, qui ont révélé une baisse de la production laitière de -6 à -23%, par rapport à deux traites par jour. Le taux butyreux a eu tendance à diminuer, mais de façon non significative dans la majorité des situations testées, alors que le taux protéique a augmenté, en particulier chez les primipares (+2,6 g/L) (Hassoun *et al.*, 2016).

Dans les élevages bovins, les éleveurs optent de plus en plus pour le **robot de traite**. Environ 4 800 fermes laitières françaises adhérentes au contrôle laitier étaient équipées d'un robot de traite en 2015 (environ 11%), soit deux fois plus qu'en 2010. Les fermes

équipées d'un robot de traites sont plus nombreuses dans le grand ouest et dans les départements laitiers de l'est. En 2014, la France représentait 14% du marché mondial du robot de traite (Idele, 2016)[38]. L'installation d'un robot de traite entraîne une évolution de la fréquence de traite, qui devient très variable selon les vaches ou les jours (1,5 à 4 traites par jour), mais qui en moyenne augmente (2,8 traites par jour). Cette augmentation est à l'origine d'une élévation de la production laitière (de l'ordre de +10%), cependant très variable selon le nombre effectif de traites et les intervalles de temps entre traites. Le surplus de production laitière observé (de l'ordre de +10 à +25%) est dans tous les cas moindre et plus irrégulier que lors du passage de deux à trois traites par jour en salle de traite (Pomies *et al.*, 2010). La traite robotisée entraîne généralement une légère diminution du taux butyreux (-0,2 à -0,8 g/kg), essentiellement due à l'augmentation de la fréquence de traite, et parfois une diminution encore moins sensible du taux protéique.

Effet de l'alimentation des animaux

L'alimentation des femelles laitières a un effet fort sur les teneurs en matières grasses ou protéiques du lait. Cet effet est rapidement observé après l'ingestion et rapidement réversible par la modification du régime. Les éléments à considérer sont le niveau des apports alimentaires, la nature des rations fourragères, les apports d'aliments concentrés ou de matières grasses d'origine végétale. Les variations de production laitière, sans modification des quantités totales de matières produites, peuvent entraîner une variation des taux butyreux ou protéique, par effet de dilution ou de concentration.

Le **niveau des apports alimentaires** (énergétiques et azotés) joue un rôle important sur la production laitière et sur la teneur du lait en matières grasses ou protéiques. Une augmentation du niveau des **apports énergétiques** s'accompagne d'une augmentation de la production laitière et du taux protéique et, en général, d'une diminution du taux butyreux. Autour de la couverture des besoins des animaux, une augmentation du niveau des apports énergétiques d'une unité fourragère lait (UFL - énergie nette contenue dans 1 kg d'orge) par jour s'accompagne d'une augmentation du taux protéique de l'ordre de +0,6 g/kg de lait (Coulon et Remond, 1991). Cette tendance générale est linéaire et valable quel que soit le type de ration, la race ou le niveau de production des vaches. Cette augmentation du taux protéique reste du même ordre de grandeur, que les apports énergétiques soient augmentés par l'utilisation de fourrages de meilleure valeur énergétique ou par une proportion plus importante d'aliment concentré de toute nature. La principale exception notable est liée à l'augmentation de la densité énergétique de la ration par l'addition de matières grasses insaturées (comme le lin par exemple), qui s'accompagne généralement d'une diminution du taux protéique du lait d'environ -1 g/kg. L'augmentation du niveau des **apports azotés** par l'alimentation s'accompagne d'une augmentation de la production laitière, mais n'a pas d'effet notable sur la teneur du lait en matières protéiques et matières grasses. Cette règle générale présente cependant une exception, liée à la composition en acides aminés essentiels (lysine et méthionine) du régime des vaches. Lorsque les apports alimentaires couvrent les besoins énergétiques mais sont limitants pour la synthèse des protéines, l'utilisation d'aliments azotés enrichis en ces acides aminés permet généralement d'améliorer le taux protéique du lait (environ +1 g/kg).

La **nature des fourrages** (pâturage, herbe conservée ou maïs) **a peu d'influence sur le taux protéique** du lait lorsque le niveau des apports alimentaires est identique. Dans la mesure où la densité énergétique des fourrages est variable selon leur nature, en pratique, les laits issus de rations à base d'ensilage de maïs sont souvent plus riches en protéines, car la densité énergétique de la ration est plus élevée. De même, lors de la mise à l'herbe, si les apports des régimes hivernaux ont été limitants, une légère augmentation de la teneur en matières protéiques du lait est observée (+0,5 g/kg en moyenne), alors que si les apports du pâturage sont inférieurs à ceux de la ration hivernale, le taux protéique du lait a plutôt tendance à diminuer.

La **nature des fourrages** a au contraire **un effet important sur la teneur des laits en matières grasses** : comparativement à l'ensilage de maïs, les rations à base d'herbe (pâturage, foin, ensilage d'herbe) sont à l'origine d'un lait dont la teneur en matières grasses est généralement plus faible (de -1,5 à -3,5 g/kg). Il s'agit d'un effet spécifique de l'ensilage de maïs qui apporte des quantités plus importantes de matières grasses et qui, de plus, oriente les fermentations ruminales dans un sens favorable à leur synthèse mammaire (rapport (acétate + butyrate) / propionate plus élevé) (Ferlay *et al.*, 2006).

Les observations faites chez les **petits ruminants** sont inverses à celles relevées en élevage bovin. Comparativement à des rations à base de foin, le pâturage permet en effet la production d'un lait généralement plus riche en matières grasses (de l'ordre de +1 g/kg chez les chèvres et de +4 à +5 g/kg chez les brebis), sans changement notable de la teneur en matières protéiques (environ -0,5 g/kg chez les chèvres et les brebis) (Legarto *et al.*, 2014). Chez les **chèvres**, le lait associé aux rations de foin de luzerne (les plus courantes) est plus riche en matières grasses et protéiques que celui associé à des rations contenant des quantités significatives d'ensilage d'herbe (+0,7 et +0,8 g/kg, respectivement) et peu différent de celui associé à l'ensilage de maïs (+0,5 et -0,4 g/kg pour les matières grasses et protéiques, respectivement) (Legarto *et al.*, 2014). Chez les **brebis**, le lait associé à une alimentation basée sur le foin est moins riche en matières grasses que celui associé à l'ensilage d'herbe (environ -1 g/kg), lui-même moins riche que le lait associé à l'ensilage de maïs (environ -4 g/kg), sans différence notable de teneur en matières protéiquess (Legarto *et al.*, 2014).

---

[38] Idele, 2016. Robots de traite : le nombre d'élevages équipés a doublé depuis 2010 ! http://idele.fr/domaines-techniques/sequiper-et-sorganiser/elevage-de-precision/publication/idelesolr/recommends/robots-de-traite-le-deploiement-continue.html [consulté le 7 janvier 2020]

Dans les élevages où les femelles mettent bas sur une courte période, ce qui est plus fréquent chez les petits ruminants, l'effet propre du type d'alimentation reste difficile à isoler car il est, la plupart du temps, confondu avec celui du stade de lactation et de la saison (Abilleira *et al.*, 2010 ; Inglingstad *et al.*, 2014 ; Soryal *et al.*, 2004).

Les **aliments concentrés**, distribués très fréquemment aux femelles laitières en complément de la ration fourragère, peuvent avoir des conséquences sur les taux butyreux et protéique du lait. Ces aliments peuvent être de natures très diverses (céréales, co-produits de céréales, tourteaux de graines oléagineuses, racines, tubercules, fourrages déshydratés…) et de type plutôt énergétique (céréales) ou énergétique et protéique (tourteaux). La proportion d'aliments concentrés dans la ration peut être très modique ou largement majoritaire. En France par exemple, elle est en moyenne de 20 à 25% dans les rations des vaches laitières et atteint 40% dans les exploitations de type polyculture élevage situées en plaine (CNIEL, 2015).

En règle générale, une **augmentation de la part d'aliments concentrés** dans la ration des vaches, des chèvres ou des brebis, entraîne une **diminution du taux butyreux** du lait. Cette dernière devient très sensible (de -3 à -10 g/kg) quand la proportion de concentré atteint 40 à 65% de la matière sèche de la ration des bovins ou des caprins, notamment avec des céréales riches en amidon associées à des régimes basés sur le foin ou l'ensilage d'herbe. L'apport d'amidon est en effet responsable d'une diminution du pH dans le rumen, qui peut devenir pathologique lorsqu'elle est trop prononcée (acidose ruminale). Elle entraîne une modification des orientations fermentaires du rumen vers la production de propionate, au détriment du butyrate, ce dernier nutriment étant le précurseur majoritaire pour la synthèse mammaire des matières grasses. Cette diminution du taux butyreux du lait, concomitante d'une augmentation de la part de concentré dans la ration, a pu être observée avec différents types de fourrages. Elle s'avère sensible y compris lorsque les proportions de concentrés sont peu importantes, par exemple avec des vaches pâturant en montagne ou recevant des rations basées sur l'ensilage de maïs. Chez les chèvres, ce même phénomène a fréquemment été relevé (de l'ordre de -2 à -7 g/kg de lait) (Schmidely et Sauvant, 2001 ; Serment *et al.*, 2011).

À même niveau d'apport énergétique, la proportion de concentré dans la ration n'a pas d'effet important sur le taux protéique du lait. Cependant, plus de concentré dans la ration va de pair avec une augmentation de la densité énergétique de la ration, elle-même à l'origine de l'augmentation du taux protéique du lait, fréquemment relevée en pratique. Parmi les aliments concentrés énergétiques, ceux qui sont riches en amidon, comparativement à ceux riches en parois (pulpe de betterave par exemple), permettent cependant la production d'un lait un peu plus riche en matières protéiques (Laurent *et al.*, 1992).

Au-delà de la nature et de la proportion de concentré, **la forme et la fréquence de distribution** peuvent avoir des **conséquences non négligeables sur le taux butyreux du lait**, en particulier à partir de 40% d'aliments concentrés dans la ration. De façon générale, les pratiques de distribution qui permettent de limiter les chutes de pH ruminal sont favorables à l'obtention d'un taux butyreux élevé. Elles peuvent également favoriser le bon fonctionnement du rumen, accroître l'ingestion et être ainsi à l'origine d'une augmentation de la production de lait et du taux protéique. En pratique, des chutes importantes de taux butyreux peuvent être constatées si l'aliment concentré est très finement broyé, s'il est apporté en un seul repas ou s'il est distribué seul. Ainsi, les distributions fractionnées et l'utilisation de ration complète (mélange concentré et fourrage) sont des pratiques favorables à l'obtention d'un taux butyreux élevé.

Les **matières grasses d'origine végétale** (ou suppléments lipidiques) sont depuis longtemps intégrées dans la ration des femelles laitières pour en augmenter la densité énergétique (huile de palme notamment en raison de son prix très attractif). Chez les chèvres, elles sont parfois utilisées pour éviter la chute du taux butyreux, souvent observée au printemps, où ce dernier peut devenir inférieur au taux protéique. La quantité de matières grasses intégrée est le plus souvent limitée, de façon à ce que la proportion totale de matières grasses n'excède pas 4 à 5% de la ration. Au-delà, leur introduction a des conséquences importantes sur le fonctionnement du rumen et peut impacter négativement l'ingestion, la production et la composition du lait. Ces matières grasses proviennent de plantes oléagineuses, telles que le colza, le tournesol, le soja ou le lin et sont apportées soit sous forme de graines (entières, broyées ou extrudées), soit sous forme d'huile. Elles sont parfois utilisées sous forme protégée (estérification sous forme de savon de calcium, ou matières grasses encapsulées dans une matrice associant protéines et formaldéhyde, ou enrobées dans une matrice lipidique) pour éviter, en théorie, qu'elles ne soient hydrogénées dans le rumen. Le taux de matières grasses des graines oléagineuses (de 20 à 48% de la matière sèche) est bien supérieur à celui du tourteau correspondant.

L'introduction de matières grasses végétales dans la ration des vaches entraîne dans la plupart des cas une **diminution du taux protéique du lait** (de -1 à -2 g/kg). Les effets de cette pratique sont **variables sur le taux butyreux** du lait, ce dernier étant d'autant plus diminué que les matières grasses ingérées subissent un remaniement important dans le rumen, ce qui n'est pas le cas si ces matières grasses sont saturées ou protégées. Par contre, les matières grasses végétales insaturées, notamment sous forme d'huile, sont fortement biohydrogénées dans le rumen, où sont alors synthétisés des acides gras intermédiaires de la biohydrogénation, qui inhibent la synthèse de novo de matières grasses dans la mamelle. Dans cette situation, la diminution du taux butyreux peut être relativement importante (de-2 à -6 g/kg) (Chilliard et Ferlay, 2004). Elle est d'autre part plus prononcée dans le cadre de rations à base d'ensilage de maïs ou d'aliments concentrés qu'avec des régimes herbagers. **Chez les chèvres et les brebis**, l'adjonction de matières grasses végétales dans la ration entraîne des modifications de composition du lait quasi-inverses. Le taux protéique du lait

de chèvre est amélioré, alors que celui du lait de brebis diminue (environ -1,8 g/kg), comme chez la vache. Pour les deux espèces, il est généralement observé une élévation du taux butyreux du lait (jusqu'à +6 g/kg), qui, chez les chèvres, est plus importante lorsque ces dernières ingèrent du foin, par rapport à une ration d'ensilage de maïs (Gassi *et al.*, 2012 ; Schmidely et Sauvant, 2001).

L'utilisation **d'aliments « non conventionnels »** pour les animaux laitiers se développe et va certainement s'accroître à l'avenir, dans un contexte de compétition entre alimentation humaine *et al*imentation animale. Des coproduits de l'industrie agro-alimentaire sont utilisés depuis longtemps en alimentation animale (tourteaux, drèches de brasserie, pulpe de betterave). Ils tendent actuellement à se diversifier, notamment en région méditerranéenne, où des produits tels que des pulpes de légumes ou d'agrumes, ou des grignons d'olive peuvent être inclus dans la ration des femelles laitières et, plus particulièrement, des chèvres ou des brebis. Ces coproduits ont des caractéristiques très diverses. Ils sont très souvent riches en tannins, saponines ou composés aromatiques. Leurs effets sur les teneurs du lait en protéines et matières grasses sont peu documentés à l'heure actuelle (Vasta *et al.*, 2008). Le plus souvent, le taux protéique n'est pas significativement modifié, mais le **taux butyreux peut varier de manière plus importante**. Par exemple, le taux butyreux du lait de chèvre ou de brebis a été significativement augmenté avec l'intégration dans la ration de grignons d'olive, de feuilles de manioc, de thym ou de romarin. En revanche, il a été nettement diminué par la présence de feuilles d'atriplex ou d'olivier, et plus particulièrement de paille de lentilles. L'incorporation de citrons entiers dans la ration des brebis a eu un effet de réduction non linéaire sur le taux butyreux. Les aliments à base de légumes (marc de tomate, ensilage d'artichaut) sont a priori sans effet sur les taux butyreux et protéique du lait, ceci étant aussi valable dans le cas de rations destinées à des vaches laitières. Ces tendances d'évolution des taux butyreux et protéique du lait ne sont pas toujours liées à des effets de dilution ou de concentration des matières, mais peuvent aussi s'expliquer par des variations de la valeur alimentaire des rations, ou encore par une modification du fonctionnement du rumen en présence de ces substances végétales inhabituelles ou spécifiques (Vasta *et al.*, 2008).

Cellules somatiques du lait cru

Le lait provenant d'une glande mammaire saine est stérile, mais il contient des cellules somatiques en nombre limité. Ces cellules ont soit une origine glandulaire (cellules épithéliales), soit une origine sanguine (globules blancs). Les cellules épithéliales proviennent de la desquamation liée au renouvellement du tissu mammaire et représentent de l'ordre de 10% des cellules dénombrées dans un lait issu d'une mamelle saine. Les globules blancs regroupent différentes catégories de cellules qui toutes interviennent dans la défense de la mamelle face aux agressions qu'elle subit. On répertorie ainsi des macrophages (capables de phagocyter les agents pathogènes et les débris cellulaires), des lymphocytes (impliqués dans les réactions immunitaires) et des polynucléaires (notamment neutrophiles qui sont attirés vers les foyers infectieux pour phagocyter les éléments reconnus comme étrangers). Les évolutions de concentrations cellulaires dans le lait sont essentiellement liées aux variations du nombre de polynucléaires neutrophiles. Le comptage des cellules somatiques dans le lait individuel des vaches est utilisé depuis longtemps pour dépister et maîtriser les mammites dans les élevages. Un niveau élevé révèle un état inflammatoire de la mamelle et donc, indirectement, la présence d'une infection. Les divers germes pathogènes à l'origine de la mammite provoquent une élévation plus ou moins forte du taux de cellules somatiques, de façon différenciée selon l'espèce animale, ainsi que des modifications spécifiques de composition du lait.

Les facteurs de risque de l'apparition des mammites sont liés aux caractéristiques des animaux et à leur conduite. Brièvement, dans les exploitations laitières, la fréquence des mammites est d'autant plus importante que le niveau de production laitière est plus élevé, que les conditions de traite et de logement des animaux sont mal maîtrisées et que des déséquilibres alimentaires sont susceptibles de fragiliser les animaux. Par exemple, la supplémentation des rations en sélénium stimule l'immunité humorale des animaux (Salman *et al.*, 2009) et diminue la concentration en cellules somatiques dans le lait (Ianni *et al.*, 2019). Les mammites survenant essentiellement en tout début de lactation, les conditions de tarissement, de préparation au vêlage et de vêlage jouent également un rôle important.

Le lait de femelles atteintes de mammite est impropre à la consommation humaine et à la transformation, car certains germes responsables de l'infection sont susceptibles d'être pathogènes pour l'homme (*Staphylococcus aureus* ou *Escherichia coli* notamment). Le lait des vaches atteintes de mammite est détourné du circuit de consommation. Dans le lait de mélange du troupeau, une augmentation forte de la numération cellulaire est le reflet de la présence d'une ou de plusieurs vaches infectées dont le lait n'a pas été mis à l'écart.

Des variations physiologiques des numérations cellulaires sont également rapportées chez des animaux exempts de mammite clinique. Elles sont principalement liées aux caractéristiques des animaux. Ainsi, le lait de chèvre est beaucoup plus riche en cellules somatiques que les laits de vache ou de brebis ; ces derniers sont considérés comme sains jusqu'à environ 70 000 cellules/ml, alors qu'un lait de chèvre sain peut contenir de 200 000 à plus d'un million de cellules/ml. Chez des animaux exempts de mammite clinique, le lait des races les plus productives (Prim'Holstein notamment) contient plus de cellules que celui des races moins productives (Abondance ou Simmental Française), mais cet effet n'est pas attribuable au niveau de production dans la mesure où il se maintient à niveau de production équivalent. Intra-race, la numération cellulaire évolue au cours de la lactation de façon opposée à la production laitière par effet de dilution : elle est minimale en 2ème mois de lactation (de l'ordre de 50 000 cellules/ml) et

maximale en fin de lactation (de l'ordre de 200 000 cellules/ml), en raison d'un effet de concentration des cellules excrétées dans un volume de lait produit plus faible. Les vaches primipares présentent des comptages des cellules somatiques plus élevés que les vaches multipares en début de lactation et plus faibles en fin de lactation. Plus généralement, les numérations cellulaires augmentent régulièrement avec le rang de lactation. L'ensemble de ces facteurs de variations ne permettent cependant pas d'expliquer des numérations cellulaires supérieures à 300 000 cellules/ml dans un lait de mélange.

Germes totaux du lait cru

Divers micro-organismes peuvent être rencontrés dans le lait cru. Les plus fréquemment présent sont les bactéries, mais des levures, des moisissures ou des virus peuvent également être présents. Les différents micro-organismes sont le plus souvent utiles pour la transformation du lait (flore d'intérêt technologique, comme les bactéries lactiques par exemple), mais certains peuvent être à l'origine d'altérations de la qualité des produits finis (flore d'altération), ou peuvent être pathogènes pour l'homme (flore pathogène). Les germes totaux (ou flore totale) du lait cru, classiquement dénombrés dans le cadre du paiement du lait à la qualité, représentent l'ensemble des micro-organismes aérobies qui se développent à 30°°C. Cet indicateur, qui dénombre indifféremment les trois catégories de flores citées précédemment, constitue un indicateur global de l'hygiène de la traite, de la collecte et de la conservation du lait cru. Les critères de paiement du lait visent à réduire les germes totaux afin de limiter les occurrences de flore d'altération et surtout de flore pathogène.

Le lait de la citerne de la mamelle des vaches indemnes de toute infection peut être considéré comme stérile. **Lors de la traite, le lait se charge en différents microorganismes** ; la contamination intervient lors de la traite et du stockage, lorsque le lait entre en contact direct avec différents **« réservoirs microbiens »**, que sont principalement les **trayons** de la femelle laitière, les **biofilms** présents à la surface de la tuyauterie de la machine à traire et l'**air ambiant** du lieu où est réalisée la traite.

Au cours des dernières décennies, les évolutions du matériel de traite et la mise en place de pratiques de traite et d'élevage relevant de l'hygiène générale ont permis de réduire considérablement la charge microbienne des laits, qui est passée de plusieurs centaines de milliers/ml à seulement quelques milliers, voire quelques centaines par millilitre. Pour limiter les risques sanitaires identifiés, des actions plus ciblées ont complété ces préconisations d'hygiène générale. Le bienfondé de la réduction systématique de la charge microbienne des laits a, au cours des deux dernières décennies, questionné les filières fromagères au lait cru. En effet, il est maintenant bien établi que **la diversité et l'abondance des communautés microbiennes naturellement présentes dans le lait cru génèrent de la diversité organoleptique dans les fromages**. Les fromages fabriqués avec un lait appauvri en microorganismes (pasteurisé ou microfiltré) sont moins riches en composés volatils et présentent des arômes moins intenses, moins complexes et moins divers que ceux fabriqués au lait cru (Montel *et al.*, 2014). Le niveau et la nature des populations microbiennes du lait cru (plus ou moins protéolytiques) peuvent également moduler la texture des fromages. Enfin, **les populations microbiennes riches et diversifiées du lait cru peuvent exercer un effet barrière** vis-à-vis du développent des germes pathogènes, en particulier *Listeria monocytogenes* (Montel *et al.*, 2014). L'enjeu, pour la transformation fromagère au lait cru, est de produire un lait riche en flore microbienne d'intérêt pour la transformation, qui ne soit pas (ou peu) contaminé par des flores d'altération et qui ne présente pas de flores pathogènes. Les connaissances sur les déterminants de la composition microbiologique du lait cru, bien qu'en cours de développement, sont encore insuffisantes. Elles ont été recensées dans un ouvrage de synthèse coordonné dans le cadre du RMT Fromages de Terroirs (Laithier C. (coord.), 2011).

Malgré la réduction quantitative de la charge microbienne, des différences quantitatives et qualitatives entre les flores d'intérêt technologique et les flores d'altération demeurent dans les laits crus. Ces différences de profils microbiens ne sont pas le fruit du hasard. **Dans les élevages, la communauté microbienne du lait s'élabore durant tout le processus de traite**, au contact direct de la peau des trayons de la vache et de la machine à traire (Montel *et al.*, 2014). La surface des trayons héberge une grande diversité microbienne, dont certains groupes microbiens d'intérêt technologique (bactéries d'affinage par exemple), qui sont également détectés dans le lait (Fretin *et al.*, 2018). Le nettoyage des trayons avant la traite joue un rôle déterminant, les pratiques les plus strictes entraînant une diminution des niveaux microbiens, qui, à l'inverse, sont plus élevés lorsque le nettoyage est plus sommaire. La flore microbienne du lait s'enrichit ensuite au contact de l'équipement de traite, via les biofilms (adhésion de microorganismes) qui se développent sur les surfaces (tuyaux, manchons…), puis s'en détachent partiellement. Cependant, une maîtrise insuffisante du mode d'utilisation des produits de lavage peut entraîner une diminution de la flore microbienne du lait, y compris de la flore d'intérêt fromager (Montel *et al.*, 2014). Par ailleurs, **l'environnement de l'animal est une source très variée de microorganismes** qui pourraient ensemencer le lait de façon indirecte, par l'intermédiaire de l'étable, du pâturage, des fourrages, de l'eau, des litières, des bouses… Par exemple, la population microbienne à la surface des trayons est plus diversifiée quand les vaches pâturent que quand elles sont à l'étable et elle est plus importante quand les vaches sont sur des litières paillées, par rapport à d'autres types de litière (Monsallier *et al.*, 2016). Le nettoyage et l'entretien régulier des locaux (litières, auges, abreuvoirs) et du matériel de traite, ainsi que l'observation d'une hygiène stricte des trayeurs (vêtements, mains) contribuent à préserver l'équilibre de la flore microbienne du lait (Monsallier *et al.*, 2016). L'élimination des parties altérées dans le fourrage, en particulier fermenté,

ainsi qu'une grande vigilance vis-à-vis de l'introduction accidentelle de particules de bouses dans le lait, réduisent les risques de transfert au lait de microorganismes indésirables (flore pathogène ou d'altération).

Lors de la conservation à la ferme à une température inférieure à 8°°C, la croissance des microorganismes du lait est fortement ralentie. La croissance des bactéries mésophiles et thermophiles est pratiquement arrêtée, mais les bactéries psychrotrophes continuent de proliférer, ce qui modifie fortement la proportion des différents groupes bactériens. Après 3 jours de stockage à 8°C ou après 7 jours à 4°C, leur augmentation peut dépasser 3 log UFC (unité formant une colonie) /ml et, en raison de leur forte activité protéolytique et lipolytique, ces développements bactériens peuvent fortement altérer l'aptitude technologique du lait.

2.7.2.2.Propriétés organoleptiques du lait cru

Cet aspect de la qualité du lait a fait l'objet de moins de publications que pour le fromage ou le beurre, vu que le lait cru est très peu consommé en l'état. Il a cependant été établi que les caractéristiques organoleptiques du lait varient de façon perceptible selon les conditions de production, en particulier selon l'alimentation des femelles laitières, ainsi que selon l'espèce et la race.

Couleur du lait

Le lait est un liquide dont la coloration blanche provient des propriétés optiques des protéines. Le lait contient néanmoins des composés responsables d'une **coloration légèrement jaune.** Ces composés sont essentiellement des pigments caroténoïdes (dont plus de 75% de β-carotènes) et de la riboflavine (ou vitamine B_2). Contrairement à la riboflavine, la teneur du lait en β-carotènes a fait l'objet de nombreuses études (Noziere *et al.*, 2006a). Les principaux facteurs de variation sont liés aux caractéristiques des animaux et à leur alimentation. Les laits de chèvre et de brebis ne contiennent que des β-carotènes à l'état de trace et sont nettement plus blancs que le lait de vache, dans la mesure ou presque l'intégralité des β-carotènes absorbés est transformée en vitamine A au niveau intestinal. Il existe également des différences notables de couleur **selon la race bovine**, en partie liées à la teneur en matières grasses du lait, dans la mesure où les caroténoïdes sont liposolubles. Certaines races locales, telles que Guernesey ou Froment du Léon (race bretonne à petit effectif), sont réputées pour la coloration très jaune de leur lait (Noziere *et al.*, 2006a). Parmi les races les plus répandues en Europe, le lait des vaches Jersiaises est plus jaune que celui des vaches de race Prim'Holstein, en raison de sa teneur plus élevée en matières grasses, particulièrement riches en β-carotènes. Les différences de coloration jaune du lait entre les races les plus répandues en France (Prim'Holstein, Montbéliarde, Normande) sont faibles. La concentration du lait en caroténoïdes et sa coloration jaune sont très variables **selon les individus**, y compris d'une même race. Un lien avec les variants génétiques du gène *BCO2* codant pour l'une des enzymes impliquées dans la conversion des caroténoïdes en vitamine A a été démontré chez la vache (Berry *et al.*, 2009). Ces caractéristiques sont donc en partie héritables et il est possible de sélectionner les animaux selon ces critères (Morris *et al.*, 2002). Des données équivalentes pour la riboflavine ne sont pas encore disponibles.

Outre ces effets en lien avec les caractéristiques des animaux, la coloration jaune du lait de vache dépend fortement de **l'alimentation**, en particulier de la teneur en β-carotènes des fourrages ingérés. L'herbe verte pâturée est beaucoup plus riche en β-carotènes que l'herbe conservée et, plus particulièrement, que le foin. L'exposition à la lumière lors du séchage de l'herbe coupée est en effet à l'origine d'une dégradation importante des caroténoïdes, dont la teneur résiduelle dans le fourrage croît depuis le foin séché au sol, le foin séché en grange, l'enrubannage, jusqu'à l'ensilage d'herbe. L'ensilage de maïs est plus pauvre en β-carotènes que l'herbe fraîche ou conservée. Des premiers résultats sont disponibles concernant les facteurs de variation des teneurs du lait en riboflavine selon les conditions d'alimentation des vaches. Ainsi, le lait issu de vaches recevant une ration à base d'ensilage de maïs est systématiquement plus pauvre en riboflavine que le lait de vaches conduites en système herbager (pâturage en été, herbe conservée en hiver). Ceci pourrait résulter d'un effet de concentration de ce composé dans un volume moindre de lait produit chez ces derniers animaux (Laverroux *et al.*, 2014). Ainsi, le pâturage des vaches est à l'origine d'un lait avec une coloration systématiquement plus jaune, par rapport aux fourrages conservés, qui résulte très certainement des augmentations combinées des concentrations en β-carotènes et en riboflavine. Les différences de couleur du lait selon une alimentation à base de foin séché au sol ou d'ensilage de maïs sont peu perceptibles.

Texture du lait cru

La texture du lait cru est peu mentionnée dans les publications scientifiques. Lorsque c'est le cas, elle se décrite essentiellement par des descripteurs tels que texture épaisse, crémeuse ou fluide. Ces descripteurs varient notamment en fonction de la teneur du lait en matières grasses, dont les facteurs de variation sont détaillés dans la section dédiée aux " Facteurs déterminants de la variabilité des propriétés des produits ».

Odeurs et saveurs du lait cru

Les publications sur les odeurs et saveurs du lait traitent essentiellement des effets de l'alimentation des animaux. Cependant, l'espèce animale est aussi déterminante (vache, chèvre ou brebis). Des modifications sensibles de l'odeur peuvent également apparaître en cas de développement de flores microbiennes indésirables lors de la conservation et du stockage du lait à la ferme.

Les études les plus anciennes sur les effets de l'alimentation ont porté sur **l'ensilage d'herbe**. Des défauts de flaveur spécifiques à ce fourrage ont été rapportés lorsque des ensilages en coupe directe, riches en eau et difficiles à conserver étaient distribués aux vaches. Un ensilage mal conservé, distribué dans un local confiné juste avant la traite, peut en effet entrainer dans le lait des flaveurs et/ou des odeurs désagréables (odeur d'ensilage) (Mounchili *et al.*, 2004). Des études plus récentes ont montré que, lorsque les vaches ingèrent de l'ensilage d'herbe bien conservé et distribué dans un local aéré, comparativement à du foin ou de l'ensilage de maïs, les dégustateurs sont capables de distinguer les laits, sans toutefois percevoir de goûts ou d'odeurs désagréables associés à l'ensilage d'herbe (Dubroeucq *et al.*, 2002).

Comparativement au lait cru entier produit par des animaux alimentés avec du foin, celui produit au **pâturage** se caractérise par une flaveur plus forte, notamment par une odeur plus intense, qualifiée par une note « odeur d'étable » plus élevée. Ceci peut s'expliquer par une quantité plus importante de certains composés volatils contenus dans le lait produit au pâturage, comme par exemple le toluène, le scatol ou le diméthylsulfure, ou encore le ρ-crésol, tous à l'origine de flaveurs fortes (Faulkner *et al.*, 2018). Ces composés volatils se forment dans le rumen lorsque les animaux pâturent une herbe jeune, riche en carotènes et en azote rapidement fermentescible. En **élevage caprin**, le lait produit par des chèvres recevant du foin de luzerne a une flaveur chèvre moins prononcée et des flaveurs métallique et oxydée plus perceptibles, par rapport au lait produit par des chèvres alimentées avec de l'ensilage de maïs (Rouel *et al.*, 2002).

Ni la **composition botanique des prairies**, ni l'utilisation **d'extraits végétaux ou d'huiles essentielles** dans l'alimentation des vaches, ne semblent avoir d'effet sensible sur les caractéristiques organoleptiques du lait cru. Ceci a été montré lors de comparaisons de laits crus produits par des vaches alimentées avec des foins de compositions floristiques différentes, y compris des foins enrichis avec des plantes aromatiques spécifiques (achillée millefeuille ou fenouil des Alpes) (Dubroeucq *et al.*, 2002). D'autre part, les dégustateurs ne différencient pas le lait cru de vaches pâturant des parcelles moyennement ou très diversifiées, de celui de vaches pâturant une prairie temporaire peu diversifiée. Ces résultats expérimentaux ont été validés en fermes, notamment en Norvège, dans des systèmes en agriculture biologique ou conventionnelle (Adler *et al.*, 2013a). Cette absence d'effet peut paraître surprenante, dans la mesure où le transfert des composés odorants des plantes aromatiques dans le lait a souvent été décrit. Certains terpènes, constituants principaux des huiles essentielles, sont transférés rapidement des plantes ingérées au lait, sous leur forme native ou après métabolisation. Ce transfert s'observe lors d'ingestion de plantes particulières, riches en terpènes, comme l'achillée millefeuille, le thym serpolet ou le fenouil des Alpes. Cependant, dans le cas d'addition d'huiles essentielles dans la ration des vaches laitières, à hauteur de 120 mg par jour, les constituants de ces huiles (thymol, carvacrol, cinnamaldéhyde et disulfure de diallyle) n'ont pas été retrouvés dans le lait (Hallier *et al.*, 2013). Dans tous les cas, la concentration en terpènes du lait reste certainement inférieure au seuil de perception par des dégustateurs entraînés, qui a pu être estimé entre 0,1 et 1 µl d'huile essentielle par litre de lait (Tornambe *et al.*, 2008). Ces auteurs ajoutent que l'obtention de telles concentrations de composés aromatiques dans le lait ne serait envisageable que si les plantes aromatiques représentaient plus de 15 à 20% de la ration, soit une ingestion d'environ 10 g par jour d'huile essentielle. En revanche, l'introduction d'ail dans la ration des vaches laitières (100 ou 400 g/jour/vache), utilisé à titre expérimental pour réduire les émissions de méthane, a conduit à des laits avec des arômes et des odeurs d'ail marqués, en particulier avec la plus forte concentration (Rossi *et al.*, 2018).

L'effet des **suppléments lipidiques,** de plus en plus utilisés dans les rations des vaches laitières, a également fait l'objet de publications. L'introduction d'huile dans la ration des vaches laitières, fréquemment effectuée à des fins expérimentales, mais assez rarement dans les élevages, entraîne des modifications parfois importantes des caractéristiques organoleptiques du lait cru. Ce phénomène semble lié à la sensibilité plus importante des acides gras insaturés vis-à-vis des phénomènes d'oxydation, qui peuvent être à l'origine de goûts perçus comme des défauts (carton, poisson, métallique). De manière générale, les effets délétères des huiles sur le goût du lait sont d'autant plus marqués que les huiles sont plus insaturées, qu'elles sont apportées en plus grande quantité dans la ration et que la ration est pauvre en antioxydants, susceptibles de prévenir l'apparition de goûts indésirables. Ainsi, la complémentation des rations avec 3 à 5% d'huile de lin (riche en acides gras oméga 3) est à l'origine de défauts de goût qualifiés de « poisson » lorsqu'elle est introduite dans une ration à base d'ensilage de maïs (faible teneur en antioxydants), alors qu'elle provoque des effets beaucoup moins nets, voire non perceptibles, lorsque la ration est plus riche en antioxydants (ration herbagère et/ou supplémentée en vitamine E) (Dubroeucq *et al.*, 2002 ; Lerch *et al.*, 2015). À l'opposé, l'apport d'huile de colza (riche en acide oléique) dans la ration reste sans conséquence sur le goût du lait, l'effet de l'huile de tournesol (riche en acide gras oméga 6) étant intermédiaire. Ces mêmes supplémentations, apportées en quantités équivalentes sous forme de graines, n'altèrent pas les propriétés organoleptiques du lait, vraisemblablement parce que leurs enveloppes sont riches en antioxydants (Lerch *et al.*, 2015). Ce même type d'expérimentation a été mené en élevage caprin, ou aucun défaut de flaveur du lait n'a été relevé, y compris lors d'addition d'huile de lin ou de tournesol oléique (5 à 6 % de la matière sèche) dans des rations à base de foin de luzerne ou d'ensilage de maïs (Rouel *et al.*, 2002).

2.7.2.3. Propriétés nutritionnelles du lait cru

Protéines et acides aminés du lait cru

La teneur du lait en protéines totales est très variable. En revanche, la composition des protéines du lait, exprimée en pourcentage des protéines totales, varie nettement moins. Ainsi, les apports du lait cru en différentes protéines ou acides aminés sont liés directement à la teneur totale du lait en protéines, dont les principaux facteurs de variation sont décrits au 2.2.1.A.1.

En cas de mammite, quelle que soit l'espèce considérée, la proportion de caséines dans les protéines totales diminue, au profit des protéines solubles provenant du sang (Coulon *et al.*, 2002). Au-delà de cet effet de la santé de la mamelle, la proportion des différentes protéines varie principalement selon l'espèce. La proportion de caséines dans les protéines est du même ordre de grandeur pour les trois espèces ; par contre, les différents types de caséines se distribuent différemment avec, en proportion, nettement plus de caséines β et κ et moins de caséine α dans le lait de chèvre, par rapport aux laits de vache ou de brebis. Chez les chèvres, la teneur en caséine α_{S1} est très variable d'un individu à l'autre. Les individus porteurs d'allèles qualifiés de forts (A, B et C) sur le locus codant pour la synthèse de la caséine α_{S1}, produisent un lait riche en cette caséine, alors que les individus porteurs d'allèles qualifiés de moyens (E) ou faibles (D et F), en produisent des quantités nettement plus faibles, voire pas du tout pour les allèles qualifiés de nuls (O) (Skeie, 2014). Par exemple, la sélection des chèvres de races Saanen *et al*pine sur le critère du taux protéique a conduit à une augmentation de la fréquence des allèles forts et moyens, au détriment des allèles faibles, à l'origine d'une augmentation de la teneur du lait en caséine α_{S1} (estimée à +0,22 et +0,50 g/l pour les chèvres Alpines et Saanen, respectivement) (Frattini *et al.*, 2014).

Chez les bovins, le polymorphisme de la caséine β fait l'objet de nombreux travaux depuis les années 1990. Contrairement au variant A2, le variant A1 de cette caséine produit lors de son hydrolyse de la β–casomorphine 7 (ou BCM-7), qui a été suspectée de favoriser différentes pathologies, comme le diabète de type 1 ou les maladies cardiovasculaires, contrairement au variant A2 (Hegde, 2019). Ces suspicions n'ont pas été confirmées par l'EFSA (De Noni *et al.*, 2009), mais l'implication de ce variant A1 dans les inconforts intestinaux a été souvent décrite, en raison de son activité proinflammatoire sur les muqueuses intestinales (Brooke-Taylor *et al.*, 2017). Comme le lait de femme, les laits de chèvres ou de brebis ne contiennent pas de variant A1. Chez les bovins, ce variant est moins répandu dans les races Abondance, Aubrac et Jersiaise que dans la race Prim'Holstein (Grosclaude, 1988). Ces données ont été à l'origine du développement de filières proposant aux consommateurs du lait contenant majoritairement le variant A2 de la caséine β, notamment en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Profil en acides gras du lait cru

La teneur du lait en ses principaux acides gras ou en composés liposolubles dépend en premier lieu de sa teneur totale en matières grasses, dont les principaux facteurs de variation sont décrits au 2.2.1.A.1. Contrairement à celle des protéines, **la composition des matières grasses laitières est très plastique**. Les facteurs de variation sont bien connus et ils ont fait l'objet de plusieurs synthèses bibliographiques récentes (Ferlay *et al.*, 2017 ; Shingfield *et al.*, 2013). Le profil en acides gras du lait et sa teneur en composés liposolubles évoluent très nettement selon l'alimentation des femelles laitières. Les effets des caractéristiques des animaux ou de leur environnement sont beaucoup plus faibles.

Effet des fourrages

Les deux fourrages extrêmes quant à leur effet sur le profil en acides gras du lait sont **l'herbe pâturée** d'une part, **l'ensilage de maïs** d'autre part. Dans tous les fourrages herbagers, les acides α-linolénique, linoléique et palmitique représentent la quasi-totalité des acides gras. L'ensilage de maïs contient moins d'acide α-linolénique que l'herbe fraîche ou conservée, mais se caractérise par davantage d'acides oléique et linoléique. Les rations à base d'herbe fraîche ou ensilée permettent d'accroître la teneur du lait en acides gras polyinsaturés, en particulier en acide α-linolénique (de +0,5 à +0,9 g/100 g d'acides gras totaux), au détriment des acides gras saturés, en particulier acide palmitique (de l'ordre de -8 à -15 g/100 g d'acides gras totaux) (Glasser *et al.*, 2008 ; Schmidely *et al.*, 2008). Ces modifications majeures résultent de l'augmentation des apports en acide α-linolénique par l'herbe et de l'inhibition de la synthèse mammaire des acides laurique, myristique et palmitique par des intermédiaires de la biohydrogénation ruminale des acides gras polyinsaturés (AGPI) ingérés (Ferlay *et al.*, 2017). L'apport d'herbe fraîche induit également une augmentation de l'ensemble des acides gras *trans* (de l'ordre de +2 à +4 g/100 g d'acides gras totaux), principalement due à l'acide vaccénique, l'un des intermédiaires de la biohydrogénation ruminale des AGPI, et à l'acide ruménique, principalement issu de la delta-9 désaturation mammaire de l'acide vaccénique (Ferlay *et al.*, 2017). L'ensemble de ces effets est proportionnel à la part respective d'herbe et d'ensilage de maïs dans la ration.

La **conservation de l'herbe** joue un rôle important sur sa composition. Par rapport à l'ensilage ou l'enrubannage, le foin séché au sol est le mode de récolte qui influence le plus la teneur et le profil en acides gras du fourrage, et ce d'autant plus que le foin est récolté dans de mauvaises conditions (Glasser *et al.*, 2013). Dans ce cas, la proportion d'acide linolénique diminue nettement lors de la fenaison, car il est principalement localisé dans les feuilles, qui sont en partie perdues lors de la récolte. Les techniques de récolte visant à produire un foin de qualité (fauche précoce ou séchage en grange par exemple), riche en énergie et en protéines en

préservant les feuilles, permettent également de récolter un foin riche en lipides, particulièrement en acide α-linolénique. Par rapport à l'herbe fraîche, le processus d'ensilage impacte peu la teneur en matières grasses du fourrage et le profil en acides gras (Glasser *et al.*, 2013). **Dans le lait**, comparativement au pâturage, **les rations à base d'herbe conservée** augmentent les proportions en acides laurique, myristique et palmitique, mais de façon moindre que l'ensilage de maïs. Elles augmentent également le rapport des acides gras oméga 6/oméga 3, et diminuent les teneurs en acides vaccénique et ruménique. La conservation de l'herbe impacte peu la teneur en acide α-linolénique du lait, qui dépend de la teneur du fourrage en cet acide gras. Bien que les foins soient moins pourvus en acide α-linolénique que les ensilages, la teneur du lait associé au foin en cet acide gras est équivalente, voire supérieure, à celle du lait associé à l'ensilage, en raison d'une moindre biohydrogénation ruminale de l'acide α-linolénique.

Le **profil en acides gras** du lait varie selon la **composition botanique** de l'herbe. Dans le cas de prairies temporaires, la proportion de légumineuses, plus riches en feuilles et en matières grasses que les graminées, agit fortement sur la teneur du lait en acide α-linolénique. Cette dernière peut être au moins doublée lorsque la proportion de trèfle violet ou blanc dans la prairie passe de 0 à 100% (Dewhurst, 2013). De même, lorsque les vaches reçoivent des légumineuses riches en tannins, comme le sainfoin, la biohydrogénation ruminale de l'acide α-linolénique ingéré est réduite et sa teneur dans le lait est notablement augmentée. Des mécanismes similaires expliquent également que l'ingestion de fourrages de prairies permanentes de montagne, de par leur plus grande proportion d'espèces diverses riches en métabolites secondaires, entraîne dans le lait une augmentation de la teneur en acide α-linolénique et une réduction de la teneur en acides gras saturés de 12 à 16 atomes de carbone. Des corrélations ont été mises en évidence entre la composition en acides gras du lait et la présence de certaines familles ou espèces botaniques dans les pâturages d'alpage (Collomb *et al.*, 2002).

Comparativement à ces effets propres à la composition et à la diversité botanique des fourrages, celui du **stade de l'herbe** est plus important. Lorsque la maturité de l'herbe augmente, la proportion de feuilles, riches en matières grasses et en acide α-linolénique, diminue, ce qui se traduit dans le lait par une augmentation de la teneur en acide gras saturés, acide palmitique notamment (jusqu'à +6 g/100 g d'acides gras totaux) et une diminution des acides ruménique et α-linolénique (jusqu'à -0,9 et -0,3 g/100 g d'acides gras totaux, respectivement) (Ferlay *et al.*, 2006).

Les modifications de la composition des matières grasses du lait en lien avec différents types de fourrages permettent de **moduler significativement les apports des différentes catégories d'acides gras dans l'alimentation humaine** (Duru et Magrini, 2016). Selon Martin *et al*. (2019), le passage d'une ration à base d'ensilage de maïs à une ration à base de pâturage permet de réduire les apports du lait en acides laurique, myristique et palmitique (contribution aux apports conseillés diminuée de 48 à 41%) et d'augmenter les apports en acides α-linolénique et EPA, dont la contribution aux besoins est doublée, même si elle reste modeste (augmentée de 3% à 6%). Les apports en acides gras de configuration *trans* sont également augmentés de façon notable par le régime à base d'herbe pâturée : de 9% des apports maximums conseillés dans le cas d'une ration à base d'ensilage de maïs, à 21% dans le cas d'une ration à base de pâturage. Cette augmentation est liée principalement à l'augmentation des apports en acides ruménique et vaccénique, qui ne semblent pas avoir d'effet délétères sur la santé, mais qui ne font pas l'objet de recommandations spécifiques à l'heure actuelle. Le pâturage diversifié de montagne accentue les différences entre lait de pâturage et lait issu de ration à base d'ensilage de maïs, alors que les rations à base d'ensilage de maïs avec un accès au pâturage ou les rations à base d'herbe conservée présentent des caractéristiques intermédiaires.

Effet des aliments concentrés

Parmi les concentrés les plus courants, les céréales (orge, maïs) sont riches en acide linoléique, de même que la pulpe de betterave. La luzerne est très intéressante sur le plan de l'acide α-linolénique. Les tourteaux de tournesol et de soja se distinguent par de fortes teneurs en acide linoléique, le tourteau de colza par une forte teneur en acide oléique. De même que pour les fourrages, le choix des concentrés introduits dans la ration des vaches peut modifier le profil en acides gras du lait.

L'introduction d'aliment concentré dans la ration des **vaches laitières** augmente les teneurs du lait en acides laurique, myristique et palmitique, à raison d'environ +1% de ces acides gras saturés pour 10% de concentré en plus. Dans le même temps, lors d'apport de concentrés à base de céréales, la teneur du lait en acide linoléique augmente et la teneur en acide α-linolénique diminue, avec pour conséquence un accroissement du rapport des acides gras oméga 6/oméga 3. Les rations largement complétées avec du concentré conduisent donc à un lait au profil en acides gras moins favorable sur le plan nutritionnel. Ces effets de la proportion de concentré dans la ration, bien documentés pour les vaches laitières, semblent nettement plus faibles chez les petits ruminants (Bernes *et al.*, 2012 ; Martini *et al.*, 2010).

Effet des graines oléagineuses et des huiles

Chez les vaches, les chèvres ou les brebis, la façon la plus efficace d'accroître la teneur du lait en acide α-linolénique est, en dehors de la mise à l'herbe, d'introduire des graines ou de l'huile de lin dans leur ration : des accroissements de la teneur du lait en acide α-linolénique compris entre +0,3 et +2 g/100 g d'acides gras totaux peuvent ainsi être obtenus avec des supplémentations allant de 7 à 30 g/kg de matière sèche de cet acide gras dans la ration (Ferlay *et al.*, 2013a ; Glasser *et al.*, 2008). Des différences entres espèces

existent cependant, les vaches semblant présenter une plus faible efficacité de transfert de l'acide α-linolénique de la ration vers le lait que les chèvres, les brebis apparaissant les plus efficaces (Schmidely *et al.*, 2017). En général, les accroissements sont moins élevés avec des huiles qu'avec des graines entières ou extrudées. Les autres graines ou huiles (colza, soja, tournesol) n'accroissent que faiblement la teneur du lait en acide α-linolénique, du fait de leur faible teneur en cet acide, le tournesol conduisant même à des diminutions systématiques de sa teneur dans le lait, dans la mesure où il en est quasiment dépourvu. À l'inverse, l'accroissement de la teneur en acide linoléique la plus forte est observée avec les graines ou les huiles de tournesol, voire de soja, chez toutes les espèces.

L'utilisation de graines ou d'huiles d'oléoprotéagineux dans la ration des animaux permet par ailleurs une forte réduction de la teneur du lait en acides gras saturés, réduction dont l'intensité est globalement proportionnelle à la quantité d'acides gras à 18 atomes de carbone apportée et au degré d'insaturation de ces apports. Il est ainsi possible de réduire de 5 à 20 g/100 g d'acides gras totaux la proportion d'acides laurique, myristique et palmitique dans le lait, quelle que soit l'espèce considérée (Sibra *et al.*, 2018). Cette réduction de la part des acides gras saturés s'accompagne d'un accroissement systématique de la teneur du lait en acides gras C18:1 *trans*. Parmi ces acides gras de forme *trans*, les teneurs en acides vaccénique et ruménique (ce dernier est principalement issu de la désaturation mammaire de l'acide vaccénique) sont les plus fortement augmentées dans le lait, du moins lorsque les proportions de concentrés ou de glucides rapidement fermentescibles dans la ration restent modestes. Lorsque ces proportions sont plus importantes, la combinaison d'apport de lin et d'aliments concentrés riches en amidon se traduit par une plus grande efficacité du transfert de l'acide α-linolénique dans le lait qu'avec des rations faiblement pourvues en aliments concentrés, mais s'accompagne d'une augmentation de la teneur en acides gras C18:1*trans*, autres que l'acide vaccénique (C18:1*trans*10 et C18:2*trans*10*cis*12) (Saliba *et al.*, 2014 ; Sterk *et al.*, 2011). Des tendances similaires sont observées lorsque la ration contient de fortes proportions d'ensilage de maïs (Chilliard *et al.*, 2007). Par contre, chez la **chèvre**, les régimes riches en aliments concentrés ou en ensilage de maïs et supplémentés en acides gras polyinsaturés entraînent une diminution moindre que chez la vache de la teneur du lait en acides gras laurique, myristique et palmitique, alors que les teneurs en acides gras vaccénique et ruménique augmentent plus fortement. Les teneurs du lait en acides gras *trans* autres que vaccénique et ruménique augmentent moins que chez la vache.

Des **plantes riches en tannins condensés, des extraits végétaux ou des huiles essentielles** peuvent être introduits dans la ration des femelles laitières pour tenter d'améliorer le profil en acides gras du lait. Ceci est fréquemment observé in vitro, mais in vivo, les effets des tannins sont souvent contradictoires, selon leur nature et la composition de la ration, et les effets des huiles essentielles ne sont pas validés (Benchaar et Chouinard, 2009; Ferlay *et al.*, 2010 ; Vasta et Luciano, 2011).

L'utilisation **d'aliments alternatifs** dans la ration des ruminants, souvent riches en métabolites secondaires, se développe. Cependant, peu d'études ont à ce jour été menées pour documenter leurs effets sur le profil lipidique du lait. Sur la base des quelques résultats publiés, les effets observés sont très divers, selon la nature des aliments considérés (Vasta *et al.*, 2008). Il a été relevé par exemple que l'utilisation de marc de tomate ou de grignon d'olive diminue fortement la teneur du lait de brebis en acides gras saturés et augmentent sa teneur en acides gras monoinsaturés (Abbeddou *et al.*, 2011). D'autres aliments alternatifs, comme les feuilles de thym, de romarin, d'atriplex ou d'olivier, n'ont pas d'effet significatif sur les teneurs en acides gras saturés et monoinsaturés du lait, par contre ils augmentent la teneur du lait de chèvre ou de brebis en acides gras polyinsaturés (Boutoial *et al.*, 2013a ; Boutoial *et al.*, 2013b).

Effets des caractéristiques des animaux

Lorsque les femelles laitières sont élevées dans les mêmes conditions, des **effets de la race** sur le profil en **acides gras** du lait ont pu être mis en évidence, même s'ils sont d'amplitude nettement plus faible que ceux de l'alimentation. Une étude récente menée à l'échelle du territoire français montre que le profil en acides gras du lait de vaches de race Prim'Holstein, Montbéliarde ou Normande est assez proche. Les différences les plus importantes ont été observées entre les races Montbéliarde et Normande, le lait de cette dernière étant un peu plus riche en acides gras saturés (+ 2 g/100 g d'acides gras totaux) et un peu moins riche en acides gras mono et polyinsaturés (-1,6 et -0,4 g/100 g d'acides gras totaux, respectivement) (Gele *et al.*, 2014). La même comparaison de races effectuée en conditions expérimentales montre les mêmes tendances (Lawless *et al.*, 1999). Cependant, d'autres auteurs ont observé des tendances inverses, si bien qu'il reste difficile de formuler des règles générales, d'autant plus que des interactions entre la race et le régime ont parfois été observées (Ferlay *et al.*, 2010). Des différences plus significatives apparaissent lorsque les comparaisons concernent des races moins répandues. Par exemple, pour les races françaises, le lait des vaches Salers se distingue de celui des vaches de race Prim'Holstein par des teneurs nettement plus élevées en acides α-linolénique et ruménique, et celui des vaches Tarentaises est moins riche en acide palmitique et plus riche en acide α-linolénique et linoléique que le lait des vaches Montbéliardes (Cozma *et al.*, 2013 ; Ferlay *et al.*, 2006).

Le lait de **brebis** de race Lacaune a une teneur légèrement plus élevée en acides gras saturés (74,2 *versus* 73,0 g/100 g d'acides gras totaux) et polyinsaturés (4,4 *versus* 3,9 g/100 g d'acides gras totaux) et moins riche en acides gras monoinsaturés (19,3 *versus* 20 g/100 g d'acides gras totaux) que celui de brebis de race Manech Tête Rousse (Gele *et al.*, 2014). Il s'agit cependant d'un effet confondant la race, l'alimentation et la localisation, dans la mesure où les brebis de races Lacaune et Manech Tête Rousse sont élevées

respectivement dans la région de Roquefort et dans les Pyrénées atlantiques (France). Concernant les **chèvres**, les laits issus des femelles de races Alpine ou Saanen présentent des profils en acides gras très proches (Gele *et al.*, 2014). Comme pour les vaches, les différences de profils en acides gras du lait de petits ruminants sont plus marquées lorsque la comparaison porte sur des races locales (Sojak *et al.*, 2013 ; Talpur *et al.*, 2009).

En outre, il existe des **variations interindividuelles** importantes de la composition en acides gras du lait (Soyeurt *et al.*, 2008), qui ont fait l'objet de travaux récents, dans la mesure où cette variabilité peut être utilisée pour sélectionner les animaux dont le lait présente un profil en acides gras plus favorable à la santé humaine. Chez les bovins, l'héritabilité de la teneur du lait en acides gras saturés est moyenne à forte (0,25 à 0,36 en moyenne), alors que celle relative aux acides gras insaturés est faible à modérée (autour de 0,13). L'héritabilité de l'ensemble des acides gras semble moins forte pour la race Prim'Holstein que pour les races Normande ou Montbéliarde, pour lesquelles l'héritabilité de certains acides gras peut atteindre des valeurs supérieures à 0,40. Pour les espèces ovine et caprine, l'héritabilité des acides gras saturés ou insaturés est plus modérée (de 0,20 à 0,28) (Boichard *et al.*, 2014).

Le **déterminisme génétique** des proportions des acides gras du lait est potentiellement associé à un polymorphisme génétique. Un premier polymorphisme concerne la Δ9-desaturase mammaire (ou stéaroyl-coenzyme A désaturase – SCD), qui est l'enzyme responsable de la désaturation mammaire en position Δ9 des acides gras à 14, 16 ou 18 atomes de carbone (Bernard *et al.*, 2008). Cette enzyme contribue par exemple à la production mammaire d'acide oléique à partir de l'acide stéarique. Son activité est très variable, indépendamment de la nature de la ration distribuée aux vaches ; il a été montré une héritabilité significative, quoique moyenne (Garnsworthy *et al.*, 2010). Plusieurs allèles ont été mis en évidence ; en comparaison de l'allèle A, l'allèle V réduit la désaturation des acides caprique, laurique et myristique (réduction du rapport acides gras monoinsaturés / acides gras saturés) et augmente la désaturation des acides palmitique et stéarique (accroissement de ce rapport) chez différentes races de vaches (Mele *et al.*, 2007 ; Moioli *et al.*, 2007) ; (Schennink *et al.*, 2008). Un second polymorphisme concerne le gène DGAT1 (diglycéride acyltransférase), qui est l'enzyme responsable du transfert des acides gras vers les diglycérides du lait, avant l'élaboration des triglycérides. Ce polymorphisme est à l'origine dans le lait d'une augmentation de la proportion d'acide palmitique et d'une diminution des proportions des acides myristique, ruménique et C18:1 (Schennink *et al.*, 2008; Schennink *et al.*, 2007).

Chez la **chèvre**, un facteur de variation important de la composition en acides gras du lait est lié au polymorphisme des caséines α_{S1}. Les chèvres porteuses des allèles faibles présentent dans leur lait les proportions d'acides gras palmitique, oléique et ruménique les plus fortes, alors que la proportion d'acide stéarique est réduite, sans modification des acides gras C18:1*trans* ou de la répartition de leurs différents isomères (Chilliard *et al.*, 2006). Corrélativement, l'activité de la SCD est réduite chez les chèvres porteuses des variants qualifiés de forts, qui sont aujourd'hui sélectionnés au détriment des variants faibles, bien que ces résultats restent contradictoires (Valenti *et al.*, 2010). Globalement, lorsque les apports énergétiques permettent de couvrir les besoins de production, les chèvres présentant les variants faibles produisent un lait moins riche en acides oléique et α-linolénique et plus riche en acide palmitique (Valenti *et al.*, 2010). Un autre facteur de variation du profil en acides gras du lait de chèvre est lié au polymorphisme multiple pour le gène codant pour la SCD. Entre les deux haplotypes les plus fréquemment représentés, des différences significatives de teneurs du lait en acides gras stéarique et ruménique et en acides gras polyinsaturés ont été observées (Zidi *et al.*, 2010b). Enfin, des variations significatives de la teneur du lait en acide α-linolénique ont également été associées au polymorphisme génétique pour le gène de l'enzyme LPL (ou lipoprotéine lipase), responsable du prélèvement mammaire des acides gras (Zidi *et al.*, 2010a).

Chez les **brebis**, des associations ont été mises en évidence entre les teneurs du lait en acides linoléique et ruménique et certains gènes (alpha-1-antichymotrypsine ; DGAT2 ; zona pellucida glycoprotein-2) ou entre la teneur du lait en acide α-linolénique et un triplet de gènes (IGF I, lecithin-cholesterol acyltransferase et propionyl coenzyme A carboxylase) (Moioli *et al.*, 2012). Comme chez les vaches et les chèvres, le polymorphisme pour la SCD est en relation avec le profil en acides gras du lait (Garcia-Fernandez *et al.*, 2010).

L'effet du **stade de lactation** sur le profil en **acides gras** du lait est principalement relié au bilan énergétique négatif associé à la mobilisation des réserves adipeuses en début de lactation. Il entraîne un accroissement des teneurs en acides gras oléique et stéarique, ce dernier augmentant au détriment des acides gras saturés à chaîne plus courte chez la vache (Chilliard *et al.*, 1991), la brebis (Pellattiero *et al.*, 2015) ou la chèvre (Balia *et al.*, 2013). Ainsi, chez la vache, la proportion d'acides gras saturés est la plus faible après le pic de lactation et elle s'élève ensuite jusqu'au 6ème mois de +3 à +6 g/100 g d'acides gras totaux, alors que dans le même temps, la teneur en acides gras monoinsaturés diminue et celle en acides gras polyinsaturés reste stable (Gelé *et al.*, 2014a).

Le lait de **vaches primipares** contient un peu moins **d'acides gras** saturés et un peu plus d'acides gras monoinsaturés que celui de vaches en 2ème lactation (autour de -1 et +1 g/100 g d'acides gras totaux, respectivement). Chez la **chèvre**, la teneur en acides gras saturés du lait augmente régulièrement entre la 1ère et la 4ème lactation (de +0,2 à +0,3 g/100 g d'acides gras totaux par an) au détriment des acides gras insaturés. Chez la **brebis**, la teneur du lait en acides gras saturés augmente entre la 1ère et la 2ème lactation (de +1,5 à +2 g/100 g d'acides gras totaux), au détriment des acides gras monoinsaturés. Ces écarts sont plus importants si la 1ère mise bas est précoce (inférieure à 20 mois) (Legarto *et al.*, 2014).

Indépendamment de l'alimentation, il semblerait que la **saison** puisse jouer un rôle sur le profil en acides gras du lait. Le lait produit à la fin du printemps et en été présente une teneur moins élevée en **acides gras** saturés, dont l'acide palmitique (environ -3 g/100 g d'acides gras totaux), et plus élevée en acides gras monoinsaturés, dont l'acide oléique (+2,5 g/100 g d'acides gras totaux), par rapport au lait produit en automne et en hiver (Legarto *et al.*, 2014). Ces effets potentiels sont cependant très peu documentés actuellement.

Une **température** élevée (>25°C) entraîne une modification de la composition des matières grasses du lait, en raison de la sous-alimentation consécutive à la diminution de l'ingestion. Les réserves corporelles adipeuses sont alors mobilisées, entraînant une augmentation des teneurs du lait en **acides gras** à chaîne longue (acides gras stéarique et oléique notamment). Les températures froides (< 0°C) ont des effets moins rapides et de moindre importance.

Les **pratiques de traite** ont un effet modéré sur le profil en acides gras du lait. Chez la vache, des intervalles de traites longs ou très longs (13 à 36 heures entre deux traites, incluant la monotraite), conduisent à une légère augmentation de la teneur du lait en acides gras saturés, au détriment des acides gras insaturés, par rapport à un intervalle classique (11 heures) (Dutreuil *et al.*, 2016), alors qu'un effet inverse a été observé chez des brebis conduites en monotraite (Pulido *et al.*, 2019).

Vitamines du lait cru

L'ensemble des vitamines du lait est un groupe hétérogène de composés, sur les plans de leur nature chimique, de leur concentration, de leur origine et de leur intérêt pour le consommateur, mais également de leur origine à l'échelle de l'animal, si bien que les facteurs de variation sont propres à chacune. Les vitamines sont le plus souvent subdivisées en vitamines liposolubles (A, D, E et K) et hydrosolubles (C et groupe B). La plupart d'entre elles représente en fait une petite famille d'un ensemble de composés chimiquement apparentés.

Le lait de vache contient naturellement l'ensemble des vitamines à des niveaux de concentrations variables (de quelques µg à plusieurs milliers de µg/l). Dans le cas de régimes alimentaires classiques, le lait et les produits laitiers peuvent contribuer très significativement à la couverture des besoins en vitamines A, B_2, B_5, B_9, et B_{12}. Dans un objectif de meilleure valorisation du calcium, le lait et les produits laitiers sont de plus en plus fréquemment enrichis en vitamine D en Amérique du Nord et dans l'Union Européenne (en accord avec les législations spécifiques), en particulier en France, alors que cette pratique est interdite en Allemagne (Zahedirad *et al.*, 2019).

Les apports en vitamines aux ruminants sous forme d'aliment vitaminé, en complément de la ration, modifient la teneur vitaminique du lait, soit par apport direct des vitamines ou par apport de leurs précurseurs (β-carotènes comme précurseur de la vitamine A par exemple), soit indirectement en modifiant la dégradation ou la synthèse des vitamines dans le tube digestif de l'animal. Il a été démontré que les apports en vitamines A, D, E, B_9 et B_{12} augmentent leurs teneurs dans le lait (Ferlay *et al.*, 2013b ; Girard *et al.*, 2016b ; Graulet *et al.*, 2007).

Vitamines liposolubles

La **vitamine A** est un ensemble de composés de la famille du rétinol, qui sont naturellement synthétisés par l'animal à partir de précurseurs spécifiques, les caroténoïdes pro-vitaminiques (principalement les β-carotènes) contenus dans les végétaux. Les **caroténoïdes** et la vitamine A sont transportés par le sang et peuvent être sécrétés dans le lait. Chez la vache, seule une partie des β-carotènes absorbés par l'organisme est convertie en vitamine A. Les laits de chèvre et de brebis ne contiennent pas de β-carotènes, qui sont complètement convertis en vitamine A. La vitamine E regroupe les tocophérols et tocotriénols, dont les principaux représentants décrits dans le lait sont l'α et le γ-tocophérol. L'α-tocophérol est la forme la plus fréquente et la plus étudiée. La vitamine E est synthétisée par les végétaux et sa présence dans le lait résulte de leur consommation par les animaux. Les vitamines D du lait ont une double origine : l'alimentation ou une synthèse endogène au niveau de la peau sous l'action des rayons ultra-violets solaires. Certaines vitamines K sont synthétisées par les plantes, alors que d'autres sont principalement produites par les bactéries du tube digestif de l'animal.

Les facteurs de variation des teneurs en vitamines A et E du lait sont relativement bien documentés, contrairement à ceux des vitamines D et surtout K, pour lesquelles les connaissances sont très fragmentaires. Ces facteurs de variation sont similaires pour les vitamines A et E et sont principalement liés à l'alimentation des animaux. La teneur du lait en vitamine E dépend de celle de la ration (fourrage, aliments concentrés et compléments vitaminiques), alors que celle en vitamine A dépend principalement de la teneur en β-carotènes des fourrages et des apports directs par les compléments vitaminiques.

Les caroténoïdes sont des molécules antioxydantes qui, chez les végétaux, sont associées à l'activité photosynthétique ; ils sont donc principalement localisés dans les feuilles et leur concentration dans les végétaux est d'autant plus importante que le rapport feuilles / tiges est plus élevé. Les principaux facteurs de variation sont ainsi liés à **l'espèce botanique** (légumineuses > graminées > dicotylédones) et, pour une même plante, à son stade phénologique (Noziere *et al.*, 2006a). Cependant, les caroténoïdes, en particulier les β-carotènes, sont photosensibles et sont détruits sous l'effet des rayons ultraviolets. C'est pour cette raison que leur

teneur dans les fourrages conservés est négativement corrélée à la durée d'exposition à la lumière, une fois les fourrages coupés (Adrian *et al.*, 2011) expliquant les faibles teneurs souvent rencontrées dans les foins. La durée de la conservation de l'ensilage (Kalac, 2012) ou du foin réduit encore la concentration en caroténoïdes de ces fourrages, probablement en raison des phénomènes d'oxydation (Noziere *et al.*, 2006a). Les facteurs de variation de la teneur en vitamine E dans les fourrages sont très semblables à ceux des β-carotènes (Graulet *et al.*, 2019; Sickel *et al.*, 2012), bien que certaines particularités aient été mises en évidence pour des plantes d'intérêt agronomique. Par rapport aux caroténoïdes, une différence très notable réside dans les teneurs parfois très élevées de tocophérols dans certaines céréales (blé) et dans les oléagineux (Bramley *et al.*, 2000 ; Graulet *et al.*, 2019; Sato *et al.*, 2018) mais, comme les caroténoïdes, les tocophérols sont très sensibles à l'oxydation et peuvent être très facilement et fortement dégradés au cours de la conservation. Ces pertes sont limitées dans les ensilages lorsque le processus de fermentation est bien maitrisé (Muller *et al.*, 2007).

En conséquence, le lait de **vaches au pâturage** contient des quantités plus élevées de vitamine A, de β-carotènes ou de lutéine, ainsi que de vitamine E, que le lait de vaches alimentées avec du foin ou de l'ensilage de maïs (Agabriel *et al.*, 2007). Par exemple, dans du lait de grand mélange, les teneurs estivales en vitamines A et E ont été plus élevées de 20 à 30% en moyenne, et celles en β-carotène et lutéine ont doublé, par rapport aux teneurs observées lorsque les vaches consommaient des fourrages conservés (Agabriel *et al.*, 2007). En pratique, les variations saisonnières de la teneur du lait en caroténoïdes sont plus importantes que celles relatives aux vitamines A et E, car ces dernières sont également apportées par des suppléments alimentaires vitaminiques inclus dans la ration toute l'année (Agabriel *et al.*, 2007). Contrairement au lait de vache, celui des **petits ruminants** ne contient pas de β-carotènes, qui sont complètement convertis en vitamine A. Chez la chèvre, en comparaison d'une alimentation en bâtiment à base de foin, le pâturage de prairie naturelle ou l'apport de trèfle en vert induit une augmentation de la teneur du lait en vitamines A et E du même ordre de grandeur que chez la vache (Fedele *et al.*, 2005 ; Tyagi *et al.*, 2009).

Parmi les fourrages conservés, les rations **d'ensilage d'herbe** sont à l'origine de teneurs du lait plus élevées en **vitamines A et E et en β-carotènes**, par rapport à des rations de **foin de graminées ou d'ensilage de maïs** (Agabriel *et al.*, 2007 ; Noziere *et al.*, 2006b). Néanmoins, d'autres travaux suggèrent que les légumineuses déshydratées (luzerne) induisent dans le lait des teneurs en vitamine A et caroténoïdes plus élevées que les foins de graminées, ce qui peut être attribué au processus technologique industriel de déshydratation, moins destructeur des caroténoïdes que la fenaison (Duriot *et al.*, 2010).

La **composition et la diversité botanique des prairies** affectent peu les teneurs en **vitamines A et E et en β-carotènes** du lait de vache (Graulet *et al.*, 2012). Néanmoins, le pâturage de prairies contenant des proportions élevées de trèfle blanc (de l'ordre de 20 à 30%) peut induire dans le lait des teneurs en vitamines A et E plus faibles (-0,07 et -0,18 mg/kg, respectivement) que le pâturage de prairies comprenant les mêmes proportions de trèfle violet (Adler *et al.*, 2013a). En revanche, l'avancement du **stade de l'herbe** a un effet plus important que celui de la diversité botanique sur les teneurs du lait en vitamine A et β-carotènes, qui sont fortement réduites lors de l'avancement du stade de l'herbe.

L'augmentation de la **proportion d'aliments concentrés** dans la ration entraîne une diminution de la teneur du lait en **β-carotènes et en vitamines A et E**, en particulier lorsqu'ils se substituent à des fourrages riches en ces constituants.

La teneur du lait en β-carotènes est très variable selon la **race des vaches**. Les vaches de race Jersiaise produisent un lait plus riche en β-carotènes que les vaches de race Prim'Holstein (jusqu'à 2 fois plus), mais plus pauvre en vitamine A (Noziere *et al.*, 2006a). Pour ces composés, les teneurs des laits de vaches de race Prim'Holstein, Montbéliarde ou Tarentaise sont comparables (Graulet *et al.*, 2019; Noziere *et al.*, 2006a). Le lait de vaches Prim'Holstein est par ailleurs plus riche en vitamine E que celui de vaches de race Montbéliarde (Graulet *et al.*, 2019).

La teneur du lait de **petits ruminants en β-carotènes** est très faible, du fait de sa conversion très efficace en vitamine A dans l'intestin. D'une manière générale, les teneurs du lait de chèvre ou de brebis en vitamines A sont supérieures à celles du lait de vache (Graulet *et al.*, 2013) ; elles sont fortement corrélées à la teneur en matières grasses et, de ce fait, les races dont le lait est plus gras est aussi plus riche en ces vitamines (Michlova *et al.*, 2015). Le lait de chèvre semble par ailleurs plus pauvre en vitamines E et D comparé aux autres espèces (Graulet *et al.*, 2013).

Le **stade physiologique** influence également la teneur en **vitamines** du lait. Chez la vache, les teneurs en caroténoïdes, en rétinol et en vitamine E diminuent durant les 3 à 4 semaines après la mise-bas, en raison de l'accroissement de la production laitière durant cette période, puis se stabilisent durant le reste de la lactation (Calderon *et al.*, 2007). Chez la chèvre et la brebis, des variations des teneurs en vitamines A et E similaires à celles observées chez la vache ont été mises en évidence, mais ces effets sont en partie confondus avec celui de la saison et donc probablement aussi avec celui de l'alimentation (Kondyli *et al.*, 2007) ; (Michlova *et al.*, 2015).

Vitamines hydrosolubles

La vitamine C du lait provient de l'ingestion de végétaux ou d'une synthèse au niveau du foie, possible chez les animaux, hormis certains primates. Les vitamines du groupe B sont synthétisées par les micro-organismes (bactéries, levures) et les plantes, sauf la

vitamine B_{12}, qui est produite exclusivement par les bactéries, et la vitamine B_3, dont la synthèse est également possible dans les tissus animaux. Chez le ruminant, les vitamines B présentes dans le lait peuvent provenir de l'alimentation, et/ou de la synthèse ruminale bactérienne. Le bilan de la littérature indique que la dégradation/utilisation ruminale des vitamines B ingérées et leur synthèse par les bactéries varient fortement entre elles et selon les rations (part de fourrage, d'amidon, de fibres NDF, forme d'énergie ; Santschi *et al*. (2005) ; Schwab *et al*. (2006) ; Castagnino *et al*. (2016) ; Beaudet *et al*. (2016) ; Seck *et al*. (2017)) suggérant des disponibilités très variables pour le ruminant.

Les facteurs de variation de la teneur en vitamine C du lait ne sont pas connus et les connaissances sur les vitamines du groupe B sont encore fragmentaires. Ces dernières indiquent que le pâturage, comparativement aux rations à base d'ensilage de maïs, augmente la concentration du lait de vache en vitamines B_2 et B_9 et réduit sa concentration en vitamine B_{12} (Chassaing *et al.*, 2011). Les rations hivernales à base de foin semblent avoir un effet similaire à celui du pâturage sur les vitamines B_9 et B_{12} (Duru *et al.*, 2017a). Comparativement à l'ensilage d'herbe, le foin réduit la teneur du lait en vitamine B_2, mais n'a pas d'effet sur les teneurs du lait en vitamines C, B_1 ou B_6 (Shingfield *et al.*, 2005). Par ailleurs, la diversité botanique de l'herbe pâturée semble réduire la teneur du lait en vitamines B_9 mais n'a pas d'effet sur les teneurs en vitamines B_2 et B_{12} (Chassaing *et al.*, 2011).

Une **part importante d'aliments concentrés** dans la ration des vaches agit positivement sur les teneurs du lait en vitamines B_3, B_6, B_9 et B_{12}, dont la synthèse ruminale est alors accrue. De même, des apports en vitamines B_9 et B_{12} par les AMV (aliments minéraux et vitaminés) augmente la teneur du lait en ces vitamines (Girard *et al.*, 2016b ; Graulet *et al.*, 2007).

Chez les chèvres, des variations saisonnières des teneurs en vitamines B_1, B_2 et C ont été rapportées (valeurs qui tendent à être plus élevées en juin et juillet), qui résultent probablement d'effets confondus du stade physiologique, de la saison et de l'alimentation (Kondyli *et al.*, 2007). Laurent *et al*. (2019) ont récemment montré que les concentrations de vitamines B_6 sont plus élevées dans le lait de chèvres au pâturage, par rapport au lait de chèvres recevant un fourrage conservé (foin, enrubannage ou ensilage de maïs), ces dernières produisant un lait plus riche en vitamine B_{12}.

Minéraux du lait cru

Dans le lait, **les minéraux sont classés en deux catégories** suivant l'importance de leur concentration moyenne : les **macroéléments** (>10 mg/L) et les **oligoéléments** (<1 mg/L). Les principaux macroéléments sont le calcium (Ca), le potassium (K), le phosphore (P), le chlore (Cl), le sodium (Na) et le magnésium (Mg) et les principaux oligoéléments sont le zinc (Zn), le fer (Fe), l'iode (I), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn) et le sélénium (Se) (*cf.* chapitre 1). D'autres éléments sont présents à l'état de trace (soufre, bore, fluor, silicium, brome, molybdène, cobalt, baryum, titane, lithium…).

Les minéraux du lait sont soit présents sous forme de sels en solution dans la phase aqueuse, soit associés aux micelles de caséines et donc sous forme insoluble. Au pH natif du lait, une partie du calcium (70%), du phosphore (55%), du magnésium (33%) et du zinc est liée aux caséines sous une forme colloïdale insoluble. Le sodium, le potassium et le chlore sont complètement solubles dans la phase aqueuse du lait. Ces équilibres, appelés équilibres salins, sont dynamiques et réversibles ; un abaissement de la température ou du pH entraîne une solubilisation partielle du calcium et du phosphore micellaire et inversement.

Le lait et les produits laitiers contribuent de façon importante aux apports en minéraux de la population. Chez les adultes, ils apportent notamment du calcium (40% des apports), du phosphore (24%), de l'iode (22%), du zinc (17%,), du magnésium (9%) et du sélénium (8%) (Anses, 2017d).

Les minéraux présents dans l'organisme des animaux proviennent exclusivement de leur alimentation. Ils passent de la circulation sanguine au lait *via* les cellules de la glande mammaire. Dans le sang, ils proviennent soit directement de l'alimentation, soit des os, où le calcium, le phosphore et le magnésium sont stockés.

Par rapport au lait de vache, le lait de brebis est nettement plus riche en calcium, phosphore, magnésium, zinc et cuivre ; le lait de chèvre présente une composition en minéraux proche de celle du lait de vache, à l'exception de ses teneurs plus élevées en potassium et chlore (*cf*. chapitre 1).

Les facteurs de variation de la teneur des laits en minéraux sont encore mal connus. Les effets des caractéristiques des animaux sont les plus importants, mais des effets significatifs de leur environnement et de leur alimentation ont cependant été décrits.

Effets des caractéristiques des animaux

La **race des vaches** a un effet important sur la teneur du lait en minéraux. Il est bien connu que les laits à forte teneur en matières protéiques ont aussi une teneur élevée en calcium, en magnésium et en phosphore, ces trois minéraux étant majoritairement liés aux caséines. Ceci a notamment été observé pour les races Normande et Jersiaise comparativement à la race Prim'Holstein, dont le lait est moins riche en matières protéiques (Hermansen *et al.*, 2005). Récemment, Gaignon *et al*. (2018)ont confirmé que la teneur en calcium est plus faible dans le lait des vaches de race Prim'Holstein, intermédiaire dans celui des vaches Montbéliardes et plus

élevé dans celui des vaches Normandes. Le potassium, le sodium et le chlore, principalement en solution dans la phase aqueuse du lait, semblent présenter des teneurs plus élevées dans le lait des vaches de race Prim'Holstein.

Au-delà de l'effet de la race, il existe une **variabilité individuelle** importante de la teneur du lait en calcium, dont l'héritabilité rapportée dans la littérature varie selon les auteurs de 0,1 (Toffanin *et al.*, 2015) à 0,6 (Buitenhuis *et al.*, 2015; van Hulzen *et al.*, 2009).

Au cours de la lactation, la teneur du lait en éléments minéraux varie de façon différenciée selon les composés. Les teneurs en sodium, calcium et magnésium baissent jusqu'en milieu de lactation (de l'ordre de -11 à -17%) et augmentent ensuite jusqu'en fin de lactation (presque +100% pour le sodium). À l'inverse, la teneur du lait en phosphore tend à augmenter en milieu de lactation, alors que celle en potassium s'abaisse régulièrement (Gaucheron, 2005). Une étude récente sur le calcium a décrit plus finement les effets du stade de lactation : comme la teneur du lait en protéines, la teneur du lait en calcium chute fortement au cours du premier mois de lactation avant d'augmenter régulièrement jusqu'en fin de lactation, inversement à la quantité de lait produite (Gaignon *et al.*, 2018). Concernant les oligoéléments, il semble que les teneurs en zinc, cuivre et iode diminuent progressivement au cours de la lactation, tandis que la teneur en fer demeure constante ou augmente légèrement en fin de lactation.

Chez la **brebis**, les teneurs du lait en calcium et en phosphore augmentent jusqu'au 140ème jour de lactation environ avant de décroître ; la teneur en potassium diminue avec le stade de lactation, tandis que les teneurs en sodium et chlore augmentent en fin de lactation. Pour le lait de chèvre, les effets observés du stade de lactation sont contradictoires. Certains auteurs ont relevé une diminution importante des teneurs en zinc et en potassium au cours de la lactation, mais n'ont dégagé aucune tendance régulière pour les autres minéraux. D'autres auteurs ont observé une augmentation des teneurs en calcium, phosphore, potassium, magnésium et sodium en cours de lactation.

La teneur minérale du lait est susceptible de varier selon le **rang de lactation des animaux**. Les teneurs du lait en calcium et phosphore diminuent avec l'augmentation du rang de lactation, alors que la teneur en sodium semble augmenter. Cet effet de la parité semble similaire pour les races Prim'Holstein, Montbéliarde et Normande

La **santé de la mamelle**, en particulier les mammites, joue également un rôle important sur les teneurs du lait en minéraux. De façon générale, quelle que soit l'espèce considérée, les mammites entraînent dans le lait une concentration des constituants provenant du sang (protéines solubles, lactoferrine, sodium, chlore…) et une diminution des constituants synthétisés par la mamelle (caséines et minéraux associés (calcium, phosphore, magnésium), matières grasses, lactose) (Coulon *et al.*, 2002). Les variations de composition du lait les plus nettes sont l'élévation des taux de sodium et de chlore (multipliés par deux entre le lait de vaches saines (< 250 000 cellules / ml) et le lait de vaches atteintes de mammite (> 750 000 cellules / ml) et la diminution du taux de potassium (environ -30% par rapport à un lait de vache saine) (Ogola *et al.*, 2007).

Effets de l'alimentation des animaux et de leur environnement

Les apports alimentaires en calcium, magnésium et phosphore ne semblent pas avoir d'effet important à court terme sur leurs teneurs dans le lait, car la synthèse des minéraux dans le lait est fortement régulée par le stockage ou la mobilisation des minéraux dans les réserves osseuses des femelles laitières. Les apports de certains oligo-éléments (fer, cuivre ou zinc par exemple) ne modifient pas leurs teneurs dans le lait, qui sont considérées comme quasi-invariables. En revanche, les apports de potassium, de sodium, d'iode ou de sélénium sont susceptibles de faire évoluer les teneurs du lait, de façon différenciée selon la nature de la ration (Martin *et al.*, 2019).

Les apports alimentaires en iode sont particulièrement efficaces, puisque sa teneur dans le lait varie de façon presque proportionnelle à la quantité ingérée, via les fourrages, les aliments concentrés, les compléments minéraux ou les suppléments en iode (Franke *et al.*, 2009; Schone *et al.*, 2009). Les fourrages (foin ou ensilage d'herbe ou de maïs) sont en moyenne plus riches en iode que les céréales, avec cependant des teneurs très variables pour un même fourrage (par exemple de 29 à 517 µg par kg de matière sèche pour un foin) (Borucki Castro *et al.*, 2011 ; Schone *et al.*, 2017). Il est en effet connu que l'iode contenu dans les sols (de 0,1 à 150 µg/g) peut être à l'origine d'un enrichissement des fourrages au moment de la récolte, en particulier lors de chantiers d'ensilage ou par temps de pluie (Schone *et al.*, 2017). D'autre part, les aliments contenant des glucosinolates (crucifères notamment) réduisent le transfert de l'iode depuis la ration au lait, ce qui explique la faible teneur en iode des laits associés à des rations intégrant du tourteau de colza (Franke *et al.*, 2009). La quantité d'iode apportée par la ration (fourrages et concentrés) est extrêmement variable (de 0,16 à 3,8 mg par kg de matière sèche selon le type de ration) et, dans tous les cas, la plus grande partie de l'iode ingérée par les vaches provient des compléments minéraux ou des suppléments d'iode (Borucki Castro *et al.*, 2011 ; Franke *et al.*, 2009 ; van der Reijden *et al.*, 2018) ont observé que l'apport d'iode par la ration a été plus élevé dans des fermes en agriculture conventionnelle que dans des fermes en agriculture biologique (18,3 mg *versus* 9,8 mg), sans conduire à des différences significatives de teneur en iode des laits issus de l'un ou l'autre système d'élevage (93 µg/L et 55 µg/L, pour les fermes conventionnelles ou biologiques respectivement).

Les apports de sélénium dans la ration des vaches laitières permettent également d'en augmenter la teneur dans le lait (Ceballos *et al.*, 2009 ; Ianni *et al.*, 2019 ; Netto *et al.*, 2019) ont rapporté des élévations de +10 à +40 µg / kg de lait, consécutives à des apports dans la ration des vaches. À l'inverse, chez les brebis, (Pulido *et al.*, 2019)n'ont pas observé d'augmentation de la teneur du lait en sélénium consécutive à un apport dans la ration.

Des **variations saisonnières** de la teneur des laits en minéraux ont souvent été rapportées. D'après Poulsen *et al*. (2015) les teneurs des laits en calcium, magnésium et phosphore sont minimales en été et maximales en hiver, mais ces tendances générales ne sont pas confirmées dans toutes les situations. Van der Reijden *et al*. (2018) et Van de Kamp *et al*. (2019) ont relevé dans le lait de vache des teneurs d'iode presque deux fois plus élevées au mois de mars, lorsque les vaches sont à l'étable, par rapport aux mois de juin ou septembre, lorsque les vaches pâturent. Les **températures chaudes** (> 28°C) peuvent aussi entraîner la production d'un lait moins riche en calcium, phosphore et magnésium (Kamiya *et al.*, 2010). Une étude plus récente centrée sur le calcium du lait a confirmé à grande échelle que la teneur du lait de vache est minimale au printemps et en été et qu'elle est maximale en automne et en hiver (Gaignon *et al.*, 2018). Elle a également permis de montrer que, comparativement aux rations à base d'herbe verte, et dans une moindre mesure d'herbe conservée, les rations à base d'ensilage de maïs sont à l'origine d'un lait plus riche en calcium. Il est cependant difficile de dissocier l'effet propre de l'alimentation de celui de la saison, mais il semblerait que, pour le calcium, il s'agisse bien d'un effet propre de la ration, dans la mesure où, lors de la mise à l'herbe, la teneur du lait en calcium chute brutalement et de façon plus importante dans le cas de rations hivernales à base d'ensilage de maïs, par rapport à des rations hivernales à base d'herbe conservée (Gaignon *et al.*, 2018).

Les **pratiques de traite** modifient peu la teneur du lait en minéraux, hormis la monotraite, qui entraîne une élévation sensible des teneurs en calcium, phosphore (de l'ordre de +50 mg/L), sodium et chlore, et une diminution de la concentration en potassium (Pomiès *et al.*, 2003). La désinfection des trayons avec des produits iodés augmente significativement la teneur en iode du lait de vache ou de chèvre (O'Brien *et al.*, 2013 ; Ovadia *et al.*, 2018). Par exemple, Van der Reijden *et al*. (2018) rapportent des teneurs en iode dans le lait de vache de 97 ou 56 µg/L, selon que des produits iodés sont utilisés ou non pour le trempage des trayons.

2.7.2.4.Propriétés technologiques du lait cru

Qualité fromagère du lait cru

La qualité fromagère du lait cru est une notion complexe, qui renvoie à de nombreux aspects de sa composition chimique et microbiologique et de son comportement lors des différentes étapes de la transformation fromagère (coagulation, acidification, égouttage, affinage…). Dans tous les cas, un bon lait de fromagerie doit permettre d'obtenir un fromage en quantité importante et de bonne qualité (aspect conforme aux attentes, absence de défaut, bonne qualité gustative et sanitaire). La qualité fromagère du lait recouvre entre autres la teneur et la composition des matières protéiques et des grasses, la teneur en minéraux et l'intégrité de l'organisation supramoléculaire de ces macro-constituants. Elle intègre également de nombreux microconstituants comme les cellules somatiques, les microorganismes, les pigments et les antioxydants, les molécules (ou leurs précurseurs) impliquées dans le goût des fromages, la teneur et l'activité des enzymes lipolytiques et protéolytiques (qu'elles soient naturellement présentes dans le lait ou d'origine microbienne), les micropolluants, les contaminants éventuels comme les inhibiteurs, etc… Cette qualité fromagère se décline différemment selon le type de fabrication. Les caractéristiques du lait recherchées varient notamment en fonction du type de fromage (fabrication pâte molle, pressée…), et selon que la fabrication soit avec ou sans standardisation préalable des teneurs en matières protéiques et matières grasses, ou au lait cru ou traité thermiquement.

Rendement fromager

Le rendement fromager est la quantité de fromage obtenue avec une quantité donnée de lait, souvent exprimé en kilogramme de fromage pour 100 L ou 100 kg de lait. Le rendement moyen est de l'ordre de 10 kg de fromage pour 100 kg de lait mis en œuvre, mais il est extrêmement variable selon la teneur en eau du fromage. Par exemple, à partir d'un même lait, le rendement pour fabriquer un fromage à pâte molle comme le camembert, ou un fromage à pâte pressée cuite comme le Comté, sont respectivement de l'ordre de 14 et 9%. Au-delà de la teneur en eau du fromage, ce sont les teneurs en matières protéiques et matières grasses du lait qui conditionnent le rendement fromager. Cette relation est linéaire, y compris lorsque le lait est très riche en matières protéiques (Kerjean, 2018). Afin de prédire le rendement fromager, les équations les plus simples proposées ne tiennent compte que des teneurs du lait en matières protéiques et matières grasses. Elles sont de la forme « rendement = a *x* taux protéique + b x taux butyreux + c », où a, b et c sont des coefficients variables selon le type de fromage. Il est à noter que le coefficient a est souvent supérieur au coefficient b, ce qui traduit une plus grande efficacité des matières protéiques par rapport aux matières grasses, pour l'obtention d'un rendement élevé. En effet, les matières protéiques jouent un rôle prépondérant pendant la fabrication fromagère et elles retiennent en outre une plus grande quantité d'eau que les matières grasses. Les facteurs de variation principaux du rendement fromager sont donc ceux de la teneur du lait en matières protéiques et matières grasses, traités au 2.2.1.A.1.

À même teneur en protéines, le rendement fromager peut être légèrement modulé par la **proportion de caséines dans les protéines** (Cipolat-Gotet *et al.*, 2018b). Les caséines permettent en effet la coagulation du lait et sont retenues dans le caillé. La prise

en compte du taux de caséines à la place du taux protéique améliore peu la prédiction du rendement fromager, dans la mesure où la proportion de caséines dans les protéines est peu variable (Kerjean, 2018). Cette dernière passe de 82,1% à 80,8% pour des laits avec moins de 200 000 ou plus de 400 000 cellules/ml. Elle diminue également en toute fin de lactation ou avec l'avancement de la parité (de l'ordre de -0,8% entre les lactations 1 et 5) (Coulon *et al.*, 1998). Il existe également des petites différences liées à la race. Le lait des vaches Normandes et Montbéliardes présente une proportion légèrement plus élevée de caséines dans les protéines totales, et leurs caséines sont légèrement plus riches en caséines κ que celui des vaches Prim'Holstein (Gelé *et al.*, 2014a). Ces faibles différences entre races sont liées notamment à la fréquence de vaches porteuses du variant B des caséines κ et β, ces dernières produisant un lait dont la proportion de caséines (en % des protéines totales) est plus élevée que celui des vaches portant le variant A (Coulon *et al.*, 1998). Chez la **chèvre**, le polymorphisme de la caséine α_{S1} a fait l'objet de nombreux travaux au cours des dernières années, car il est associé à des teneurs du lait en caséines très variables. Les allèles qualifiés de forts (A, B et C), comparativement aux allèles qualifiés de moyens (E), faibles (D et F) ou nuls (O), conduisent à un lait dont la teneur en matières grasses est plus élevée, ainsi que la teneur en caséines et le rendement fromager (de l'ordre de +6 g/kg et +15%, respectivement) (Coulon *et al.*, 2005 ; Grosclaude, 1988). En France, la sélection des chèvres de races Saanen *et al*pine, entre 2004 et 2012, a conduit à une augmentation de la fréquence des allèles forts et moyens, au détriment des allèles faibles. Cette sélection est à l'origine d'une augmentation de la teneur du lait en caséine α_{s1} (estimée à +0,22 et +0,50 g/L pour les chèvres alpines et saanen, respectivement), assurant ainsi un meilleur rendement fromager, qui reste supérieur pour la race Alpine (+1,31%), en raison de sa plus grande richesse en matières grasses (+4,2 g/kg) (Frattini *et al.*, 2014). Chez la **brebis**, plusieurs phénotypes des caséines, de la β-lactoglobuline et de l'α-lactalbumine ont également été identifiés, mais leurs propriétés technologiques ne sont pas toutes connues. Les plus fréquents sont les variants C et B de la caséine α_{s1}, ainsi que les variants A de la β-lactoglobuline et de l'α-lactalbumine. Ces variants se retrouvent chez de nombreuses races, alors que d'autres sont rares ou typiques d'une race (par exemple le variant D de la caséine α_{s1} pour la race Sarda). À l'heure actuelle, les liens entre le polymorphisme des protéines du lait de brebis et ses qualités technologiques font encore l'objet de controverses (Barillet, 2007 ; Giambra *et al.*, 2010). Les auteurs s'accordent néanmoins sur le fait que les variants A de la β-lactoglobuline et C de la caséine α_{s1} sont les plus favorables à la transformation fromagère. Le variant C de la caséine α_{s1}, comparativement au variant D, a notamment été associé à des laits plus riches en matières protéiques et en caséines, avec un temps de coagulation plus court, un gel plus ferme et un rendement fromager plus élevé. Les fromages issus de ce lait ont été plus gras, laissant supposer des différences de texture (Amigo *et al.*, 2000 ; Coulon *et al.*, 2005 ; Pirisi *et al.*, 1999).

L'alimentation a peu d'influence sur la proportion de caséines dans les protéines totales, vu que les variations du taux protéique obtenues par l'alimentation des animaux sont corrélées au taux de caséines.

La **taille des globules gras** est également impliquée dans les variations du rendement fromager. À même teneur en matières grasses, le rendement fromager est légèrement supérieur si le lait contient des globules gras de petite taille, donc davantage de membranes qui retiennent davantage d'eau dans le caillé, par rapport à des globules gras de plus grande taille (Couvreur *et al.*, 2007). Le pâturage des vaches, par rapport à une ration basée sur l'ensilage de maïs, conduit à des globules gras de plus petite taille dans le lait (environ -0,25 µm) ; ceci peut aussi être le cas lors d'introduction de graines oléagineuses ou d'huiles dans la ration, mais les résultats rapportés sont parfois contradictoires. Le lait de vaches de races dites productives (Prim'Holstein ou Brune par exemple) contient de plus petits globules gras que celui de vaches de races dites « beurrières » (Normande par exemple). Enfin, une réduction de la taille des globules gras est observée lors de l'avancement du stade de lactation (Couvreur *et al.*, 2007 ; Hurtaud *et al.*, 2010).

Aptitude à la coagulation

La coagulation du lait constitue la première étape de toutes les fabrications fromagères. L'aptitude du lait à coaguler sous l'action de la présure a fait l'objet de nombreux travaux, contrairement à l'aptitude du lait à l'acidification. Un lait présentant une bonne aptitude à la coagulation coagule rapidement et conduit à un gel (ou caillé ou coagulum) ferme, apte à subir les traitements physiques des opérations de tranchage puis d'égouttage.

Le temps de coagulation, c'est-à-dire la durée entre l'introduction de la présure dans le lait et son passage à l'état solide, est étroitement corrélé au pH du lait. La coagulation est d'autant plus rapide que le pH est plus bas, car l'activité de l'enzyme coagulante (la chymosine) est optimale à pH acide. Lorsque le pH du lait passe de 6,8 à 6,6, le temps de coagulation est réduit de 30% environ (Macheboeuf *et al.*, 1993). En pratique, le pH du lait et le temps de coagulation peuvent être contrôlés dans les cuves de fabrication par les techniques de maturation (nature et dose des ferments, durée, température). Le temps de coagulation varie essentiellement sous l'effet des caractéristiques des animaux et, dans une moindre mesure, de leur alimentation (Bittante *et al.*, 2015). Les laits riches en **cellules somatiques**, en cas de mammites principalement, ou provenant d'animaux en fin de lactation, ont un pH élevé et coagulent lentement. Les **caractéristiques génétiques des animaux** jouent également un rôle important. La variabilité interindividuelle du temps de coagulation du lait est très élevée. Elle est liée en partie aux variants génétiques des lactoprotéines. Par exemple, le variant B de la caséine κ est associé à des temps de coagulation plus courts (Macheboeuf *et al.*, 1993). Les différences observées entre **races** résultent en partie de la répartition différentielle des variants des caséines dans leur lait. Le lait des vaches Prim'Holstein par exemple coagule plus lentement que celui des vaches Montbéliardes ou Normandes. Certains variants rares,

spécifiques à certaines races, peuvent avoir des effets très importants, comme par exemple, le variant I de la caséine κ rencontré chez la race Salers. Ce variant très rare se caractérise par une mutation sur le site d'action de la chymosine et, par conséquent, par une coagulation du lait très ralentie (durée 3 à 4 fois supérieure), sans dégradation de la fermeté finale du caillé (Bianchi *et al.*, 2014). **L'héritabilité** du temps de coagulation du lait est relativement faible, comprise entre 0,2 et 0,3, mais une sélection génétique sur ce critère est possible (Bittante *et al.*, 2013 ; Cecchinato *et al.*, 2015). L'effet des **facteurs alimentaires** est marginal et souvent confondu avec ceux de la saison (coagulation plus rapide en été) et du stade de lactation des animaux.

La fermeté du gel est mesurée différemment selon les auteurs : soit 30 mn après l'introduction de la présure, soit après un temps de raffermissement proportionnel au temps de coagulation. Cette dernière mesure est préférentiellement utilisée par les fromagers qui, dans la pratique, tiennent compte du temps de coagulation avant de découper le caillé. La fermeté du gel mesurée 30 mn après l'introduction de la présure est d'autant plus forte que la coagulation a été rapide. La fermeté du gel mesurée après un temps de raffermissement proportionnel au temps de coagulation n'est pas corrélée au temps de coagulation. Elle varie essentiellement en fonction de la **teneur du lait en caséines (Sanchez *et al.*, 2019)**, elle-même dépendante du taux protéique du lait, dont les facteurs de variations sont décrits au 2.2.1.A.A1. À même teneur en matières protéiques, la fermeté du gel est améliorée lorsque les proportions de caséines κ, β et α_{s1} augmentent et proportions de caseine α_{s2} et de β-lactoglobuline diminuent (Amalfitano *et al.*, 2019). Les variations résiduelles de la fermeté du gel sont liées principalement aux **caractéristiques des animaux** (état sanitaire et variants des caséines κ et β essentiellement). Les caillés issus de laits riches en **cellules** ou de fin de lactation se raffermissent mal et s'égouttent mal. Les animaux porteurs des variants B des caséines κ et β donnent des laits qui conduisent à des gels plus fermes, qui sont plus faciles à travailler et qui permettent d'obtenir un meilleur rendement fromager, car les matières grasses sont mieux retenues dans le réseau protéique lors du tranchage du caillé (Grosclaude, 1988 ; Macheboeuf *et al.*, 1993). Cet effet des variants des caséines κ et β explique que les caillés issus de vaches de race Montbéliarde soient plus fermes que ceux issus de vaches de race Prim'Holstein (Macheboeuf *et al.*, 1993). L'héritabilité de ce caractère est élevée ; elle est comprise entre 0,4 et 0,5 en race Montbéliarde par exemple (Sanchez *et al.*, 2019). À même taux protéique, les effets de l'alimentation ou de l'environnement des animaux sont marginaux.

Intégrité des protéines

L'intégrité des micelles de caséines du lait est recherchée pour un bon déroulement des premières étapes de la transformation fromagère (coagulation, égouttage). Dans le lait, les caséines sont présentes sous forme d'un assemblage entre les quatre caséines (α_{s1}, α_{s2}, β et κ) et des minéraux, calcium et phosphore majoritairement. Cet assemblage est en équilibre avec la phase soluble du lait et évolue en fonction des changements de température ou d'acidité du lait pendant les traitements technologiques qu'il subit. Ainsi, il existe une part des caséines présente sous forme soluble dans le lait de vache qui augmente au cours du stockage à 4°C, de +100% après 24 heures et de +300% après 48 heures. D'après la littérature, il est établi que l'augmentation de la quantité de caséines solubles est essentiellement due à une solubilité accrue de la caséine β. En effet, celle-ci étant la plus hydrophobe des quatre caséines, les liaisons qu'elle établit au sein de la micelle font probablement intervenir préférentiellement des interactions hydrophobes. Contrairement aux autres types de liaisons (électrostatiques, ioniques, Van der Waals), ces interactions sont affaiblies aux basses températures, favorisant de ce fait la libération et le départ de la caséine β vers la phase soluble (Ali *et al.*, 1980 ; Walstra, 1990).

Dans le lait utilisé en fromagerie, les caséines peuvent également être dégradées sous l'action d'enzymes protéolytiques naturellement présentes dans le lait, comme la plasmine, ou d'enzymes d'origine microbienne. Par exemple, la caséine β est hydrolysée en caséine γ sous l'action de la plasmine. La protéolyse des caséines est ainsi d'autant plus importante que le stockage du lait après la traite est long et que le développement bactérien est important. Elle est en lien notamment avec la flore totale du lait utilisé en fabrication. Dans les laits en sortie de mamelle, des variations de la teneur et de l'activité de la plasmine ont été rapportées. La plasmine est une enzyme qui provient du sang des animaux, son activité dans le lait est d'autant plus importante que la perméabilité de la mamelle aux éléments du sang est élevée. Elle est plus importante dans les laits de fin de lactation et surtout en cas de mammites (Auldist *et al.*, 1996 ; Bastian *et al.*, 1991 ; Politis *et al.*, 1989). L'activité de la plasmine du lait semble plus élevée en alpage que dans les vallées (Bugaud *et al.*, 2001) et des variations corrélées avec la composition botanique des prairies ont également été mises en évidence (Buchin *et al.*, 1999), mais l'origine de ces différences reste mal comprise (effets possible de l'altitude, de la marche des vaches, d'une restriction alimentaire).

Intégrité des globules gras

La **lipolyse** est un critère important d'évaluation de la qualité du lait, utilisé comme critère de paiement du lait à la qualité par certaines laiteries. La lipolyse du lait consiste en une hydrolyse des triglycérides, lipides majoritaires des globules gras du lait. Les acides gras ainsi libérés, en s'accumulant et en s'oxydant, sont responsables de l'apparition de défauts de goût dans le lait et les produits laitiers (goût rance ou de savon par exemple), goûts non tolérés par les consommateurs. Il existe trois types de lipolyse : la lipolyse spontanée, la lipolyse induite et la lipolyse microbienne.

La **lipolyse microbienne** est le produit de l'action des enzymes microbiennes sur les globules gras du lait. Elle résulte de l'action des lipases sécrétées par les microorganismes, essentiellement par les germes psychrotrophes, qui constituent l'essentiel de la flore des laits refroidis. Ce type de lipolyse est donc étroitement lié au problème de la qualité bactériologique du lait (Chilliard et Lamberet, 1984). La lipolyse microbienne devient significative après 3 à 4 jours de stockage du lait, lorsqu'il est de qualité sanitaire satisfaisante.

La **lipolyse spontanée** et la **lipolyse induite** correspondent à l'hydrolyse des triglycérides par une lipase naturellement présente dans le lait, la lipoprotéine lipase (LPL). L'action de cette enzyme se poursuit au cours du refroidissement du lait. Elle dépend de l'animal et des facteurs d'élevage décrits ci-dessous. Cette lipolyse, qualifiée de spontanée, est accentuée par les chocs mécaniques et thermiques que subit le lait pendant la traite ou le stockage. Ces chocs fragilisent les globules gras, ce qui facilite l'action de la LPL. En pratique, dans les élevages, il n'est pas possible de dissocier la lipolyse spontanée de la lipolyse induite dans les laits de tank. La lipolyse induite dépend principalement de la conception et de l'entretien de la machine à traire (éviter les coudes, les petites sections de lactoducs, les entrées d'air excessives, la surtraite des vaches) et du tank de stockage (refroidissement trop lent ou trop brutal, agitation excessive…).

La **lipolyse spontanée** résulte d'une interaction complexe entre les pratiques d'élevage, la physiologie animale et la génétique. Ses principaux facteurs de variation ont été étudiés dans les années 1980 et ont fait l'objet de publications et d'une large diffusion auprès des éleveurs. La lipolyse spontanée est plus importante en début et en fin de lactation et, à l'échelle d'une journée, elle est d'autant plus forte que l'intervalle entre traites est plus court : elle est ainsi supérieure dans le lait de la traite du soir et lorsque le nombre de traites quotidiennes est augmenté (robot de traite par exemple) (Abeni *et al.*, 2005 ; Chazal et Chilliard, 1986; Wiking *et al.*, 2006). La fréquence de traite module les enzymes impliquées dans la synthèse du lait, telles que la LPL, ce qui expliquerait les différences observées. L'alimentation, que ce soit sur le plan quantitatif (quantités ingérées) ou qualitatif (nature du fourrage, supplémentation lipidique...) est un facteur clé dans l'induction de la lipolyse spontanée chez la vache laitière. Une restriction alimentaire (-20% à -25% de l'ingéré) entraîne une augmentation de la lipolyse spontanée, quel que soit le stade de lactation (Vanbergue *et al.*, 2018). La lipolyse est plus importante lorsque les animaux sont nourris avec de l'ensilage de maïs ou avec une ration complémentée avec des graines oléagineuses (lin par exemple) ou des micro-algues, par rapport à une conduite au pâturage (Ferlay *et al.*, 2006 ; Vanbergue *et al.*, 2017).

La lipolyse du lait varie également sous l'effet de facteurs génétiques. Le lait des vaches Normandes, Tarentaise ou Jersiaise est moins sensible à la lipolyse que celui des vaches Montbéliardes, Prim'Holstein ou Salers (Cozma *et al.*, 2013; Ferlay *et al.*, 2006). Il existe aussi une variabilité individuelle très forte. Vanbergue *et al*. (2017)ont identifié deux types de phénotypes concernant la susceptibilité des vaches laitières à la lipolyse spontanée : type « non susceptible » (lipolyse spontanée inférieure à 0,60 milliéquivalent d'acide oléique (mEq) / 100 g de matières grasses (MG) sur l'ensemble des prélèvements de lait réalisés sur toute la lactation) ou type « susceptible » (supérieure à 0,89 mEq/100 g de MG sur plus de 10% des prélèvements de la lactation). Cet effet de l'animal s'explique en partie par le polymorphisme du gène DGAT-1 (diglycéride acyltransférase), qui est l'enzyme responsable du transfert des acides gras vers les diglycérides du lait, avant l'élaboration des triglycérides. Les animaux de type KK sont plus susceptibles de produire un lait sensible à la lipolyse, comparativement aux animaux de type KA ou AA (Vanbergue *et al.*, 2016).

L'ensemble des facteurs de variation de la lipolyse spontanée est résumé dans la figure 2.7.1. Les effets des différents facteurs peuvent être cumulatifs et, en pratique, la lipolyse est souvent supérieure dans les laits d'été, en raison notamment des difficultés de refroidissement du lait liées aux températures ambiantes plus élevées.

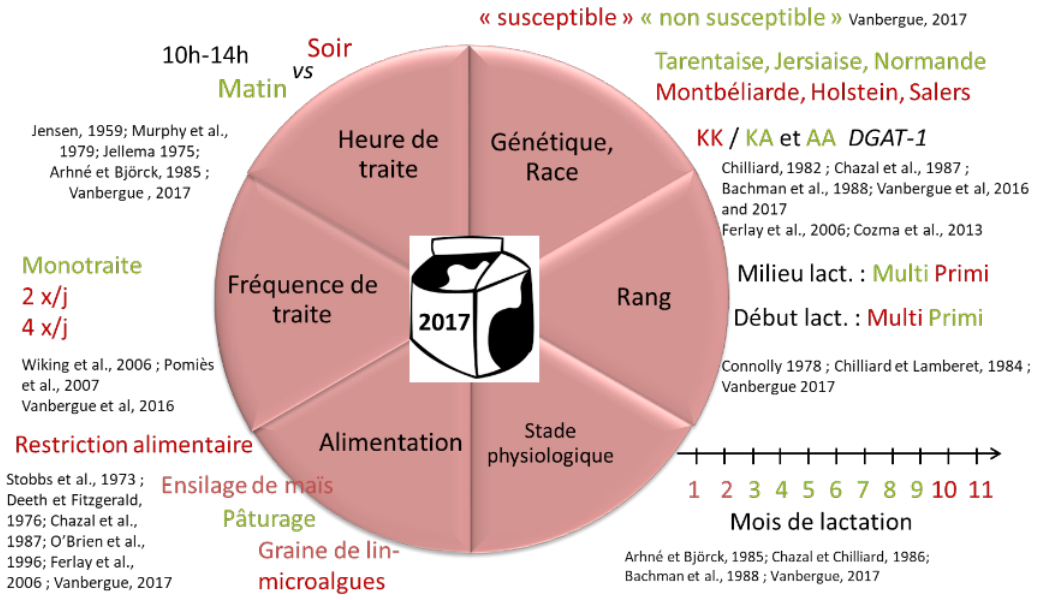


Figure 2.7.1. Facteurs influençant la lipolyse spontanée du lait (en rouge facteurs d'élévation de la lipolyse du lait, en vert facteurs de réduction de la lipolyse du lait) (d'après Vanbergue (2017))

Flores indésirables

La composition et les facteurs de variation de la flore microbienne qualifiée de totale sont abordés dans le paragraphe 2.2.1.A.A.3. Outre les quelques germes pathogènes susceptibles d'être présents dans le lait, la très grande majorité des microorganismes présente un intérêt technologique (par exemple bactéries lactiques ou propioniques, levures, moisissures). Certains microorganismes, qualifiés d'indésirables, sont néanmoins à l'origine d'une altération des constituants du lait lors de la conservation ou de défauts dans les fromages, notamment au lait cru. Il s'agit par exemple de microorganismes de la famille des butyriques, des coliformes ou des bactéries psychrotrophes.

Les *Clostridium tyrobutyricum* (ou **butyriques**) sont responsables d'une fermentation butyrique qui produit de l'acide butyrique et de l'hydrogène, à l'origine de défauts de goûts ou d'ouvertures dans les fromages à pâte pressée (Laithier C. (coord.), 2011). Lorsqu'ils sont sous forme sporulée, les butyriques ont une durée de vie quasiment illimitée, du fait de leur grande résistance à la chaleur (non détruits par la pasteurisation) et à de nombreux agents chimiques (Baraton et Mage, 1985). Les spores butyriques présentes dans le sol peuvent contaminer le fourrage au moment de la récolte, ce phénomène pouvant être amplifié par des épandages répétés de lisier, dans lequel ces spores se concentrent et survivent. La conservation sous forme d'ensilage, en particulier en cas d'acidification lente, est très propice à leur développement (absence d'oxygène, température et pH). Les animaux ingèrent les spores butyriques avec l'ensilage, ces dernières se retrouvant ensuite en quantité importante dans les bouses, considérées comme le principal point de salissure des trayons et donc de contamination du lait. Si l'hygiène autour de la traite est mal maîtrisée, le lait peut être contaminé à ce moment-là par l'intermédiaire de petites particules de bouses (2 g peuvent générer 200 000 spores butyriques dans 100 L de lait, niveau de contamination jugé dangereux) (Baraton et Mage, 1985). Le risque accru de contamination du lait par des spores butyriques est à l'origine de l'interdiction de l'ensilage d'herbe dans certaines filières fromagère (Parmesan ou Comté par exemple).

Les **coliformes** sont des bactéries regroupées sous le terme de coliformes totaux. Ce sont des bactéries à croissance très rapide, qui produisent dans le lait ou le fromage des gaz (CO_2, H_2, acide acétique) à l'origine de gonflements qualifiés de précoces dans les fromages. Ces microorganismes, d'origine fécale, sont présents dans le tube digestif des vaches. Ils constituent des traceurs d'hygiène globale de l'environnement des vaches et de la conduite de la traite. La contamination du lait peut se faire par l'intermédiaire de trayons ou de litières souillés. Les germes coliformes sont également présents dans les biofilms situés sur les surfaces du matériel de traite (Laithier C. (coord.), 2011).

Les **bactéries psychrotrophes** ont la capacité de se multiplier au froid, lors de la conservation du lait à la ferme. Elles produisent des lipases ou des protéases, généralement thermostables, à l'origine de défaut de goût dans les fromages ou d'aspect de leur croûte (pigmentation jaune ou surface poisseuse) (Laithier C. (coord.), 2011). Les *Pseudomonas,* qui font partie de cette catégorie, sont présents dans les environnements des animaux, notamment à la surface des trayons, dans l'eau utilisée pour le nettoyage ou encore dans les fourrages (Montel *et al.*, 2014).

Des guides de bonnes pratiques pour la production de lait exempt de flore d'altération ou pathogène ont été publiés par les instituts techniques. Ils mettent généralement l'accent sur le renforcement des mesures d'hygiène dans les environnements des animaux, en

particulier lors de la traite. Cette stratégie vise à éliminer les flores indésirables du lait, mais elle peut également réduire de façon drastique les flores d'intérêt pour la fabrication fromagère et, ainsi, favoriser le développement de flores indésirables ou pathogènes, en raison de l'absence de compétition entre groupes microbiens. Il a été démontré que la présence d'une nombreuse flore microbienne d'intérêt peut exercer un effet protecteur du lait contre le développement de flores indésirables dans le lait cru (Montel *et al.*, 2014). Ces différentes stratégies font aujourd'hui l'objet de débat dans les filières fromagères au lait cru, ainsi que dans la communauté scientifique.

2.7.2.5. Propriétés sanitaires du lait cru

De très nombreux dangers biologiques peuvent être retrouvés dans le lait cru (Afssa, 2008a). La maîtrise de la présence des dangers dans le lait cru repose notamment sur l'hygiène de la traite et la bonne gestion sanitaire du troupeau (exemple du traitement des mammites à staphylocoques). Des exigences réglementaires particulières concernant la production et la mise sur le marché du lait cru existent en France et en Europe (Anses, 2015a).

Selon un avis récent de l'EFSA (Andreoletti *et al.*, 2015), les dangers microbiologiques significatifs liés à la consommation du lait cru sont au niveau européens : Brucella melitensis, Campylobacter spp., Mycobacterium bovis, Salmonella spp., les Escherichia coli producteurs de shigatoxines (STEC) et le virus de l'encéphalite transmise par les tiques (TBEV). D'après les données épidémiologiques, Campylobacter, Salmonella et les STEC sont les plus répandus au niveau européen. Campylobacter est le premier agent responsable d'épidémies liées à la consommation de lait cru en Europe (Andreoletti *et al.*, 2015).

Compte-tenu de la faible consommation du lait cru en France, sa contribution globale aux maladies infectieuses telles que la salmonellose, la listériose, la campylobactériose ou le syndrome hémolytique et urémique (causé par les E. coli EHEC), peut être considérée comme faible par rapport aux autres contributeurs connus (viandes et produits à base de viande, œufs, produits transformés prêts à consommer, etc.) (Anses, 2015a). La sévérité des effets néfastes liés à certains dangers microbiologiques potentiellement présents dans le lait cru peut, néanmoins, justifier des mesures d'information auprès des consommateurs (Anses, 2015a).

2.7.3. Produits transformés

2.7.3.1. Le lait liquide conditionné

La fabrication et la consommation de lait liquide conditionné sont en légère diminution à l'échelle européenne (voir section 2.7.1.). La consommation était de l'ordre de 61 kg /habitant en 2017 (CNIEL, 2019), dont plus de 97% consommés sous forme de lait UHT (ultra haute température) longue conservation.

Les traitements thermiques appliqués au lait cru visent à augmenter sa durée de vie et à garantir sa qualité sanitaire. Ces traitements sont caractérisés par leur durée et la température atteinte. La thermisation (62-65 °C pendant 15 à 20 s) réduit la charge microbienne du lait cru, alors que la pasteurisation (72°°C pendant 15 s) permet en outre de détruire les germes pathogènes. La stérilisation UHT consiste à chauffer le lait à plus de135 °C pendant 1 à 9 secondes, puis à le refroidir très rapidement (Zabbia *et al.*, 2012). Ce procédé détruit l'ensemble des microorganismes du lait et inactive en grande partie les enzymes, ce qui permet de conserver le lait pendant 6 à 9 mois à température ambiante, alors que le lait pasteurisé ne se conserve qu'une quinzaine de jours. Ce traitement s'accompagne également de réactions chimiques ou physicochimiques indésirables, dont la vitesse est d'autant plus importante que le maintien du lait à haute température est plus long. Au sein des traitements UHT, les traitements directs (injection directe de vapeur dans le lait) sont moins dénaturants que les traitements indirects (échangeurs à plaques ou tubes) (Jo *et al.*, 2018 ; Lee *et al.*, 2017).

Afin d'éviter la remontée des matières grasses à la surface, ces dernières sont homogénéisées préalablement au traitement thermique.

Caractéristiques sanitaires des laits traités thermiquement

Les niveaux de risques du lait pasteurisé sont plus faibles que pour le lait cru. La maîtrise de la température de conservation et de l'hygiène après l'étape de pasteurisation est essentiel pour la maîtrise des niveaux de risques associés aux formes sporulées qui résistent à la pasteurisation (*B. cereus*) (Bartoszewiez *et al.*, 2008) ou pour les germes pathogènes qui peuvent contaminer le lait après la pasteurisation (*L. monocytogenes*) (Hanson *et al.*, 2019).

Concernant les laits traités à haute température (stérilisation), les niveaux d'inactivation et le haut niveau d'hygiène appliqués lors du conditionnement limitent considérablement le risque pour les dangers microbiologiques (Pujol *et al.*, 2013). Les problèmes d'altération, sans risque pour les consommateurs, peuvent également survenir sur ces produits (Pujol *et al.*, 2015).

Caractéristiques sensorielles du lait UHT

Comparativement au lait cru, ou aux laits ayant subi des traitements thermiques modérés comme la pasteurisation, le traitement UHT et le stockage sont à l'origine d'une modification considérable des caractéristiques sensorielles du lait. Comparativement à du

lait cru ou pasteurisé, le lait UHT développe une flaveur plus « œuf/soufré », « cuit », « caramélisé », « brûlé » et, globalement, plus intense (Jo *et al.*, 2018 ; Lee *et al.*, 2017 ; Zabbia *et al.*, 2012). D'après Clare *et al*. (2005), le lait UHT est peu apprécié par les consommateurs, principalement en raison de sa flaveur « cuit ». Cette flaveur apparaît lors du chauffage du lait, puis se dissipe après quelques jours de conservation (environ 2 semaines) pour laisser place à une flaveur qualifiée, selon les auteurs, de « rassis », « oxydé » ou « renfermé » (Zabbia *et al.*, 2012).

Plusieurs auteurs ont associé ces flaveurs typiques du lait UHT à des composés volatils (par exemple composés soufrés, cétones, aldéhydes), qui proviennent notamment de la dénaturation de la β-lactoglobuline qui libère des composés soufrés, des réactions de Maillard (principalement entre le lactose et la β-lactoglobuline mais également avec les caséines) qui donnent un goût de vanille/caramel et une couleur légèrement brune au lait et, enfin, de l'oxydation des acides gras du lait.

Divers additifs à ajouter dans le lait, autorisés par la législation actuelle et susceptibles de limiter le développement de ces flaveurs indésirables, ont été testés sans aboutir à des solutions acceptables (Zabbia *et al.*, 2012).

Le lait UHT est le plus souvent conditionné en briques (Tetra Brick ou Tetra Pak), constituées de six feuilles alternant trois matériaux (polyéthylène, aluminium et carton), qui assurent l'étanchéité de l'emballage et protègent le lait contre les rayons ultraviolets et l'oxygène. Pendant le stockage, des interactions apparaissent entre le lait et les matériaux de l'emballage : par exemple, la feuille de polyéthylène en contact avec le lait UHT est capable d'adsorber ou d'absorber certains composés volatils du lait. Ces interactions sont variables selon le matériau de l'emballage et la température de stockage (Zabbia *et al.*, 2012).

Les effets des caractéristiques initiales du lait cru sur la flaveur du lait UHT sont peu documentés. Comme pour le lait pasteurisé, la présence de protéases thermostables, issues notamment de développement de germes psychrotrophes au cours du stockage au froid du lait cru après la traite, est susceptible de provoquer des floculations dans le lait UHT (Barbano *et al.*, 2006).

Des itinéraires technologiques UHT « basse intensité » commencent à se développer ; les caractéristiques sensorielles du lait sont mieux préservées et le produit correspond mieux aux demandes de « naturalité » des consommateurs.

Caractéristiques nutritionnelles du lait UHT

Le traitement UHT altère peu la composition des **matières grasses** du lait, dans la mesure où les acides gras sont stables à haute température. Une réduction légère de la teneur en acides gras essentiels a parfois été rapportée.

En revanche, **l'homogénéisation des matières grasses** du lait en préalable au traitement UHT altère fortement la structure des globules gras. La taille des globules gras diminue considérablement (de 10 à 12 fois, passant de 4 µm dans le lait cru à 0,4-0,5 µm dans le lait UHT), alors que leur nombre augmente fortement (facteur de 1 000 à 1 700) (Lopez, 2005; Lu *et al.*, 2018b). La membrane d'origine recouvre entièrement les nouveaux globules gras dans le lait UHT, mais elle est plus fine que celle du lait cru (Lu *et al.*, 2018b). Selon Lopez (2005), environ 25 % seulement des nouveaux globules gras sont recouverts par la membrane originelle et la plupart d'entre eux est enveloppée grâce à l'adsorption de protéines (caséines et protéines du lactosérum). D'après Lu *et al. (Lu et al., 2018b)*, le lait UHT contiendrait plus de phospholipides, d'acides gras libres et de diglycérides et moins de triglycérides que le lait cru.

Cette modification de la structure des globules gras du lait est à même de modifier leur digestion. Les plus petits globules gras sont plus facilement lipolysés, car ils présentent globalement une surface plus grande sur laquelle les lipases gastriques peuvent agir. La présence de davantage de protéines laitières à la surface des globules gras stimule l'activité de la lipase pancréatique, ce qui augmente la vitesse de lipolyse. Il semble donc que l'homogénéisation du lait améliore la lipolyse des matières grasses laitières au cours de la digestion, mais ceci n'a toutefois pas encore été démontré chez l'homme (Lopez et Michalski, 2018). Les conséquences de l'homogénéisation des matières grasses sur le métabolisme lipidique postprandial sont actuellement étudiées ; les premiers résultats suggèrent que la lipémie postprandiale est augmentée, mais de plus courte durée qu'avec les matières grasses initiales du lait (Vors *et al.*, 2013), limitant ainsi le risque d'apparition de maladies cardiovasculaires.

Le traitement thermique du lait est un facteur important de modulation de la composition, de la structure et de la susceptibilité des **protéines** aux protéases digestives. Les **caséines** sont thermorésistantes et peuvent supporter une température élevée pendant une longue durée (140°°C pendant 20 mn) (Turgeon et Dupont, 2018). À l'opposé, les **protéines solubles** sont fortement altérées par la chaleur, en particulier les immunoglobulines, la sérum-albumine et la ß-lactoglobuline, qui sont peu stables. La pasteurisation dénature de 10 à 20% des protéines solubles, le traitement UHT direct de 40 à 60% et le traitement UHT indirect de 60 à 80%. Lors du chauffage, la structure tertiaire des protéines solubles est modifiée et elles s'agrègent, entre elles ou avec les micelles de caséines, en formant des ponts disulfures (Guyomarc'h *et al.*, 2003). L'hydrolyse des protéines solubles par les protéases digestives est alors plus rapide. L'impact du traitement thermique sur la digestion des caséines reste controversé ; de nombreuses études in vitro montrent que les caséines résistent plus à la digestion lorsqu'elles sont traitées thermiquement (Dupont *et al.*, 2010a), alors qu'une étude clinique chez l'homme a montré qu'un traitement UHT du lait accélère les cinétiques de digestion et d'absorption des protéines, qui sont par ailleurs plus rapidement métabolisées (Lacroix *et al.*, 2008). Le traitement UHT du lait est également

susceptible de modifier le peptidome intestinal (Sanchez-Rivera *et al.*, 2015). Il semble réduire l'allergénicité des protéines laitières (Nowak-Wegrzyn *et al.*, 2008). En outre, certains sous-produits des **réactions de Maillard** présentent une forte affinité pour la lysine et forment des dérivés résistants à l'hydrolyse enzymatique. La lysine ainsi « piégée » dans ces composés n'est plus biodisponible, mais la perte de lysine est de l'ordre de 2 à 4% seulement dans le lait UHT, alors qu'elle peut atteindre 20% dans la poudre de lait. La plupart des auteurs estiment les produits des réactions de Maillard inoffensifs pour le fœtus ou le nouveau-né, mais certains d'entre eux ont évoqué un risque néphrotoxique. Par ailleurs, les conséquences sur la santé d'une forte consommation de composés issus des réactions de Maillard ne sont pas connues.

Le traitement UHT modifie peu la teneur du lait en **vitamines** ; les pertes sont toujours inférieures à 20%. Seuls la thiamine (vitamine B_1), la cobalamine (vitamine B_{12}) et l'acide ascorbique (Vitamine C) sont réellement thermosensibles et, dans une moindre mesure, la pyridoxine (Vitamine B_6) et les folates (Vitamine B_9). Les autres vitamines du lait sont peu ou pas affectées lorsque l'exposition à la chaleur survient à l'abri de l'oxygène et de la lumière. La perte de certaines vitamines (vitamine C notamment) lors du traitement à la chaleur sont plus imputables à l'oxydation qu'à l'effet de du chauffage.

La teneur en **minéraux** n'est pas affectée par le traitement thermique ou l'écrémage du lait. Les études récentes ont porté spécifiquement sur l'iode ou le sélénium. Les teneurs en iode de laits traités thermiquement, vendus au détail dans la grande distribution, sont identiques à celles du lait cru ou pasteurisé, et identiques dans du lait pasteurisé ou UHT entier, demi-écrémé ou écrémé (Arrizabalaga *et al.*, 2015; O'Kane *et al.*, 2018). Comme dans le lait cru, la teneur en iode de laits du commerce traités thermiquement varie selon la saison (plus faible en été) et selon le système de production (plus faible en agriculture biologique) (Arrizabalaga *et al.*, 2015 ; O'Kane *et al.*, 2018 ; van de Kamp *et al.*, 2019)**.** De même, les teneurs en sélénium de laits conditionnés vendus au détail ne sont affectées ni par les traitements thermiques, ni par l'écrémage partiel ou total (O'Kane *et al.*, 2018).

Plus globalement, sur le plan de la santé, des premières études récentes semblent montrer un avantage à la consommation de lait cru par rapport à du lait UHT : Loss *et al*. (2015) rapportent une réduction de 30% du risque d'infection respiratoire et de fièvre chez des enfants d'un an. Par ailleurs, Wyss *et al*. (2018) ont suggéré que la consommation de lait cru pendant l'enfance confèrerait des capacités pulmonaires accrues chez l'adulte, grâce à un meilleur développement des poumons.

2.7.3.2.Le lait infantile

Il existe aujourd'hui de nombreuses variétés de formules infantiles, toutes fabriquées selon un même type de procédé. Les ingrédients secs (par exemple les protéines du lactosérum) sont d'abord dissouts dans l'eau (premix), puis mélangés avec du lait écrémé pour former une préparation liquide. Le but de cette opération est de modifier le ratio caséines/protéines sériques du lait de vache (80/20), pour le rendre identique à celui du lait humain (40/60). Cette préparation liquide est ensuite pasteurisée puis concentrée par évaporation sous vide. Après ajout de matières grasses (généralement un mélange d'huiles végétales) et homogénéisation, la préparation concentrée est séchée dans une tour de séchage. La poudre est d'abord conditionnée en big-bag puis, si sa qualité est conforme, elle est conditionnée en boîtes métalliques pour être commercialisée.

Les **matières premières** utilisées (ingrédients, lait écrémé) ont la plupart du temps déjà été traitées thermiquement avant leur utilisation pour la fabrication de formules infantiles. À cela s'ajoutent d'autres chauffages (pasteurisation, concentration, séchage…), dont l'effet cumulatif provoque la dénaturation et l'agrégation des protéines et l'apparition de composés issus des réactions de Maillard. Les **traitements thermiques** utilisés lors de la conception des formules infantiles permettent de garantir la sécurité microbiologique du produit, le séchage assurant une meilleure stabilité dans le temps et facilitant le transport en réduisant les volumes (Corkins et Shurley, 2016). L'étape de séchage est cruciale, dans la mesure où elle peut entrainer une contamination bactérienne potentiellement catastrophique pour la santé de l'enfant et l'image de l'industriel. Les dangers associés au lait en poudre sont principalement les entérobactéries (Afssa, 2008b ; van Asselt *et al.*, 2017), *Salmonella* (Jones *et al.*, 2019a ; Jourdan-Da Silva *et al.*, 2018) et *Cronobacter* (Caubilla-Barron *et al.*, 2007) sont capables de persister dans l'environnement des ateliers de production et peuvent contaminer les poudres avant leur conditionnement. Dans le cas particulier des formules infantiles (notamment l'absence de Cronobacter Sakazakii dont certaines souches sont capables de survivre plus de 2 ans dans des formules infantiles déshydratées (Caubilla-Barron et Forsythe, 2007), les industriels appliquent des barèmes de traitements thermiques drastiques, qui sont potentiellement dommageables pour l'intégrité des constituants des formules infantiles. **L'homogénéisation des matières grasses**, via l'application de hautes pressions, permet de transformer le globule gras natif du lait, dont le diamètre moyen est de 4 µm, en gouttelettes lipidiques de 0,2 à 0,8 µm de diamètre, garantissant ainsi la stabilité de l'émulsion et évitant le crémage du lait (remontée des matières grasses à la surface du produit).

De façon générale, le lait humain et la formule infantile divergent par le fait que le premier est un produit natif non transformé, alors que le second est issu d'une série de transformations technologiques. La **composition et la structure des constituants protéiques et lipidiques** des formules infantiles sont très différentes de celles du lait humain.

Au niveau de leur **composition protéique**, le lait humain, le lait bovin et les formules infantiles présentent d'importantes différences (Martin *et al.*, 2016). Alors que le lait humain est constitué de 40% de caséines et 60% de protéines du lactosérum (majoritairement

de l'α-lactalbumine et de la lactoferrine), le lait bovin contient 80% de caséines et seulement 20% de protéines sériques (majoritairement de la β-lactoglobuline). Bien que le ratio caséines / protéines sériques des formules infantiles soit identique à celui du lait humain, la nature des protéines reste d'origine bovine, avec comme protéine majoritaire la β-lactoglobuline, alors que celle-ci est absente du lait humain. En outre, dans le lait humain, les micelles de caséines sont essentiellement constituées de caséines β et κ et ont un diamètre moyen de 64 nm, alors que celles du lait bovin sont trois fois plus grosses (diamètre moyen de 182 nm) et majoritairement constituées de caséines αs_1 et β. De plus, les traitements thermiques successifs et cumulatifs entrainent une dénaturation et une agrégation des protéines sériques, générant des agrégats, qui vont soit rester en solution dans la phase aqueuse du lait, soit venir s'agréger à la surface des micelles de caséines, engendrant à nouveau une augmentation de leur diamètre. Au **niveau lipidique**, même si des progrès ont été réalisés grâce à la combinaison d'huiles végétales pour rapprocher le ratio acides gras polyinsaturés / acides gras saturés des formules infantiles de celui du lait humain, des différences essentielles de structure des constituants lipidiques demeurent. Dans les laits humain et bovin, les lipides sont présents sous forme de globules gras, dits natifs, d'environ 4 µm de diamètre, constitués d'un cœur de triglycérides entouré par une tricouche de phospholipides, dans laquelle sont ancrés des centaines de protéines et de lipides polaires, potentiellement bioactifs (glycérophospholipides, sphingolipides et glycosphingolipides comme des gangliosides…) (Bourlieu et Michalski, 2015). Dans les formules infantiles, les procédés **d'homogénéisation des matières grasses** fragmentent les globules gras en petites gouttelettes lipidiques, stabilisées par les protéines du lait.

Au niveau glucidique, le lait maternel est très riche en **oligosaccharides** (de l'ordre de 12 g/L), contrairement au lait bovin et aux formules infantiles qui n'en contiennent pas. Ces oligosaccharides sont indigestibles et ont des propriétés anti-infectieuses, notamment vis-à-vis d'agents pathogènes susceptibles de se développer dans le tractus digestif du nourrisson, tels que *Salmonella*, *Listeria* ou *Campylobacter*. Ils jouent également un rôle clef dans la structuration du microbiote intestinal du nouveau-né (Akkerman *et al.*, 2019).

De plus, au-delà des différences de macronutriments, le lait maternel renferme un écosystème microbien spécifique, qui doit certainement jouer un rôle primordial dans la mise en place du microbiote intestinal du nouveau-né. Enfin, le lait humain renferme des composés dits mineurs de par leur concentration, mais qui sont susceptibles d'avoir un rôle essentiel sur la santé de l'enfant : immunoglobulines, facteurs de croissance, micro-ARN, acides nucléiques... De nombreux efforts restent encore à déployer pour produire des formules infantiles biomimétiques du lait humain.

Les différences de composition et de structure des constituants du lait infantile se traduisent par des différences importantes de **comportement dans le tube digestif du nouveau-né**. Les formules infantiles séjournent plus longtemps que lait maternel dans l'estomac du nouveau-né (Bourlieu *et al.*, 2014), ce qui favorise le contact entre les caséines et la pepsine (protéase digestive de l'estomac), l'action de cette dernière provoquant une dégradation plus rapide des protéines. Par ailleurs, comme une partie des caséines présentes dans les formules infantiles se situe à l'interface de la gouttelette lipidique (ce qui change leur conformation), les caséines sont plus sensibles à l'hydrolyse (Macierzanka *et al.*, 2009). Au contraire, la lipolyse gastrique de la formule infantile est ralentie comparativement à du lait maternel cru, en raison de l'inactivation de la lipase endogène du lait par les divers traitements thermiques. Au cours de la phase intestinale, la lipolyse de la formule infantile est accélérée, car la surface d'action des lipases à la surface des globules gras est augmentée par l'homogénéisation (Bourlieu *et al.*, 2015). Ces différences de comportement dans le tube digestif entre le lait maternel et les formules infantiles sont liées en partie à l'intensité et au nombre (jusqu'à 7) de traitements thermiques, qui dénaturent et agrègent les protéines laitières, les rendent plus résistantes au processus digestif de l'enfant (Dupont *et al.*, 2010b) et pourraient être impliqués dans la prévalence des allergies aux protéines laitières (Chizoba Ekezie *et al.*, 2018).

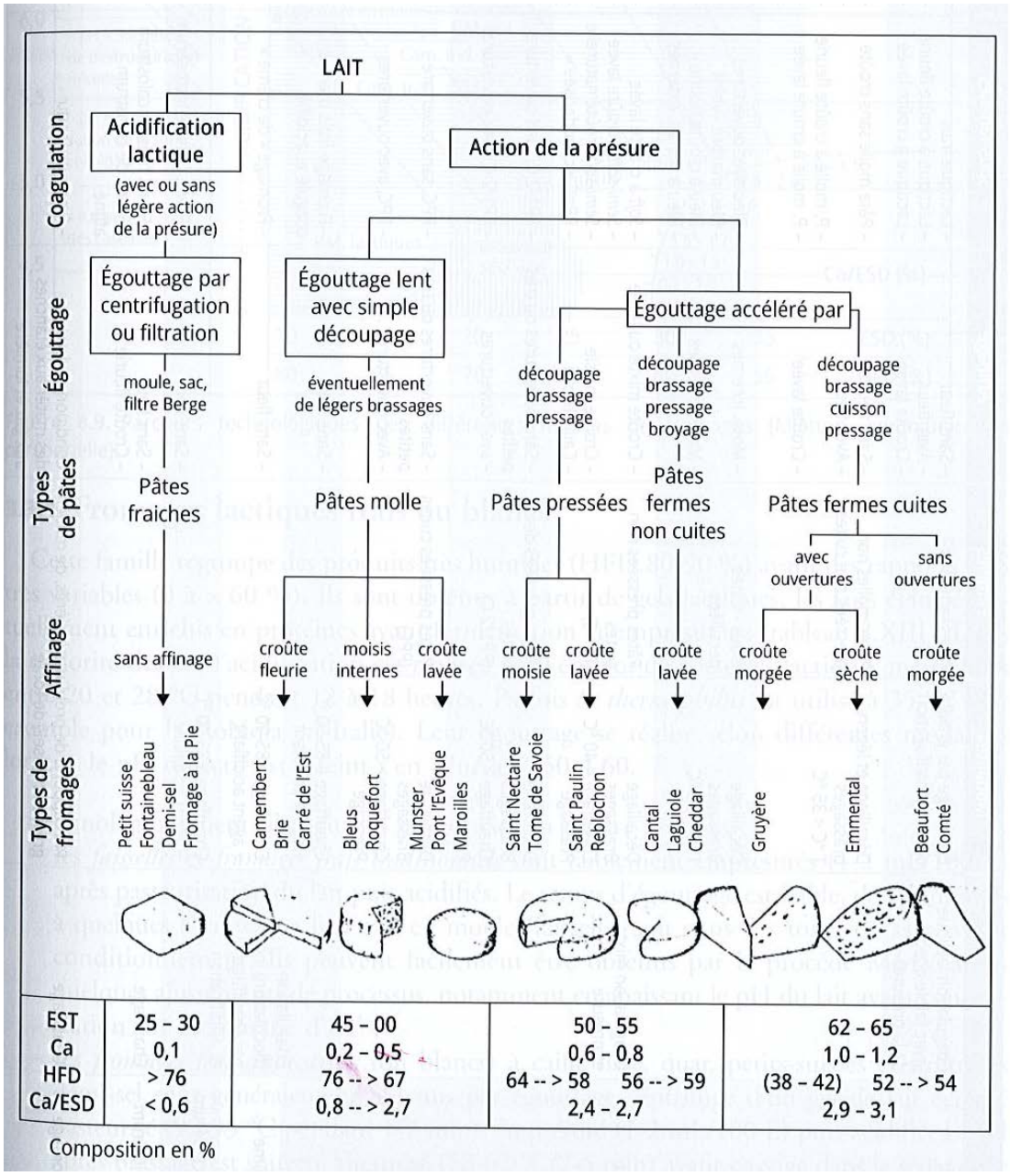
2.7.3.3.Le fromage

Le fromage est une forme de conservation du lait, en particulier de ses deux principaux constituants insolubles, les caséines et les matières grasses. Les différentes étapes de la fabrication fromagère conduisent en effet à l'élimination d'une partie variable de l'eau et des composés hydrosolubles du lait. La définition du fromage a été précisée par décret (République Française, 2007b) : « La dénomination fromage est réservée au produit fermenté ou non, affiné ou non, obtenu à partir des matières d'origine exclusivement laitière suivantes : lait, lait partiellement ou totalement écrémé, crème, matières grasses, babeurre, utilisées seules ou en mélange et coagulées en tout ou en partie avant égouttage ou après élimination partielle de la partie aqueuse. La teneur minimale en matière sèche du produit ainsi défini doit être de 23 g/100 g de fromage ».

Il existe une multitude de fromages différents. Tous sont fabriqués selon des procédés technologiques qui comprennent 3 étapes clé successives : la coagulation, l'égouttage et l'affinage. La coagulation permet le passage du lait liquide à l'état de gel (ou coagulum). Elle est souvent précédée d'une préparation du lait (standardisation de sa composition, traitement thermique) suivie d'un réensemencement du lait avec des flores microbiennes sélectionnées et d'une maturation (repos du lait à une température et pendant un temps donnés). La coagulation peut être de type présure (ou enzymatique) ou acide (liée à l'activité acidifiante de bactéries lactiques ou à l'utilisation d'un agent acidogène). Le gel obtenu peut alors être égoutté, ce qui permet de concentrer les constituants principaux du lait (matières protéiques et matières grasses) et d'éliminer le lactosérum. L'égouttage inclut notamment

les phases de décaillage (tranchage du gel), de brassage, éventuellement de chauffage avant la mise en moule, le pressage éventuel et les différents retournements en moule. Cette phase s'accompagne d'une acidification plus ou moins précoce et intense selon le type de technologie fromagère. Elle permet d'obtenir la caillebotte (produit obtenu au démoulage), de type présure lorsque l'égouttage précède l'acidification, ou de type lactique lorsque l'acidification précède l'égouttage. La caillebotte est le plus souvent salée, ce qui, outre son action directe sur la saveur du fromage, assure un complément d'égouttage et contribue à réguler l'activité de l'eau, qui a un rôle essentiel dans le développement ultérieur des flores microbiennes ou fongiques. Au cours de l'affinage, les constituants de la caillebotte subissent de profondes modifications ; l'aspect, la composition, la structure, la texture et la flaveur de la caillebotte se rapprochent progressivement du fromage affiné. L'affinage peut durer de quelques jours à plusieurs années. La diversité des procédés mis en œuvre au cours de ces différentes étapes de fabrication permet d'obtenir un grand nombre de fromages avec des compositions, des goûts, des aspects, ou des structures bien distincts (Mietton et Chablain, 2018). Les fromages sont classés par famille, selon le type de technologie. La classification la plus souvent utilisée est celle proposée par Lenoir *et al*. (1983) pour les fromages français (figure 2). Alména et Mietton (2014) ont proposé depuis une classification plus générale, incluant des technologies peu usitées en France.

Figure 2.7.2. Classification des fromages (d'après Lenoir *et al*. (1983))



EST : extrait sec total ; Ca : calcium ; HFD : humidité dans le fromage dégraissé - Source : Mietton et Chablain (2018)

L'ensemble des qualités du fromage dépend avant tout des procédés technologiques. À partir d'un même lait, il est en effet possible d'obtenir différents types de fromages. Au sein d'un même type de fromages, les caractéristiques du produit affiné varient aussi sensiblement selon les caractéristiques initiales des laits. Le poids respectif de ces deux types de facteurs (caractéristiques initiales du lait et procédés technologiques) est variable selon le volet de la qualité du produit considéré. Les caractéristiques organoleptiques du fromage dépendent avant tout de la technologie fromagère, alors que la composition du lait influe davantage sur les caractéristiques nutritionnelles. Les caractéristiques des fromages fabriqués en laiterie sont relativement régulières, car les paramètres technologiques sont bien maîtrisés et contrôlés et la composition du lait est souvent standardisée. La variabilité de la composition chimique et bactériologique des laits selon les saisons et les lieux est préjudiciable à la régularité des produits ; les technologues s'en affranchissent en standardisant les teneurs en matières grasses et protéiques, en minéraux ou en lactose, et en appliquant des traitements pour éliminer les micro-organismes (traitements thermiques ou filtration). En fabrication artisanale ou fermière, où ces procédés de standardisation du lait ne sont pas appliqués (fabrication avec du lait cru entier) et où les paramètres technologiques ou d'ambiance des locaux sont plus difficiles à contrôler, la variabilité des caractéristiques des fromages affinés est importante, en lien avec la variabilité des caractéristiques du lait.

Caractéristiques organoleptique des fromages

Effet des procédés technologiques

L'ensemble des étapes de fabrication du fromage, depuis la préparation du lait, le choix des ferments, le travail du lait en cuve, jusqu'à la fin de l'affinage, est déterminant pour l'obtention du produit recherché. Les connaissances sur ce point sont très avancées et bien connues des technologues ; elles ont été recensées récemment dans un ouvrage de synthèse (Gillis et Ayerbe, 2018). Ce paragraphe traite principalement de l'effet de l'épuration microbienne du lait par traitements thermiques (thermisation ou pasteurisation), ou par traitements physiques (bactofugation ou microfiltration), sur les qualités gustatives des fromages. Ces traitements sont mis en œuvre pour d'éliminer les germes pathogènes possiblement présents dans le lait cru, mais les écosystèmes microbiens naturels sont aussi au moins partiellement détruits. Les traitements thermiques ont des conséquences physicochimiques dommageables pour la transformation fromagère (dénaturation des protéines, insolubilisation du calcium soluble, etc.), alors que les traitements physiques ont moins de répercussions. Ces traitements sont mis en œuvre dans la grande majorité des fabrications fromagères, les fabrications au lait cru représentant seulement 10,4% des fabrications en 2018 (INAO, 2019).

Au cours de la fabrication fromagère au lait cru, la microflore naturelle du lait (de l'ordre de 10^4 UFC – unité formant colonie/ml) subit des stress et une compétition importante avec l'ensemencement lactique massif (de l'ordre de 10^6 UFC/ml) réalisé en début de fabrication. Bien que la microflore naturelle soit minoritaire, de nombreuses publications ont démontré qu'elle joue un rôle déterminant sur les caractéristiques organoleptiques des fromages (Montel *et al.*, 2014). En effet, cette flore native du lait est capable de se développer dans les fromages au cours de l'affinage, pour atteindre des niveaux de population suffisants pour influer sur les processus fermentaires et, in fine, sur les caractéristiques organoleptiques des produits. Il est maintenant bien établi que, dans toutes les technologies fromagères, la suppression de la microflore du lait entraîne une perte de goût du fromage, ainsi qu'une diminution de la richesse des arômes (Montel *et al.*, 2014). Les fromages au lait cru sont perçus positivement par les consommateurs (Colonna *et al.*, 2011). Ils s'affinent plus rapidement et développent de ce fait des flaveurs plus riches et plus intenses que les fromages au lait pasteurisé ou microfiltré, qui dégagent moins de composés volatils aromatiques (acide aldéhyde, alcools, esters ou composés soufrés) (Montel *et al.*, 2014). La pasteurisation, outre son action sur les microorganismes, dénature aussi des protéases ou des lipases, qui participent aux processus biochimiques en cours d'affinage (Hayes *et al.*, 2001 ; Hickey *et al.*, 2007). Tous ces travaux, qui soulignent le rôle de la microflore du lait, démontrent aussi que le niveau de microflore dans le lait cru n'est pas déterminant, contrairement à sa nature et sa diversité (Montel *et al.*, 2014). En effet, l'ajout de microflores différentes issues de fermes ou de laiteries dans un même lait, est associé à des fromages aux caractéristiques sensorielles très variables. Par exemple, une communauté a engendré dans le fromage des arômes de noisette, de caramel, de crème fraîche et une saveur sucrée, alors qu'une autre a conduit à des arômes et des goûts plus forts (épicé, aillé, crème acide, amer) (Callon *et al.*, 2005 ; Demarigny *et al.*, 1997). Le niveau et la nature des populations microbiennes du lait cru (plus ou moins protéolytiques) peuvent également moduler la texture des fromages (Montel *et al.*, 2014) concluent que la diversité microbienne dans le lait cru génère de la diversité au niveau des caractéristiques sensorielles des fromages.

Effets des conditions de production du lait

Les liens entre conditions de production du lait et caractéristiques organoleptiques du fromage sont connus depuis longtemps, notamment par les fromagers fermiers qui utilisent le lait de leur seul troupeau, produit éminemment variable selon les saisons, l'alimentation, le moment de la traite (matin ou soir), etc. Ces connaissances empiriques ont pour la plupart été objectivées au cours des trente dernières années, pour fournir des références scientifiques aux filières fromagères. Ces dernières revendiquaient la reconnaissance du lien au terroir de leurs produits dans le cadre de la mise en place des appellations d'origine protégées (AOP) européennes. Les conditions de production du lait marquent davantage les caractéristiques du fromage lorsque le lait subit peu de

traitements préalables à sa transformation. Par exemple, la conduite des animaux module fortement la teneur du lait en matières protéiques et matières grasses, dont le rapport (taux butyreux / taux protéique ou TB /TP) est directement lié à la teneur du fromage en matières grasses (gras / sec), qui joue un rôle déterminant sur la texture et le goût du fromage. Lorsque le ratio TB / TP du lait est standardisé, les facteurs d'amont susceptibles de le modifier n'ont pas d'effet sur les caractéristiques du fromage. De même, plusieurs auteurs ont observé que l'effet de la nature de l'alimentation des animaux sur les caractéristiques gustatives du fromage est important dans le cas de fabrication au lait cru, et faible, voire inexistant, dans le cas de fabrication au lait pasteurisé (Tunick *et al.*, 2007; Verdier-Metz *et al.*, 2002). Enfin, les différences gustatives liées à la conduite des animaux semblent s'amplifier d'autant plus que l'affinage est plus long (Agabriel *et al.*, 2004).

Effet de l'alimentation des animaux

Le **pâturage** des vaches est à l'origine de produits laitiers aux caractéristiques organoleptiques bien distinctes. En particulier, le fromage obtenu lorsque les animaux sont au pâturage a une **coloration systématiquement plus jaune**, en raison de la présence plus importante de **β-carotène** dans l'herbe fraîche, par rapport aux fourrages conservés.

Les effets propres de la nature des fourrages ont été testés dans différentes expérimentations où la technologie fromagère, les caractéristiques des animaux et leur conduite étaient maîtrisées (Esposito *et al.*, 2014; Sibra *et al.*, 2018). Différents types de fromages à pâte pressée (Saint-Nectaire, Cantal, Morbier) ou à pâte filée (Caciocavallo), fabriqués avec des laits crus produits pendant le pâturage des vaches, ont présenté une texture moins ferme et plus crémeuse et un goût globalement plus intense, comparativement à des fromages fabriqués avec des laits de vaches consommant de l'herbe conservée (foin ou ensilage) (tableau 2.7.3). Les fromages de Cantal issus de lait produit au pâturage ont également présenté une croûte moins épaisse, avec moins de relief, vraisemblablement en raison d'une inhibition du développement de la flore de surface lorsque les laits sont riches en acides gras polyinsaturés (Fretin *et al.*, 2018). L'effet du pâturage sur les caractéristiques organoleptiques des fromages est encore plus marqué lorsqu'il est comparé à l'effet d'un régime à base d'ensilage de maïs. Il est suffisamment fort pour avoir été montré dans le cadre d'une ration complète (maïs, concentré et foin), dont une petite partie (environ 15%) était remplacée par le pâturage d'une prairie naturelle. Cette dernière ration, par rapport à la ration complète, a permis de fabriquer des fromages (Ragusano pâte dure, lait cru entier) avec une odeur de fleur et d'herbe plus développée, une pâte moins huileuse au toucher et moins friable (Carpino *et al.*, 2004)

Tableau 2.7.3. Qualité organoleptique du fromage selon le régime alimentaire des vaches (pâturage versus fourrages conservés) (Adapté de (Sibra *et al.*, 2018)).

Fromage	*Fourrage conservé* [1]	*Effet du pâturage sur la qualité organoleptique par rapport au fourrage conservé*	
		Texture	*Odeur, arôme et saveur*
SAINT-NECTAIRE	*ensilage d'herbe*	*-- ferme*	*goût ++intense +typique ++aigre* *odeur -piquante -aigre --fruitée*
CANTAL	*concentré et foin*	*non mesuré*	*odeur -beurre -crème +moisi +noisette*
	foin	*---ferme ++crémeuse ++élastique*	*odeur +intense -beurre* *arôme +intense +persistant* *saveur +aigre +acre*
MORBIER		*non mesuré*	*odeur +lactée, arôme +lacté +fumier*
CACIOCA-VALLO		*++granuleuse ++friable*	*odeur et flaveur -beurre -fumée* *goût -amer ++poivré +épicé*

+ou - = variations jusqu'à 5 % ; ++ ou -- = variations de 6 à 15 % ; +++ ou --- = variations de 16 à 25 % ; ++++ ou ---- = variations de 26 à 40 %
[1] *dans la plupart des cas, la ration comprend aussi du concentré*

Ces effets globaux du pâturage ne sont pas généralisables à tous les types de fromages. Dans leur synthèse bibliographique, (Sibra *et al.*, 2018) observent que les effets du pâturage sur la texture et la flaveur du fromage sont plus importants sur les fromages à pâte pressée que sur les fromages à pâte molle et que l'affinage semble accentuer les différences organoleptiques observées selon que les vaches pâturent ou sont nourries avec des fourrages conservés. Enfin, des interactions notables entre le régime alimentaire des vaches et le traitement thermique du lait ont également été observées. Dans le cadre de fabrication de Cantal, les effets du pâturage sur la couleur et la texture de la pâte sont identiques, que le lait soit cru ou pasteurisé ; en revanche, les effets sur la flaveur du fromage sont très atténués lorsque le lait est pasteurisé (Cornu *et al.*, 2009).

Ces effets du pâturage sur la qualité organoleptique du fromage s'appuient sur plusieurs mécanismes (Martin *et al.*, 2005). **Les différences de texture** observées sur les fromages peuvent être attribuées majoritairement à l'effet de l'herbe sur la composition en acides gras des lipides, cette dernière restant identique du lait au fromage. De ce fait, plus la teneur en matières grasses du fromage est élevée, plus l'effet du pâturage des vaches sur la texture du fromage est important. La texture des fromages à pâte molle est ainsi

moins sensible au fourrage ingéré que celle des fromages à pâte pressée, dans la mesure où leur teneur en matières grasses (rapportée au poids total) est moins importante. Ces fromages subissent aussi une protéolyse plus intense que les fromages à pâte pressée ; celle-ci pourrait déstructurer le fromage au point de masquer un éventuel effet des propriétés physiques des matières grasses sur la texture. Les effets du pâturage sur **les saveurs, les odeurs et les arômes** des fromages au lait cru sont plus délicats à interpréter. Les flaveurs plus corsées des fromages produits au pâturage ont été associées à une plus grande diversité et quantité de composés volatils, issus du catabolisme des constituants principaux du lait, sous l'action d'enzymes endogènes ou produites par les micro-organismes en cours d'affinage. Lorsque le lait est pasteurisé avant la fabrication, les fromages présentent des différences de flaveur plus faibles, ce qui suggère que la flore native du lait ou l'activité des enzymes endogènes, altérées par le traitement thermique, varient selon le régime alimentaire des vaches, ce qui explique l'effet du pâturage sur la flaveur des fromages au lait cru.

La question de la **conservation de l'herbe sous forme d'ensilage** fait depuis longtemps débat au sein des filières fromagères. Dans les fromages, en particulier à pâte pressée, des gonflements tardifs et des goûts ou odeurs désagréables peuvent apparaître en raison du développement de spores butyriques en cours d'affinage. Cependant, les effets des différents fourrages conservés ne sont pas identiques selon le type de fromage. Le mode de conservation du fourrage a peu d'effet sur la texture et la flaveur du Saint-Nectaire, contrairement au Cantal, plus apprécié par les dégustateurs quand la ration est composée d'ensilage d'herbe, par rapport au foin (Verdier-Metz *et al.*, 2005). Ces fromages de Cantal associés à l'ensilage d'herbe se sont caractérisés par des odeurs moins fortes de beurre et d'herbe, un arôme d'agrumes moins marqué et un goût moins persistant. Ils ont par ailleurs révélé une odeur « alcool » et un arôme « chimique » plus développés, ainsi qu'une texture moins fondante et moins moelleuse.

D'autres études ont confronté **les effets du foin ou de l'ensilage de maïs** sur les caractéristiques organoleptiques de fromages à pâte molle, à pâte pressée ou à pâte pressée cuite (Hurtaud *et al.*, 2009 ; Martin *et al.*, 2005). Comparativement au foin, le lait de vaches nourries avec de l'ensilage de maïs a conduit à des fromages à la texture plus ferme. Les dégustateurs ont globalement apprécié ces fromages de façon équivalente, mais ont relevé des différences d'arôme et de flaveur qui semblaient propres à chaque type de fromage : les fromages issus du régime ensilage de maïs ont été jugés moins piquants dans le cas du fromage à pâte pressée cuite, avec plus de persistance aromatique pour le fromage à pâte molle, contrairement au fromage à pâte pressée dont l'intensité aromatique tendait à être moins importante. L'alimentation des vaches avec de **l'ensilage d'herbe ou de l'ensilage de maïs** permet de produire des fromages sensiblement différents, quel que soit le type de pâte (Camembert, Pont-l'Evêque, Saint-Nectaire). Par rapport à l'ensilage de maïs, lorsque les vaches mangent de l'ensilage d'herbe, les fromages sont généralement plus appréciés. Ils se caractérisent par une texture moins ferme et un goût plus prononcé dans le cas du Camembert.

En élevage, des fromages de Cantal fabriqués avec des laits de mélange de fermes en système extensif sans ensilage d'herbe (petit troupeau, faible niveau de production, faible chargement, étable traditionnelle) ont été plus élastiques, moins amers et moins piquants, et ont eu des arômes moins intenses, par rapport aux fromages issus de systèmes plus intensifs utilisant de l'ensilage d'herbe (Agabriel *et al.*, 2004). Plus récemment, ces tendances ont pu être confirmées, à systèmes de production comparables, sur des fromages expérimentaux fabriqués avec des laits individuels de vaches. Les fromages issus des fermes n'utilisant pas d'ensilage ont présenté une odeur moins forte de lait fermenté et une texture moins ferme que les fromages issus de fermes utilisant de l'ensilage d'herbe ou de m aïs (Cipolat-Gotet *et al.*, 2018a).

Les travaux relatifs à l'élevage ovin ou caprin sont à ce jour peu nombreux. Des fromages fabriqués lorsque les brebis recevaient du foin ou de l'ensilage de maïs n'ont présenté aucune différence organoleptique significative, quelle que soit la durée d'affinage (Cavani *et al.*, 1991).

En revanche, des effets de la **composition botanique des pâturages** sur les caractéristiques organoleptiques des fromages ont été mis en évidence dans de nombreuses études, réalisées pour la plupart chez des producteurs de fromages fermiers. Les résultats ont clairement fait apparaître des modifications parfois très importantes de texture et/ou de flaveur, concomitantes de changements de parcelles, ou associées à des parcelles dont la composition botanique différait fortement : versant nord *versus* versant sud d'un même alpage, plaine *versus* montagne ou encore prairie monospécifique *versus* prairie permanente. Ainsi, dans le cas du fromage Abondance, il a été possible d'associer le pâturage de prairies de basse altitude riches en graminées et légumineuses à des fromages aux flaveurs fortes (chou cuit ou piquante par exemple), le pâturage de prairies d'altitude riches en dicotylédones de milieux secs à des fromages aux flaveurs fruitées et lactées et enfin, le pâturage de prairies très riches en dicotylédones de milieu humide à des fromages aux flaveurs animales (Martin *et al.*, 2005). Ces liens semblent cependant de nature différente selon le type de fromage, les conditions et la durée d'affinage, si bien qu'il n'est pas possible actuellement d'établir des liens génériques entre un type botanique ou la présence de certaines plantes dans les fourrages consommés par les vaches (pâturage ou foin) et des caractéristiques organoleptiques particulières des fromages (Coppa *et al.*, 2011 ; Farruggia *et al.*, 2008). La nature de ce lien peut varier également selon le stade de l'herbe pâturée et les choix alimentaires des animaux au pâturage. Les plantes présentes dans les prairies permanentes sont en effet très variables selon la saison, en fonction de leur précocité. Par exemple, des chèvres pâturant une même prairie naturelle toute l'année ingéraient principalement des graminées en hiver (88%), des légumineuses et autres dicotylédones au printemps et majoritairement des dicotylédones en été (71%) (Fedele *et al.*, 2005). Les tendances générales observées montrent

que, à âge égal, les fromages issus des prairies les plus diversifiées présentent une palette d'arômes plus étendue et une flaveur globale perçue moins intense que les fromages issus de prairies moins diversifiées (Bovolenta *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2005). Aux dires de certains fromagers, le pâturage de prairies diversifiées conduit à des fromages qui s'affinent plus lentement, donc plus longtemps, permettant ainsi l'expression de leur potentiel aromatique.

Dans des situations moins complexes de **prairies semées**, des associations ont pu être observées entre un fourrage spécifique et les caractéristiques organoleptiques des fromages. Des fromages de chèvre Caciotta (pâte pressée au lait cru) ont été plus appréciés lorsque les chèvres étaient nourries avec des graminées (ray-grass anglais ou avoine cultivée), par rapport à des légumineuses (trèfle incarnat ou luzerne), associées à des goûts aigre, amer ou légèrement chèvre (Claps *et al.*, 2009). De même, l'odeur de fromages de brebis de type Pecorino Sardo Dolce (pâte pressée) a varié selon l'incorporation ou non de chrysanthème couronné dans le mélange semé (Addis *et al.*, 2006).

Les effets de la composition botanique du pâturage, notamment sur le plan des arômes et des saveurs, restent mal compris et semblent particulièrement complexes. Les hypothèses testées à ce jour suggèrent que les différences sensorielles observées peuvent être liées à des composés du lait issu directement ou indirectement des fourrages ingérés (terpènes, micro-organismes), ou produits par l'animal suite à l'ingestion de plantes particulières (acides gras, enzymes par exemple). En outre, les différences sensorielles ne sont pas forcément la conséquence d'une diversité botanique spécifique, mais peuvent résulter de la présence d'une espèce (renoncule par exemple, (Martin *et al.*, 2005)) susceptible d'avoir un effet spécifique sur certains composés du lait impliqués dans le processus d'élaboration des caractéristiques sensorielles des fromages.

La **nature et la proportion de concentré** dans la ration des vaches laitières modifient marginalement la flaveur des fromages. En revanche, elles ont des effets plus importants sur leur texture. Ces effets semblent liés en grande partie à la diminution du ratio taux butyreux/taux protéique du lait (et donc du gras/sec du fromage au lait entier), concomitante à l'augmentation de la proportion de concentré dans la ration (Bovolenta *et al.*, 2009). L'augmentation de la quantité d'aliments concentrés dans la ration, en particulier azotés, est à l'origine d'une forte augmentation de la teneur en urée du lait, ce qui, lors de fabrication de fromages de type Reblochon, a été associé à un ralentissement de l'acidification et de l'égouttage du caillé, ainsi qu'à des fromages à la texture plus fondante (Martin *et al.*, 1997).

L'introduction d'huiles ou de graines oléagineuses dans la ration des vaches laitières n'entraîne pas de défaut de goût oxydé et la flaveur des fromages n'est pas affectée de façon notable. Par contre, elle est à l'origine d'une **modification importante des propriétés texturales** du fromage, nettement moins ferme, en raison de l'augmentation de la part d'acides gras insaturés, dont la température de fusion est faible, aux dépens des acides gras saturés (en particulier acide palmitique), dont la température de fusion est élevée. Les effets sont d'autant plus importants que la proportion de matières grasses dans les produits est plus élevée. Ainsi, ils sont flagrants dans le cas du beurre, intermédiaires dans le cas de la majorité des fromages affinés et très faibles dans le cas des fromages frais (mozzarella par exemple) ou des fromages riches en eau ou très peu affinés (Chanco cheese par exemple) (Chouinard *et al.*, 1998 ; Lerch *et al.*, 2015 ; Oeffner *et al.*, 2013 ; Vargas-Bello-Perez *et al.*, 2015). Dans le cas de fabrication de fromage de type Saint-Nectaire, la ration enrichie en matières grasses a conduit à des fromages avec une pâte plus brillante et une croûte plus sombre (Lerch *et al.*, 2015). Les matières grasses sont en effet plus fluides, car plus riches en acides gras insaturés, ce qui pourrait expliquer l'aspect plus brillant de la pâte et la couleur grise de la croûte, résultat d'un plus fort développement de mucor.

Les **fromages au lait de chèvre** semblent plus sensibles que ceux au lait de vache à l'adjonction d'oléagineux dans la ration des animaux. En condition expérimentale, l'ajout de quantité importante d'huile de lin (5 à 6%) ou de tournesol dans la ration de chèvres a été à l'origine d'une diminution de la flaveur chèvre des fromages frais et de l'apparition de flaveurs considérées comme des défauts (oxydée, poisson, piquante ou amère) (Rouel *et al.*, 2002). Par ailleurs, la texture des fromages de chèvre a varié selon la nature de l'huile introduite dans la ration : plus ferme avec de l'huile de ricin (4%) qu'avec la même proportion d'huile de sésame ou de faveleira (de Medeiros *et al.*, 2013). En élevage, l'introduction en quantité modérée de suppléments lipidiques dans la ration ne semble pas détériorer la flaveur des fromages de chèvre. Par exemple, l'ajout d'un concentré commercial contenant des huiles et des graines de lin, colza et soja (environ 1% de matières grasses ajoutée à la ration) a conduit à des fromages (pâte molle au lait pasteurisé) qui tendaient à avoir une croûte moins perceptible en bouche, une flaveur chèvre moins forte et une texture plus crémeuse, mais ne présentaient aucun défaut de goût lié à l'oxydation des matières grasses (Gassi *et al.*, 2012).

L'intégration **d'aliments alternatifs** dans la ration des vaches, des chèvres ou des brebis a été, dans la plupart des cas, à l'origine de modifications de la flaveur ou de la texture des fromages, sans développement de défaut. Ces fromages, à pâte pressée, frais ou affinés, ont dans l'ensemble été plus appréciés (Abbeddou *et al.*, 2011 ; Boutoial *et al.*, 2013a ; Boutoial *et al.*, 2013b ; Gutierrez-Pina *et al.*, 2011 ; Jaramillo *et al.*, 2010 ; Jaramillo *et al.*, 2009 ; Salvador *et al.*, 2014). Par exemple, du marc de pomme dans la ration des vaches, de l'ensilage d'artichaut, des feuilles d'atriplex ou des grignons d'olive dans celle des brebis, ou de la pulpe d'orange dans la ration des chèvres ont amélioré les qualités organoleptiques des fromages. Par contre, la texture et la flaveur des fromages n'ont pas été modifiées par l'introduction de feuilles de thym dans la ration des chèvres, de marc de tomate, de paille de lentilles ou de citrons entiers dans celle des brebis, dans ce dernier cas malgré une diminution de la lipolyse. Seules les feuilles

d'olivier ont été à l'origine de fromages de brebis moins appréciés, à la texture granuleuse. À ce jour, l'origine des différences observées reste insuffisamment explicitée. En outre, l'introduction d'ail dans la ration des vaches laitières, qui permet par ailleurs de réduire les émissions de méthane, a conduit à des fromages qui présentaient des arômes et des odeurs d'ail caractéristiques (Rossi *et al.*, 2018).

Effet des caractéristiques des animaux

Les fromages fabriqués avec du lait de vaches de **race** Prim'Holstein se caractérisent principalement par leur texture moins ferme et plus fondante et leur pâte plus jaune, par rapport aux fromages issus de lait de vaches de race Montbéliarde (Coulon *et al.*, 2005 ; Martin *et al.*, 2009). Cette particularité est principalement liée au rapport taux butyreux/taux protéique du lait, plus élevé pour celui des vaches Prim'Holstein, ce qui permet d'obtenir des fromages plus gras (rapport gras/sec généralement plus élevé). Dans la majorité des fabrications fromagères, le rapport taux butyreux / taux protéique étant standardisé au préalable (écrémage partiel), les différences de texture des fromages selon la race sont alors faibles ou ne sont pas détectées (Coulon *et al.*, 2005 ; Hurtaud *et al.*, 2009). Lorsque des différences de texture sont observées, les fromages fabriqués avec du lait de vaches montbéliardes sont légèrement plus fondants et moins fermes, vraisemblablement en raison de la composition en matières grasses de leur lait, qui contient légèrement moins d'acide palmitique (point de fusion élevé) et plus d'acides gras insaturés (point de fusion faible) (Verdier-Metz *et al.*, 1998). La race des vaches a peu d'effet sur l'arôme et le goût des fromages. Les fromages issus de vaches Prim'Holstein présentent généralement un arôme légèrement plus intense et une saveur moins acide que ceux issus de vaches montbéliardes, en lien avec une protéolyse légèrement plus rapide en cours d'affinage.

Les études relatives aux autres races bovines les comparent le plus souvent à la race Prim'Holstein. Le lait de vaches normandes, avec ses globules gras de taille plus importante, est à l'origine de fromages plus jaunes, légèrement plus fermes et au goût moins intense (Pont-l'Evêque au lait cru entier) ou moins collants (Camembert au lait cru standardisé) (Hurtaud *et al.*, 2009). Des fromages Saint-Nectaire fabriqués avec du lait de vaches tarentaises ont été globalement plus appréciés en bouche, grâce à leur texture légèrement moins ferme et plus fondante (Verdier-Metz *et al.*, 1998). Enfin, le lait de vaches de race Brune, plus riche en matières grasses et protéiques, coagule plus rapidement et conduit à un caillé plus ferme et à des fromages Caciocavallo qui se protéolysent plus rapidement au cours de l'affinage (Perna *et al.*, 2014).

Des études italiennes comparant différentes races de **chèvres** locales ont montré des effets sensibles sur la composition du lait et les qualités organoleptiques des fromages et, comme pour les vaches, en premier lieu sur leur texture (Jaramillo *et al.*, 2008 ; Pizzillo *et al.*, 2005 ; Soryal *et al.*, 2005).

L'effet des **variants des caséines β et κ** sur les caractéristiques organoleptiques des fromages affinés est moins documenté. Selon les études, soit ces variants n'ont pas de répercussions sur les caractéristiques physico-chimiques ou organoleptiques des fromages (Coulon *et al.*, 2005), soit ces répercussions sont indirectes. En raison de leur meilleure aptitude à l'égouttage, les **variants B** des caséines κ et β peuvent être à l'origine de fromages affinés légèrement plus secs, donc plus fermes, plus friables et moins élastiques et pour lesquels l'activité protéolytique est ralentie, en raison d'une activité de l'eau plus faible (Nuyts-Petit *et al.*, 1997 ; Ren *et al.*, 2013). Les variants B des caséines κ et β ont également été associés à une plus forte proportion d'acides gras synthétisés de novo et à une teneur plus faible en acides gras à 18 atomes de carbone, notamment en acide oléique, ceci étant susceptible de contribuer à l'obtention de fromages plus fermes (Bobe *et al.*, 2004 ; Melia *et al.*, 2009). D'autres variants, plus spécifiques à certaines races, comme le variant C de la caséine βrencontré chez les vaches de race Tarentaise, sont cependant susceptibles d'avoir des effets plus directs sur le comportement des laits lors de la coagulation et sur les caractéristiques sensorielles des fromages affinés (Coulon *et al.*, 2005). C'est le cas notamment du variant C de la caséine β, dont la fréquence allélique atteint 17 % en race Tarentaise, alors qu'il est quasi-absent dans la plupart des autres races françaises. Ce variant, compte-tenu de sa structure biochimique particulière, est dégradé plus lentement par la plasmine et conduit à des peptides spécifiques. Les fromages sont en conséquence plus fermes et moins élastiques, avec une flaveur particulière, jugée plus piquante et plus acide lors de micro-fabrications expérimentales de fromages à pâte pressée cuite (Marie et Delacroix-Buchet, 1994). En fruitière, les fromages Beaufort associés au variant C ont développé une flaveur qualifiée de plus intense et plus diversifiée, animale, lactée ou citronnée (Coulon *et al.*, 2005).

Par ailleurs, des travaux exploratoires réalisés sur des fromages fabriqués avec des laits individuels de vaches de race Brune ont établi que les teneurs en composés volatils des fromages présentent une héritabilité de l'ordre de 0,10 à 0,20, ce qui laisse entrevoir la possibilité de sélectionner les vaches sur ces traits et, ainsi, d'améliorer à terme la qualité sensorielle des fromages (Bergamaschi *et al.*, 2016).

Chez la **chèvre**, le polymorphisme de la caséine α_{S1} est associé à des variations de la qualité organoleptique des fromages. Les allèles qualifiés de forts (A, B et C), comparativement aux allèles qualifiés de moyens (E), faibles (D et F) ou nuls (O), conduisent à des fromages affinés avec une texture plus ferme et une flaveur chèvre moins prononcée (Chilliard *et al.*, 2014), en lien avec une moindre activité lipasique et une moindre teneur en acides gras libres (caproïque, caprilyque et caprique) (Skeie, 2014). En France, la sélection des chèvres de races Saanen *et* alpine oriente les phénotypes vers une augmentation de la fréquence des allèles forts et moyens, au détriment des allèles faibles. Cette sélection améliore l'aptitude fromagère du lait (meilleurs coagulation et rendement fromager),

mais la flaveur chèvre typique des fromages risque de devenir moins prononcée. Skeie (2014) considère cependant que la sélection des variants forts est favorable à la production de fromages de chèvre sans défaut de goût (rance notamment en lien avec la lipolyse), avec une teneur en eau mieux maîtrisée.

Au **cours de la lactation,** les modifications de la composition du lait et de son aptitude à la coagulation ont des conséquences sensibles sur la qualité organoleptique des fromages, en particulier en fin de lactation. Dans des zones d'élevage où la production laitière est très saisonnée (Irlande ou Nouvelle-Zélande par exemple), les fromages de fin de campagne laitière développent fréquemment des défauts de goût prononcés, en lien avec un égouttage difficile du caillé et des lipolyse et protéolyse plus rapides (Coulon *et al.*, 1998), notamment lorsque la numération cellulaire du lait est mal maîtrisée (Auldist *et al.*, 1996 ; Lucey, 1996). L'effet majeur du stade de lactation a récemment été confirmé par l'analyse des composés volatils, qui contribuent à la flaveur des fromages. Observé sur des fromages expérimentaux fabriqués avec des laits individuels, cet effet ne s'est pas limité à la fin de lactation, puisque de nombreux composés volatils ont évolué linéairement entre 50 et 300 jours de lactation (Bergamaschi *et al.*, 2015). Dans les élevages où les vêlages sont étalés au cours de l'année, les effets du stade de lactation sont peu perceptibles. En revanche, dans les élevages de **chèvres ou de brebis**, les mises-bas sont le plus souvent groupées du fait de la saisonnalité de la reproduction. Entre le début et la fin de lactation, le rendement fromager augmente de l'ordre de 10 %, avec cependant une coagulation plus lente, aboutissant à un caillé moins ferme et moins égoutté (Fekadu *et al.*, 2005 ; Jaramillo *et al.*, 2008 ; Novotna *et al.*, 2009 ; Soryal *et al.*, 2005). La qualité organoleptique des fromages évolue peu au cours de la lactation, sauf en toute fin de lactation où ils sont moins appréciés (Fekadu *et al.*, 2005 ; Sinanoglou *et al.*, 2015 ; Soryal *et al.*, 2005).

La transformation de lait présentant des **comptages cellulaires élevés** conduit généralement à des fromages mal égouttés, avec des défauts de texture et de flaveur plus ou moins importants. Leur texture est en général moins ferme et moins élastique que celle de fromages fabriqués avec un lait contenant peu de cellules somatiques, leur pâte est plus adhésive ; des flaveurs fortes, voire indésirables, se développent rapidement et provoquent parfois des défauts de goût (rance ou amer), liés à la lipolyse ou à la protéolyse (Auldist *et al.*, 1996 ; Cooney *et al.*, 2000; Coulon *et al.*, 2005). Ces effets sont dus à la fois aux modifications de composition du lait induites par le dysfonctionnement de la mamelle et à un effet direct des cellules somatiques, qui se lysent en cours d'affinage en libérant leur pool enzymatique. L'ampleur de ces effets est étroitement associée au nombre de cellules somatiques présentes dans le lait. Les seuils d'apparition des défauts organoleptiques sur les fromages sont vraisemblablement variables selon la technologie mise en œuvre, la modification de composition du lait apparaissant dès 200 000 cellules par ml (Coulon *et al.*, 2005). Un grand nombre de cellules somatiques dans le lait de **brebis** a des effets similaires à ceux observés chez la vache sur la texture et la flaveur des fromages, en particulier sur les fromages affinés (Coulon *et al.*, 2005) ; (Jaeggi *et al.*, 2003) ; (Miraglia *et al.*, 2014). Dans le lait de **chèvre**, l'effet le plus significatif d'un nombre élevé de cellules somatiques est le développement rapide et important de la flaveur chèvre dans les fromages, lié à un niveau de lipolyse plus intense. Cet effet, très perceptible sur des fromages frais, semble se réduire en cours d'affinage, mais ces fromages sont globalement moins appréciés (Chen *et al.*, 2010).

Sur le plan organoleptique, de nombreuses études relatent des différences majeures selon la **saison**. Les fromages d'hiver se distinguent le plus souvent par des odeurs et des arômes forts, jugés quelquefois moins agréables (Agabriel *et al.*, 2004 ; Carbonell *et al.*, 2002). Ce constat a parfois été relié à la nature et à la concentration des composés volatils des fromages, qui varient fortement avec la saison. Ces variations saisonnières ne peuvent cependant pas être attribuées à un effet spécifique de la saison, dans la mesure où ce dernier se combine avec ceux de l'alimentation et du stade physiologique des animaux, mais aussi avec ceux de la qualité bactériologique du lait et des conditions de transformation fromagère.

Lors de fabrication fromagère (type Cantal), le lait obtenu par **monotraite**, par rapport à celui trait deux fois par jour, coagule un peu plus lentement et conduit à un caillé plus ferme et à un rendement fromager légèrement plus élevé, sans entraîner de modifications de la composition chimique ou des caractéristiques organoleptiques des fromages affinés (Martin *et al.*, 2009). Chez les **chèvres**, la monotraite n'a pas non plus d'effets notables sur les caractéristiques organoleptiques des fromages, à l'exception d'une modification de leur texture (moins fondante et plus collante), liée à une diminution de la teneur en matières grasses des fromages, lorsque le rapport TB/TP du lait n'est pas standardisé (Dutot *et al.*, 2011). La **traite robotisée**, par rapport à la traite conventionnelle deux fois par jour, ne semble pas avoir d'influence notable sur les caractéristiques organoleptiques de fromages affinés, malgré l'augmentation de la lipolyse du lait due à l'augmentation du nombre moyen de traites quotidiennes (Abeni *et al.*, 2003 ; Innocente et Biasutti, 2013).

Il est important de rappeler que les **pratiques de traite** (hygiène notamment), la conception du matériel de traite et de stockage du lait cru, ainsi que sa durée de conservation au froid, jouent un rôle majeur sur la lipolyse et la protéolyse du lait, ainsi que sur la charge et la nature de la flore microbienne. Ces différents éléments ont des effets notables sur les caractéristiques sensorielles des fromages, en particulier dans le cadre de fabrication fromagère au lait cru, où la présence de flores indésirables est responsable de défauts spécifiques. En élevage caprin, la diversité et l'équilibre de la microflore naturelle du lait cru sont cruciales pour la réussite de la fabrication fromagère, notamment en technologie lactique fermière où le petit lait de la veille est traditionnellement utilisé

pour ensemencer le lait du jour, ce qui remplace souvent l'apport de ferments exogènes. Le principal réservoir de microflore d'intérêt fromager semble être la machine à traire, l'écosystème microbien du lait variant selon la conception, l'entretien et le lavage du local de traite et de la machine elle-même. Le type de litière (paille ou refus de foin) ou le type de bâtiment (séparation ou non entre l'aire de couchage et la salle de traite) ont également été identifiés comme jouant un rôle sur l'écosystème microbien du lait (Tormo *et al.*, 2015). Comme en élevage bovin, les pratiques d'hygiène modérées autour de la traite sont associées aux laits avec un niveau élevé de flore d'intérêt technologique.

Caractéristiques nutritionnelles du fromage

La teneur des fromages en composés d'intérêt nutritionnel dépend en premier lieu de leur teneur en eau, qui est très variable selon le type de fromage et, pour un même type de fromage, selon les procédés technologiques mis en œuvre, incluant la durée et les conditions de l'affinage. Les fromages sont d'autant plus riches en matières protéiques, matières grasses ou minéraux que leur teneur en eau est plus faible. Les composés d'intérêt nutritionnel susceptibles d'évoluer au cours de la transformation du lait en fromage sont les composés azotés (caséines, matières protéiques retrouvées dans le fromage, lactoferrine, peptides à activité biologique), le lactose, les minéraux et les vitamines hydrosolubles. Les matières grasses et les vitamines liposolubles du lait sont peu altérées au cours de la transformation fromagère, qui a pour action principale de les concentrer, à un niveau variable selon le type de fromages.

Matières protéiques

La teneur totale en matières protéiques du fromage est très variable selon le type de fromage ; elle est d'autant plus élevée que les fromages sont plus secs et moins gras. Comparativement au lait, la fabrication fromagère concentre les caséines et est à l'origine de la perte d'une partie des protéines solubles dans le lactosérum. D'autre part, les protéines du lait sont fortement remaniées par l'action de nombreuses protéases naturellement présentes dans le lait (plasmine par exemple), ou ajoutées (chymosine de la présure par exemple) ou produites par les micro-organismes intervenant au cours de la fabrication ou de l'affinage. La protéolyse des caséines est à l'origine de la libération de nombreux peptides, eux-mêmes dégradés en peptides plus petits et en acides aminés libres par les peptidases, dans un phénomène dynamique, tout au long de l'affinage.

Peptides bioactifs

Parmi les protéines laitières et la multitude de peptides libérés au cours de la transformation fromagère, certaines protéines sont dotées d'activités biologiques. Par exemple, les caséines permettent le transport de minéraux comme le calcium et le magnésium. La lactoferrine a la propriété de réguler certaines fonctions cellulaires, de transporter du fer, voire de moduler le système immunitaire et d'empêcher le développement de certaines formes de cancer. Les immunoglobulines assurent la défense immunitaire des nouveaux nés au niveau de leur système digestif, évitant ainsi les diarrhées. Certains peptides et acides aminés possèdent également des activités biologiques sur les systèmes cardiovasculaire, immunitaire, endocrinien, digestif et nerveux. On parle alors de peptides bioactifs, qui sont présents à l'état inactif dans la séquence des protéines et peuvent devenir bioactifs lorsqu'ils sont libérés, soit par des protéases du fromage, soit après ingestion par des protéases digestives. Parmi les nombreux peptides bioactifs identifiés, il en est qui permettent le transport des minéraux et leur absorption intestinale et qui sont impliqués dans la formation des os ou la protection de l'émail des dents contre les caries. D'autres, auraient des activités antihypertensives et pourraient permettre de diminuer les risques de maladies cardiovasculaires (Butikofer *et al.*, 2007; Gagnaire *et al.*, 2001).

La composition des fromages en peptides bioactifs est ainsi très variable selon la nature des protéases actives dans le fromage, dépendantes de la technologie fromagère. La nature des souches bactériennes des ferments utilisés peut influencer la teneur du lait et du fromage en peptides bioactifs. Par exemple, il a été montré que la biodiversité des souches de bactéries lactiques, ainsi que la combinaison de levains lactiques, notamment des lactobacilles thermophiles (*Lactobacillus helveticus* et *Lb. delbrueckii*) sont des outils puissants pour moduler la quantité de peptides à activité biologique. Ainsi, vingt-et-un peptides avec une activité antihypertensive potentielle ont été identifiés dans des fromages à pâte pressée cuite, quinze provenant de la caséine β, 4 de la caséine α_{s1} et 2 de la caséine α_{s2} (Gagnaire *et al.*, 2001). Par ailleurs, un grand nombre de peptides est produit pendant l'affinage des fromages, sous forme de précurseurs de peptides bioactifs ou potentiellement bioactifs. Certains sont susceptibles d'agir sur le système nerveux (opiacés) ou sur le système cardiovasculaire (antihypertensif). Certains peptides ayant une action sur le système nerveux ont par exemple été quantifiés par différents auteurs, entre 0,5 et 1,5 mg /100 g de Brie et de l'ordre de 35 mg /100 g d'Edam (Jarmolowska *et al.*, 1999 ; Sabikhi et Mathur, 2001). Des peptides transporteurs de minéraux ont été identifiés à hauteur de 1,5 g /100 g de Grana Padano (Addeo *et al.*, 1994; Addeo *et al.*, 1992). Quelques valeurs de variation de la teneur en peptides antihypertensifs, susceptibles de faire baisser la pression artérielle de sujets hypertendus, ont été récemment mesurées dans différents types de fromages. Les valeurs de concentration en peptides antihypertensifs obtenues montrent une très grande variabilité selon le type de fromage, plus élevées dans les fromages à affinage long (pâte pressée cuite et non cuite) que dans les fromages à pâte molle (Butikofer *et al.*, 2007). Parmi les peptides bioactifs recensés, certains ne sont pas dégradés dans le tube digestif après ingestion et sont donc à même de passer la barrière intestinale pour atteindre leur cible.

De façon générale, les protéines et peptides contenus dans les produits laitiers sont dégradés par les enzymes digestives, ce qui conduit à la libération de centaines de peptides bioactifs dans la lumière de l'intestin grêle au cours de la digestion. La nature des

peptides libérés semble peu variable selon le produit laitier ingéré, mais la quantité de peptides semble augmenter lorsque le pH du produit ingéré diminue (Turgeon et Dupont, 2018). Les recherches relatives à ce sujet ont permis d'identifier environ 16 000 peptides dans le chyme (contenu gastrique qui passe dans l'intestin), mais les facteurs de variations sont encore très mal connus.

Matières grasses et vitamines liposolubles

La **teneur totale du fromage en matières grasses** et composés liposolubles dépend d'une part de sa teneur en eau et, d'autre part, de l'ajustement du rapport taux butyreux/taux protéique du lait mis en œuvre. Ainsi, toutes les étapes du procédé technologique visant à réguler la teneur en eau du fromage ont un effet direct sur la quantité de matières grasses contenue dans le produit. L'ajustement du rapport taux butyreux/taux protéique du lait vise à standardiser le taux de gras/sec (G/S) dans le fromage. Il est réalisé par écrémage partiel ou total pour réduire la teneur en matières grasses du fromage, ou par ajout de crème pour obtenir un fromage plus gras (G / S > 55 g/100 g). L'ajustement du rapport taux butyreux/taux protéique a un effet sur la teneur en vitamines liposolubles du fromage, ces dernières étant localisées dans la fraction grasse du lait. Leur concentration est plus faible dans un lait ayant subi un écrémage et ceci de manière proportionnelle au taux d'écrémage. L'écrémage n'a pas d'impact sur la fraction protéique du lait ni sur sa teneur en minéraux.

La **composition des matières grasses** de tous les fromages dépend directement et principalement de la composition initiale du lait, ceci étant vrai aussi pour le beurre. Tous les facteurs de variation synthétisés pour le lait cru sont également valables pour le fromage. La composition des matières grasses des fromages est très peu affectée par les procédés technologiques, y compris pour les acides gras d'intérêt nutritionnel minoritaires, tels que ceux de la famille des oméga 3 (α-linolénique, EPA, DHA…) ou des CLA (acide ruménique notamment). Le choix des levains utilisés semble avoir un effet marginal sur le profil en acides gras des fromages, comparativement à l'effet majeur de la composition initiale du lait. La structure de matières grasses des fromages peut être modifiée par une homogénéisation des matières grasses du lait avant la mise en fabrication. Les conséquences de cette technique sur les caractéristiques nutritionnelles des produits sont détaillées précédemment.

Lactose

D'une manière générale, les fromages affinés ne contiennent pas ou très peu de lactose. Ce dernier est transformé en lactates (L ou D, selon les bactéries lactiques présentes), qui seront repris ensuite au cours de l'affinage pour être transformés en différents composés sapides et odorants, selon les microorganismes impliqués. La quantité de lactose restant dans le fromage au début de l'affinage (ou caillé 20 heures) dépend de la technologie utilisée. Par exemple, dans les fromages très égouttés comme les fromages à pâte pressée cuite, ou lorsqu'un délactosage (remplacement d'une partie du lactosérum par de l'eau) est réalisé en cuve, le lactose a totalement disparu après une dizaine d'heures de pressage (1 g/kg au maximum). Dans les fromages à pâte molle ou persillée, ou dans les fromages lactiques, la quantité de lactose en début d'affinage est nettement plus importante (de 4 à 30 g/kg), mais ce lactose est ensuite dégradé progressivement en cours d'affinage (8 à 30 jours selon le type de fromage). Les variations éventuelles de la teneur du lait en lactose n'ont aucun impact sur l'éventuelle présence de lactose résiduel dans le fromage.

Minéraux

Calcium

La teneur des fromages en calcium est extrêmement variable ; elle est susceptible de varier selon un facteur de 10 en fonction du type de fromage. La minéralisation des caillés au cours de la fabrication, et ainsi la teneur en calcium du fromage affiné, dépend en premier lieu de la chronologie des étapes d'acidification et d'égouttage. Si l'acidification est suivie de l'égouttage, les minéraux solubilisés au cours de l'acidification (comme une grande partie du phosphate de calcium micellaire) sont éliminés dans le lactosérum. C'est le cas des caillés lactiques, qui, au démoulage, ont un pH inférieur à 5, sont très humides, faiblement minéralisés et présentent une structure relativement fragile. À l'inverse, si l'égouttage se fait avant ou pendant l'acidification, les minéraux restent dans le caillé. C'est le cas des caillés présure qui, au démoulage, ont un pH supérieur à 5, sont très égouttés avec un fort extrait sec et sont très minéralisés, dans la mesure où une partie du phosphate de calcium micellaire est restée associée à la matrice protéique. En technologie fromagère, la majorité des caillés est fabriquée en associant coagulations acide et présure, ce qui permet l'obtention d'une grande diversité de caillés en termes de structure, de composition et donc de minéralisation. Pour les technologies où l'acidification précède l'égouttage, comme pour les pâtes fraîches, la teneur en calcium est faible (de l'ordre de 0,1%) ; cette teneur augmente progressivement lorsque les étapes d'acidification et d'égouttage s'inversent, comme dans le cas de fabrication de fromages à pâte pressée cuite, pour lesquels la teneur en calcium est de l'ordre de 1,0 à 1,2% (figure 2). En outre, le chauffage en cuve favorise la fixation de calcium aux caséines et augmente encore la teneur en calcium des fromages à pâte pressée cuite (Comté par exemple).

Au-delà ces effets bien connus du travail en cuve, d'autres facteurs ont également un impact sur la teneur des fromages en minéraux. La teneur initiale du lait en calcium ne semble pas avoir d'effet sur celle du fromage (Lucas *et al.*, 2006). En revanche, les traitements technologiques qui agissent sur la répartition entre le calcium micellaire et le calcium soluble du lait sont susceptibles de moduler la rétention du calcium dans le fromage.

Le **refroidissement du lait** à la ferme à 4°°C, juste après la traite, affecte les équilibres minéraux du lait. Schématiquement, la solubilité du phosphate de calcium de la phase aqueuse du lait est plus importante à basse température, ce qui a pour conséquence un transfert d'ions calcium et phosphate inorganique de la phase micellaire (phosphate de calcium colloïdal) vers la phase aqueuse. Quantitativement, ce transfert de calcium est de l'ordre de 10% pour le lait de vache, 7% pour le lait de chèvre et quasi nul pour le lait de brebis, après 48 heures à 4°°C. Ces altérations liées au refroidissement du lait sont partiellement réversibles grâce à des traitements technologiques permettant d'en corriger en partie les effets (ajout de chlorure de calcium, maintien à une température de 30°°C pendant 2 heures ou prématuration pendant 15 heures à 10°°C). Lorsque ces traitements ne sont pas appliqués, les fromages affinés contiennent moins de calcium, car ce dernier est perdu en plus grande quantité dans le lactosérum (Beuvier *et al.*, 2014).

De même, lors d'un **traitement thermique** du lait à 70-75°°C pendant plusieurs secondes, il se produit une insolubilisation/précipitation de phosphate de calcium dans la phase aqueuse du lait, qui est déjà saturée en ce sel. Il est admis que ces modifications d'équilibres minéraux sont réversibles. Dans certaines technologies fromagères, le lait, après avoir été refroidi à 4°°C puis traité thermiquement, peut être enrichi en calcium, de façon à corriger les défauts de coagulation induits. Le sel le plus utilisé est le chlorure de calcium (CaCl2). Les quantités ajoutées, le moment de l'addition et la forme (liquide ou en poudre) sont variables et dépendent du schéma technologique.

L'adjonction précoce de sel au cours de la fabrication fromagère est responsable d'une solubilisation partielle du calcium colloïdal associé aux micelles de caséines. Ce phénomène, très dépendant de la valeur du pH, a pour conséquence une solubilisation d'une partie du calcium lié aux micelles de caséines, ce calcium étant partiellement perdu au cours de l'égouttage du caillé. Le salage précoce des fromages en cours de fabrication est utilisé notamment pour la fabrication du Cantal et du Cheddar, pour lesquels une étape d'égouttage et de premier pressage est suivie par un broyage et un salage dans la masse, suivi d'un nouveau moulage puis pressage.

Les coefficients d'absorption du calcium des produits laitiers sont élevés (30 à 35%), notamment en présence de vitamine D, et du même ordre de grandeur que celui des eaux minérales calciques, et plus élevés que celui de la plupart des végétaux. La biodisponibilité du calcium semble équivalente entre le lait et les fromages, et entre les différents types de fromage (Pointillard et Gueguen, 2004). La présence de calcium dans les produits laitiers est également connue pour réduire l'absorption intestinale des acides gras saturés à longues chaînes, en raison d'une augmentation des pertes fécales de lipides, sous forme de savons insolubles (Guéguen et Pointillart, 2008). Ces pertes plus importantes de lipides sont susceptibles de limiter l'augmentation du cholestérol total et LDL (Soerensen *et al.*, 2014).

Autres minéraux du lait

Comme pour le calcium, les teneurs des fromages en phosphore, potassium, magnésium, zinc, fer, iode ou sélénium sont très variables et dépendent principalement des procédés technologiques mis en œuvre, notamment lors du travail du lait en cuve, dans la mesure où les minéraux présents dans le caillé ne sont ni perdus ni modifiés au cours de l'affinage. À partir d'un caillé donné, la teneur du fromage en minéraux augmente au cours de l'affinage proportionnellement à l'augmentation de sa teneur en matière sèche.

Néanmoins, dans le cadre de certaines fabrications traditionnelle à pâte pressée cuite, l'utilisation d'une cuve en cuivre peut entraîner une augmentation très notable de la teneur en cuivre du fromage. Par exemple, ces teneurs en cuivre peuvent atteindre 17 µg/g de fromage, alors que le même fromage fabriqué dans une cuve en acier inoxydable en contient de 0,5 à 1,5 µg/g. En règle générale, la fabrication fromagère est réalisée dans une cuve en acier inoxydable, matériau qui, dans ce contexte d'utilisation, ne libère pas de composés pouvant se retrouver dans le produit laitier.

Teneur en sel des fromages

La teneur en sel des fromages dépend des pratiques de salage propres à chaque technologie. Le salage correspond à l'action d'apporter du sel (NaCl) en cours de fabrication, sous forme de sel sec ou de saumure. Il permet de compléter l'égouttage. La prise de sel par le caillé est variable selon le fromage désiré et selon la forme d'apport du sel ; le salage à sec est surtout utilisé en technologie pâte molle, alors que le saumurage est plus utilisé en technologie pâte pressée non cuite ou cuite. Dans les pratiques de salage, le sel est dans un premier temps réparti à la surface du caillé et contribue à la formation de la croûte ; dans un second temps, le sel migre de la périphérie vers l'intérieur du caillé. En parallèle de ces migrations de sel dans le caillé, des transferts d'eau se font en sens inverse. Les conséquences de cette double migration de sel et d'eau sont des changements de structure du caillé, avec notamment une augmentation de sa compacité. Le salage permet aussi de réduire l'activité de l'eau, ce qui a comme conséquence de modifier les développements microbiens et d'orienter leurs activités enzymatiques, qui se mettent en place lors de l'affinage. Au cours des dernières années, de nombreux travaux ont étudié différents protocoles pour réduire la teneur en sel des fromages, sans altérer leurs caractéristiques gustatives. De façon générale, il s'avère que des teneurs réduites en sel rendent les fromages plus sensibles aux flores indésirables et pathogènes, avec une protéolyse de la caséine β plus orientée vers la libération de peptides amers. En pratique, une réduction de 20 à 30% de la teneur en sel dans le fromage peut être mise en œuvre sans altérer de façon

notable la qualité gustative de la plupart des fromages (Guinee et O'Kennedy, 2007). Cependant, cette réduction de la teneur en sel est plus délicate à gérer dans les fromages à croûte lavée ou à pâte persillée, où le sel joue un rôle crucial pour la sélection de la microflore spécifique à ces types de fromages. Ces fromages, notamment à pâte persillée, sont pourtant en moyenne plus salés que les fromages à pâte pressée cuite ou non cuite (Richoux et Mietton, 2018). Afin de maintenir à l'identique la saveur salée des fromages et la sélection des microflores, la substitution partielle du NaCl par d'autres sels a fait l'objet d'études. Par exemple, la substitution de 30% de NaCl par du chlorure de potassium semble avoir peu de répercussions sur les caractéristiques gustatives des fromages, alors que le chlorure de calcium ou de magnésium sont à l'origine d'effets négatifs plus marqués (Grummer *et al.*, 2012).

Vitamines hydrosolubles

Les vitamines hydrosolubles, essentiellement du groupe B, sont présentes en quantité importante dans le fromage. Elles proviennent directement du lait ou de la biosynthèse microbienne lors de l'affinage. Les facteurs de variation de la teneur du lait cru en vitamines hydrosolubles sont décrits précédemment. La variabilité observée dans le fromage est principalement liée à l'effet des procédés technologiques. Ainsi, les fromages à pâte pressée cuite sont globalement les moins riches en vitamines B_2, B_6 et B_9, les fromages à pâte persillée se singularisent par des teneurs plus élevées en vitamines B_2 et B_6, alors que les fromages à croûte fleurie ont des teneurs élevées en vitamines B_6 et B_9.

La majorité des bactéries lactiques est auxotrophe pour plusieurs vitamines, c'est-à-dire incapables de les synthétiser. Néanmoins, il est reconnu que certaines souches sont capables de synthétiser des vitamines hydrosolubles du groupe B, telles que les vitamines B_9, B_2 et B_{12}. Lors de la fabrication de fromages, *Lactococcus lactis* ou *Streptococcus,* utilisés comme levains, synthétisent la vitamine B_9. Cette dernière vitamine, ainsi que la vitamine B_6, peuvent également être synthétisées par des levures et des moisissures, qui se développent à la surface de certains types de fromages, en cours d'affinage. De même, les bactéries propioniques, à l'origine de l'ouverture (yeux) des fromages de type Suisse, sont capables de synthétiser la vitamine B_{12} en cours d'affinage.

La pasteurisation basse (72°°C pendant 15 s) diminue le taux des vitamines B_1, B_6, B_9, B_{12} et C dans le lait et le fromage correspondant. Les diminutions rapportées sont variables en fonction des auteurs et peuvent atteindre jusqu'à -15%.

En résumé, la teneur des fromages en composés d'intérêt nutritionnel est très dépendante du type de fromage. Elle est d'autant élevée que la teneur en eau du fromage est faible. La composition des matières grasses du fromage et des composés liposolubles dépend avant tout des conditions de production du lait, en particulier de l'alimentation des animaux. En revanche, la teneur du fromage en matières protéiques, minéraux et vitamines hydrosolubles est principalement le reflet des procédés technologiques, les caractéristiques initiales du lait jouant un rôle secondaire.

Caractéristiques sanitaires des produits laitiers fermentés

Les produits laitiers fermentés (yaourts) présentent de hauts niveaux de maîtrise des risques sanitaires. La fermentation assure une chute rapide du pH, ce qui garantit l'absence de croissance des flores pathogènes dans les produits fabriqués (Papademas et Bintsis, 2010). Le niveau de sécurité des produits non fermentés est généralement assuré par la pasteurisation des produits emballés (crème dessert) et par l'indication de durées de vie appropriées (Papademas et Bintsis, 2010).

Les dangers microbiologiques associés à la crème ou au beurre comprennent *Salmonella spp.,* les *E. coli STEC, L. monocytogenes* et *S. aureus (van Asselt et al., 2017).* Toutefois, peu de cas de toxiinfections alimentaires associées à ces produits sont signalés (Lyytikainen *et al.*, 2000).

Les niveaux de risques microbiologiques des fromages dépendent fortement de la qualité sanitaire des laits utilisés, du traitement thermique apporté au lait, des différentes technologies fromagères, des flores microbiennes non pathogènes et des durées d'affinage. Les fromages à pâte pressée cuite, qu'ils soient fabriqués à partir de lait cru ou non, présentent de faibles niveaux de risques. Les fromages à pâte molle et à pâte pressée non cuite sont principalement concernés par *Salmonella*, *E. coli STEC*, *L. monocytogenes* et *S. aureus* à coagulase positive. Des épidémies associées à ces agents interviennent régulièrement en France (Jones *et al.*, 2019b ; Moura *et al.*, 2017 ; Roussel *et al.*, 2015 ; Ung *et al.*, 2019). Ces dangers proviennent majoritairement de l'utilisation de lait cru, mais concernant *L. monocytogenes*, des fromages au lait pasteurisé peuvent aussi être contaminés par diverses sources au sein des ateliers de production (Tenenhaus-Aziza *et al.*, 2014). Au-delà des risques liés à l'utilisation de lait cru, plusieurs études épidémiologiques récentes sur des grandes cohortes suggèrent que le lait cru ou les fromages au lait cru pourraient protéger contre les allergies et autres maladies atopiques, mais aussi des pathologies respiratoires. Par exemple, Vuitton *et al*. (2019.) soulignent le rôle positif de l'environnement fermier et de la consommation de lait cru, pour expliquer la plus faible incidence de ces pathologies allergiques chez des enfants de milieu rural, ayant grandi dans des fermes laitières ou non (cohorte PASTURE). Le lien entre la consommation de fromage au lait cru et la santé humaine n'est pas encore expliqué mais ces travaux prometteurs sont en cours.

Le camembert

Le Camembert de Normandie AOP est un fromage au lait de vache cru, à pâte molle et à croûte fleurie, qui a la forme d'un cylindre plat (3 cm d'épaisseur et 11 cm de diamètre). Il pèse au moins 250 g, contient au moins 115 g de matière sèche par fromage et 45 g

de matières grasses par 100 g de fromage sec. La croûte, dite « fleurie », est blanche, à moisissures superficielles constituant un feutrage blanc pouvant laisser apparaître des taches rouges selon le degré d'affinage. La pâte est de couleur ivoire à jaune clair, lisse et souple quand elle est affinée à cœur, avec une saveur légèrement salée, d'abord lactée et douce, puis plus franche et fruitée avec davantage d'affinage.

Le Camembert de Normandie a été reconnu en AOC (appellation d'origine contrôlée) en 1983 en France, puis en AOP (appellation d'origine protégée) en 1996 en Europe. Sa fabrication, depuis la production du lait jusqu'à son conditionnement, est encadrée par un cahier des charges. Les principaux critères d'élevage portent sur la zone de production, sur la place donnée à la race Normande, ainsi que sur l'importance des surfaces en herbe dans les exploitations et de l'herbe dans l'alimentation des vaches. Le cahier des charges impose également l'utilisation de lait cru (République Française, 2013). Le Camembert de Normandie AOP est fortement concurrencé par le fromage appelé Camembert fabriqué en Normandie, non soumis au cahier des charges de l'AOP. Ce fromage est produit avec du lait pasteurisé (70°°C) et standardisé en matières grasses et protéiques, ce qui permet de sécuriser le produit et d'augmenter le rendement (Pereira et Sperat-Czar, 2019). La coexistence du Camembert de Normandie AOP et du Camembert fabriqué en Normandie génère de la confusion auprès des consommateurs. Afin de mettre fin à cette situation, une réflexion a été conduite entre l'INAO et les acteurs de la filière. L'objectif était de rassembler toute la production normande de camembert dans une même AOP Camembert de Normandie et de supprimer la mention « fabriqué en Normandie » (Dufumier, 2018) ; (Pereira et Sperat-Czar, 2019). Il a été proposé de distinguer deux types de fromages au sein de cette appellation : le Véritable Camembert de Normandie et le Camembert de Normandie cœur de gamme. Pour le Véritable Camembert de Normandie, il était prévu de renforcer le cahier des charges actuel, en augmentant la part de vaches de race Normande et la place de l'herbe dans les systèmes de production. Pour le Camembert de Normandie cœur de gamme, qui devait permettre d'intégrer une partie des producteurs actuels de Camembert fabriqué en Normandie, il était prévu un assouplissement du cahier des charges actuel (part moindre de race Normande et de surface en herbe) et l'autorisation d'une fabrication avec du lait pasteurisé selon un procédé moins contraignant (tableau 2.7.4).

L'objectif de ces évolutions était de permettre une montée en gamme du Véritable Camembert de Normandie, ainsi que du Camembert fabriqué en Normandie (sans cahier des charges), qui serait devenu Camembert de Normandie cœur de gamme, soumis à un cahier des charges. Une meilleure valorisation du lait pour les producteurs était espérée. Les volumes produits en A.O.P. devaient augmenter, puisqu'une part significative des actuels fromages « fabriqués en Normandie » (60 000 t) devait intégrer l'AOP en tant que « cœur de gamme » et s'ajouter ainsi au 5 840 t de Camembert de Normandie AOP produites actuellement (INAO, 2019). Lors de l'assemblée générale des professionnels de l'ODG (organisme de défense et de gestion) Camembert de Normandie du 29 janvier 2020, cette proposition de nouveau cahier des charges a été rejetée, ce qui a remis en cause la volonté de réunir les deux types de Camembert sous une même AOP. Ce projet avait soulevé de nombreuses polémiques au sein de la filière, les producteurs craignant que les camemberts traditionnels au lait cru moulés à la louche soient noyés dans la masse des camemberts AOP et que les consommateurs ne les distinguent plus. Au-delà de la filière, la bataille pour le Camembert au lait cru a largement été médiatisée, notamment par les actions de l'association Fromages de terroirs, avec une pétition signée par de nombreuses personnalités de la gastronomie française en 2018 et une dégustation organisée à l'Assemblée Nationale en 2019 (Jenvrin, 2019).

Caractéristiques organoleptiques du Camembert

Le Camembert est caractérisé par une croûte blanche formée par le *Penicillium camemberti*, qui lui donne un arôme unique et une flaveur caractéristique (Galli *et al.*, 2016). Cette moisissure lui confère une saveur, un arôme et une texture caractéristiques, associés à l'intensité de l'action lipolytique et protéolytique pendant la maturation. La lipolyse des triglycérides se déroule quand les conditions sont favorables, le processus étant assez accéléré en présence de lipases. Les moisissures utilisées pour la maturation du Camembert ont un système lipolytique produisant des lipases extracellulaires actives dans une plage de pH entre 3,5 à 11,5, idéalement autour de 8,5. Ces lipases libèrent des acides gras libres qui donnent du goût au fromage (D'Arce, 2006 ; McSweeney, 2004). Le type de souche de moisissure utilisée dans la maturation du Camembert affecte directement l'arôme et la saveur du fromage, car la lipolyse génère différents types d'acides gras, perçus différemment par le consommateur (Fox *et al.*, 2000).

La **pasteurisation du lait** réduit la lipolyse et la protéolyse, qui génèrent une diversité de composants odorants, incluant les acides, les alcools, les cétones, les esters et les acides aminés (Chambers *et al.*, 2010). D'après Chambers *et al*. (2010), le Camembert serait différent des autres fromages à pâte molle et à croûte fleurie. Dans leur étude, le Camembert fabriqué à partir de lait pasteurisé a obtenu des scores plus élevés que le Camembert au lait cru pour les attributs « fermenté », « ammoniac », « choucroute », « animal » et « piquant ». Il est possible que la maturation provoquée par la moisissure ait interagi différemment en présence de bactéries naturelles dans le fromage au lait cru, ou que cet échantillon de fromage particulier ait davantage maturé que celui de camembert au lait cru.

Le futur cahier des charges du Camembert de Normandie prévoit d'imposer une **part d'herbe plus importante dans la ration des vaches** pour le véritable Camembert de Normandie. En conséquence, ce fromage aura une pâte plus jaune (Hurtaud *et al.*, 2009), comme cela a été observé dans le cas de fromages produits dans d'autres régions de France (Coulon *et al.*, 2004). Le Véritable

Camembert de Normandie sera également moins dur et plus fondant, en raison de la modification du profil en acides gras du lait, associée à un apport d'herbe plus important dans la ration des vaches. Notamment, le ratio acide oléique / acide palmitique (C18:1*cis*9 / C16:0, encore appelé indice de tartinabilité), sera plus élevé (Coulon *et al.*, 2004). La présence de ces acides gras augmente la fluidité de la matière grasse et conduit ainsi à des fromages plus mous.

L'**augmentation de la part de vaches de race Normande** dans les troupeaux, aussi prévue dans le futur cahier des charges pour le Véritable Camembert de Normandie, va avoir des conséquences sur les camemberts. Le lait des vaches de race Normande conduit à la fabrication de fromages plus jaunes, par rapport au lait de vaches de race Prim'Holstein (Hurtaud *et al.*, 2009). Ce résultat pourrait être une conséquence de la présence de globules gras plus gros dans le lait des vaches de race Normande. En effet, selon Michalski *et al*. (2003), les laits avec de gros globules gras semblent permettre la production de fromages plus jaunes. Cette différence de couleur pourrait également être liée à une différence dans le métabolisme des caroténoïdes entre les deux races (Noziere *et al.*, 2006b), ou à un différentiel d'expression du gène *BCO2* chez les vaches de race Normande (Berry *et al.*, 2009).

Tableau 2.7.4. Camembert de Normandie AOP : Comparaison entre le cahier des charges actuel et le projet envisagé depuis 2018 par l'INAO et les professionnels de la filière (+ plus contraignant ; = mêmes contraintes ; - moins contraignant ; -- beaucoup moins contraignant).

	Projet Véritable Camembert de Normandie	Cahier des charges actuel	Projet Camembert de Normandie cœur de gamme
Race Normande	+	50% du troupeau au minimum	-
Surface en herbe	+	0,25 ha pâturable / vache accessible du lieu de traite 2 ha de prairie / ha de maïs ensilage	-
Pâturage	=	6 mois/an minimum	=
Origine de la ration de base	=	Issue à 80% de l'exploitation	-
Part d'herbe dans la ration	+	Foin tous les jours hors de la période de pâturage	-
Aliments complémentaires	+	1 800 kg/vache/an au maximum Céréales et coproduits, protéagineux, oléagineux et coproduits, pulpe végétale, etc..	+
Lait	=	Lait cru Standardisé en matières grasses (écrémage partiel) Interdiction de traitement thermique > 40 °C Interdiction de concentration du lait	- -
Transformation du lait et affinage du fromage	=	Présure animale Autorisation léger tranchage vertical du caillé Interdiction soutirage du sérum Moulage juste après le tranchage. Caillé mis en moules en 5 passages minimum espacés d'au-moins 40 mn Égouttage spontané 18 h (1 seul retournement) Salage au sel sec Affinage au moins 22 jours	- -
Source INAO, 2013			

Deux fromages italiens d'AOP à pâte dure : Grana Padano et Parmigiano Reggiano

Le Grana Padano et le Parmigiano Reggiano ont une histoire commune. Leur production était encadrée depuis les années 1950 par la législation italienne et ils ont été reconnus en AOP en Europe en 1996. Ce sont deux fromages au lait de vache cru, partiellement écrémé par crémage naturel, à pâte cuite, dure et à maturation lente. Ils ont une forme cylindrique (18 à 26 cm de hauteur, 35 à 45 cm de diamètre), avec un talon légèrement convexe ou presque droit, pour un poids de 24 à 40 kg (32 kg au minimum pour le Parmigiano Reggiano) et un rapport gras sur sec minimum de 32%. Leur croûte est dure et lisse, de couleur jaune doré foncé, d'une épaisseur de 4 à 8 mm. La pâte est blanche ou de couleur paille, dure, à structure finement grainée. Au niveau sensoriel, ils sont décrits par un arôme parfumé et une saveur délicate. Ils sont commercialisés entiers, en tranches ou râpés.

Ces deux fromages se différencient aujourd'hui par leurs zones de production et les contraintes de fabrication imposées par leurs cahiers des charges, le Grana Padano étant produit sur une zone géographique beaucoup plus vaste que celle du Parmigiano Reggiano, selon des critères d'élevage et de fabrication moins contraigrants.

Grana Padano

Le Grana Padano est affiné au minimum 9 mois. Après 20 mois d'affinage, les fromages peuvent recevoir le label supplémentaire de « Réserve ». Avec une **production totale** annuelle d'environ 4,9 millions de fromages (soit 157 000 tonnes par an), le Grana Padano est, en termes de quantité produite, le 1er fromage d'AOP d'Europe (CLAL 2019)[39].

La **zone de production** du Grana Padano correspond globalement à la plaine du Pô. Elle comprend les régions du Piémont, de la Lombardie (sauf une petite portion du département de Mantova), de l'Émilie-Romagne (à l'exclusion de la zone d'AOP du Parmigiano Reggiano), une partie de la Vénétie, la province de Trentin et quelques communes du Haut-Adige. Ce territoire est caractérisé par une densité de population assez élevée, ce qui limite de manière importante la disponibilité des surfaces agricoles. Ce facteur, associé à la bonne fertilité des sols, à la disponibilité en eau et au climat favorable, a contribué à faire du maïs la culture principale. En conséquence, les éleveurs adhérents à l'AOP Grana Padano utilisent le maïs ensilé comme fourrage principal dans la ration des vaches laitières.

La ration de base quotidienne des vaches laitières doit contenir au moins 50% (en matière sèche) de fourrages verts ou conservés produits dans la zone d'appellation, et au moins 75% (en matière sèche) de cette ration doit provenir de la zone d'AOP Les fourrages herbagers et les céréales (dont le maïs) peuvent être utilisés frais ou séchés. Les seuls fourrages fermentés autorisés sont l'herbe enrubannée et l'ensilage de maïs plante entière. Les principaux concentrés admis sont le maïs (épis ou grains), les céréales et leurs dérivés, les graines oléagineuses et leurs dérivés, les suppléments lipidiques végétaux. Le cahier des charges n'impose aucune restriction de **races de vaches**, la plus utilisée étant la race Prim'Holstein.

Le Grana Padano est produit à partir de lait cru de vaches traites deux fois par jour et collecté dans les vingt-quatre heures. Le lait est mis à reposer dans de grandes cuves en cuivre à une température entre 8 et 20 °C, pour favoriser le crémage naturel et l'écrémage partiel, de manière à ce que le rapport matières grasses/caséines soit compris entre 0,80 et 1,05. La coagulation est obtenue avec de la présure de veau, après addition de lactosérum naturel issu de la fabrication de la veille. Afin d'inhiber le développement de spores butyriques potentiellement présentes dans le lait et d'éviter des gonflements tardifs au cours de l'affinage, du lysozyme extrait d'œufs est ajouté au cours de la fabrication. Le tranchage du caillé est poussé jusqu'à obtenir des grains, qui sont ensuite cuits à une température maximale de 56 °C. Ils sont ensuite laissés en immersion dans le sérum pendant au maximum 70 minutes à compter de la fin de la cuisson.

Le Trentingrana est une différentiation mentionnée dans le cahier des charges du Grana Padano. Il représente environ 3% de la production annuelle de Grana Padano. La zone de production du Trentingrana est limitée aux zones montagnardes, en particulier à la région du Trentin-Haut-Adige. Tous les fourrages ensilés sont interdits et les vaches sont alimentées principalement avec du foin. Le Trentingrana diffère aussi par le rapport matières grasses/caséines, qui peut être au maximum de 1,15, alors qu'il est de 1,05 pour le Grana Padano.

Parmigiano Reggiano

Le Parmigiano Reggiano est affiné au minimum 12 mois. Les fromages qui ne présentent aucun défaut peuvent recevoir le label supplémentaire de « Premium » après 24 mois d'affinage.

La **production totale** annuelle de Parmigiano Reggiano est environ de 3,7 millions des fromages, soit 130 000 tonnes par an. La **zone de production** correspond à une partie de la province de Bologne (gauche du fleuve Reno), aux provinces de

[39] Clal, 2019. *Il mercato del latte*.www.Clal.it

Mantoue (droite du fleuve Pô), de Modène, de Parme et de Reggio d'Émilie. Cette zone comprend la partie de la plaine du Pô qui n'est pas incluse dans la zone d'A.O.P. du Grana Padano.

L'alimentation des vaches exclut tous les types d'ensilage et certains aliments concentrés. Sont par exemple interdits plusieurs types des graines oléagineuses et leurs sous-produits, ainsi que les supplémentations lipidiques. Comme pour le Grana Padano, la part de concentrés ne peut pas dépasser 50% de la ration journalière (en matière sèche).

La **technologie fromagère** du Parmigiano Reggiano se différencie de celle du Grana Padano par le fait que le lait doit être livré à la laiterie dans les deux heures après chaque traite. Le lait du soir est laissé à reposer dans de grands bacs en inox, pour obtenir un crémage naturel. Seul le lait de la traite du soir est partiellement écrémé, puis mélangé avec le lait du lendemain matin, de façon à obtenir un rapport matières grasses/caséines de 1,1 à 1,2. Les ensilages étant interdits dans l'alimentation des vaches, il n'est pas nécessaire d'ajouter du lysozyme dans le lait.

Le **Parmigiano Reggiano di Razza Reggiana (ou "di Vacche Rosse")** est un label supplémentaire non mentionné dans le cahier des charges de l'AOP Parmigiano Reggiano, qui impose que le lait soit produit par des vaches de race Reggiana, race locale et historique à l'origine de ce fromage. Les vaches de cette race, caractérisées par un manteau rouge (d'où l'appellation « Vacche Rosse » - vaches rouges) sont en voie d'extinction. La mise en place de ce label a permis de les sauvegarder. Pour mieux valoriser ce fromage, qui est une production de niche, l'affinage est fixé au minimum à 24 mois.

Conséquences de l'application des cahiers des charges sur les qualités sensorielles et nutritionnelles des fromages et sur la durabilité des systèmes d'élevage.

Les caractéristiques agro-climatiques des zones de production du Grana Padano et du Parmigiano Reggiano font que les systèmes d'élevage y sont parmi les plus intensifs d'Europe. Les proportions d'aliments concentrés dans la ration sont très élevées. Dans le cas du Grana Padano, les concentrés sont des sources de protéines (principalement le soja) et l'ensilage de maïs constitue la principale source d'énergie de la ration fourragère (Borreani *et al.*, 2013). Pour le Parmigiano Reggiano, le fourrage de base est le foin, avec une large part de foin de luzerne (vu la limitation des sources de protéines dans les concentrés), l'énergie de la ration étant fournie par les céréales (notamment le maïs) (Comino *et al.*, 2015). Les contraintes du cahier des charges du Parmigiano Reggiano ont été historiquement compensées par un prix du lait à la ferme plus élevé d'environ 60% par rapport à celui du lait en AOP Grana Padano.

Ces alimentations sont connues pour être à l'origine d'un lait riche en acides gras saturés et en acides gras insaturés oméga 6, profil moins favorable sur le plan nutritionnel, par rapport à des systèmes d'élevage herbagers. Ce profil en acides gras contribue également, en plus de l'écrémage, à rendre la texture du Grana Padano assez ferme, peu fondante et peu collante, caractéristique de ce fromage et très appréciée par les consommateurs. Il est ainsi très facile à râper. Le Parmigiano Reggiano est plus gras et présente, à même stade d'affinage, une texture moins ferme et plus fondante que celle du Grana Padano. Le Parmigiano Reggiano demande de ce fait un affinage plus long pour avoir des caractéristiques sensorielles comparables à celles du Grana Padano.

L'affinage long de ces deux fromages permet la complète dégradation du lactose, ce qui a permis l'obtention du label « aliment sans lactose ». Ceci s'est révélé un argument commercial très porteur, vu l'augmentation des intolérances au lactose dans la population. Ces deux fromages sont aussi, comme tous les fromages à pâte pressée cuite, très riches en calcium.

L'alimentation riche en aliments concentrés et pauvre en fibres des vaches utilisées pour la production de ces deux fromages d'AOP est intéressante en termes d'émission de Gaz à effet de serre (GES, méthane notamment) par rapport à des systèmes herbagers, si elles sont rapportées au kilogramme de lait. À l'opposé, les émissions de GES sont très importantes si elles sont rapportées à l'hectare. Ces systèmes, qui utilisent beaucoup d'intrants, sont aussi surveillés en raison du risque d'eutrophisation du sol et de l'eau. La surface d'épandage des fumiers est en effet limitée compte tenu du chargement élevé des surfaces agricoles. Ces systèmes, utilisant beaucoup de terres arables, sont en compétition avec l'alimentation humaine, ce qui devient de plus en plus critique compte tenu de l'augmentation de la population. Les choix inscrits dans le cahier des charges du Trentingrana (AOP Grana Padano) donne cependant une meilleure image aux consommateurs. De même, la stratégie de labelliser le Parmigiano Reggiano de Race Reggiana est sans doute une action efficace pour renforcer le lien avec la tradition et le territoire et sensibiliser les consommateurs.

2.7.4. Exemples de tensions/antagonismes/synergies entre différentes dimensions de la qualité et acteurs de la chaîne alimentaire

2.7.4.1. Lait biologique versus lait conventionnel

En moyenne, les **caractéristiques commerciales** du lait biologique diffèrent peu de celles du lait conventionnel. Selon les auteurs, des résultats contradictoires sont fréquemment rapportés pour les teneurs en **matières protéiques et grasses** (Schwendel *et al.*, 2015 ; Smigic *et al.*, 2017 ; Srednicka-Tober *et al.*, 2016b). La variabilité de ces teneurs dans le lait est en effet liée aux pratiques mises en oeuvre, notamment caractéristiques génétiques des animaux *et al*imentation. Orjales *et al*. (2019) rapportent que les régimes distribués dans les fermes biologiques contiennent une proportion plus élevée de fourrages grossiers (plus de fibres et moins d'amidon, densité énergétique plus faible), ce qui devrait être associé à une teneur en matières grasses plus élevée et une teneur en matières protéiques plus faible. En pratique, ces effets sont parfois contrebalancés dans les élevages biologiques par l'utilisation plus fréquente de vaches moins productives, dont le lait est plus riche (par exemple race Jersiaise). Concernant la **numération cellulaire** du lait cru, des résultats contradictoires sont également rapportés (Srednicka-Tober *et al.*, 2016b), mais l'incidence des mammites semble légèrement plus faible dans les élevages biologiques. Ceci pourrait être dû en partie au niveau de production plus faible des vaches, par rapport aux élevages conventionnels (Schwendel *et al.*, 2015). Les quelques études qui ont porté sur la **qualité microbiologique** des laits biologiques ou conventionnels ne montrent pas d'effet significatif, avec parfois une tendance en faveur des laits biologiques, qui contiennent globalement moins de flore totale et moins de flore coliforme (Malissiova *et al.*, 2017; Urkek *et al.*, 2017). La nature des microorganismes présents dans le lait cru peut différer ; Malissiova *et al*. (2017) ont par exemple identifié moins de souches de *S. aureus* ou *E. coli* résistantes dans le lait de brebis ou de chèvres dans des fermes biologiques, possiblement en lien avec la moindre utilisation d'antibiotiques dans ces dernières.

Les **caractéristiques organoleptiques** du lait ou des produits laitiers biologiques ou conventionnels diffèrent peu ou niveau de la flaveur ou de la texture (Adler *et al.*, 2013b; Schwendel *et al.*, 2015 ; Smigic *et al.*, 2017), ou des composés volatils (Schwendel *et al.*, 2017). Bloksma *et al*. (2008) ont cependant rapporté une texture plus crémeuse et une flaveur « herbe » et « foin » plus prononcée pour le lait biologique. En revanche, les consommateurs ou des jurys entrainés n'ont pas distingué des yaourts fabriqués avec du lait biologique ou conventionnel (Coggins *et al.*, 2008; Gallina Toschi *et al.*, 2012).

Sur le plan **nutritionnel**, de nombreuses études ont comparé la composition en acides gras de laits biologiques ou conventionnels, échantillonnés dans des laits du commerce issus de grand mélange ou dans des tanks à la ferme. Des résultats contradictoires sont rapportés pour les acides gras saturés, les acide gras monoinsaturés et l'acide linoléique (Schwendel *et al.*, 2015). En moyenne, la concentration de ces acides gras dans les laits biologiques et conventionnels ne diffèrent pas significativement (Palupi *et al.*, 2012; Srednicka-Tober *et al.*, 2016b). En revanche, des études réalisées dans de nombreux pays s'accordent pour conclure que les laits biologiques présentent des teneurs plus élevées en acides gras impairs et ramifiés (Schwendel *et al.*, 2015) et en acides gras polyinsaturés, incluant les acides gras oméga 3 (α-linolénique, EPA, DHA), ainsi que l'acide ruménique et son précurseur (acide vaccénique). En conséquence, le ratio des acides gras oméga 6/oméga 3 est inférieur pour le lait biologique (de 2,4 à 3,6), par rapport au lait conventionnel (de 4,3 à 5,4) (Palupi *et al.*, 2012; Schwendel *et al.*, 2015). De façon générale, tous les auteurs soulignent que les différences ou l'absence de différences observées entre les laits biologiques ou conventionnels sont liées à l'alimentation des animaux. Les teneurs plus élevées en acides gras polyinsaturés des laits biologiques résultent en effet de la proportion plus élevée de fourrages herbagers, riches en légumineuses, et de pâturage, dans les systèmes fourragers des élevages biologiques. La composition des laits et des produits laitiers biologiques (de vaches ou de chèvres) est très voisine de celle des laits issus de systèmes conventionnels herbagers à faibles intrants, alors qu'elle se différencie nettement de celle des laits issus de systèmes conventionnels intensifs utilisant peu de fourages herbagers et beaucoup d'aliments concentrés (Lopez *et al.*, 2019; Pustjens *et al.*, 2017 ; Schwendel *et al.*, 2017). La question des effets de l'intensification des systèmes d'élevage biologiques a été plus rarement abordée. Kusche *et al*. (2015)ont étudié, pendant la période de pâturage, les effets de l'intensification des systèmes d'élevage sur la composition de laits de fermes biologiques ou conventionnelles (remplacement d'une partie du pâturage par des ensilages d'herbe et de maïs, augmentation de la part de concentré et du niveau de production des vaches). Ils rapportent que l'intensification des systèmes d'élevage a les mêmes effets sur la composition du lait en acides gras et vitamines, que ces systèmes soient biologiques ou conventionels ; ils concluent que l'intensification des systèmes d'élevage biologiques peut constituer une menace pour la composition spécifique des produits laitiers biologiques.

Schwendel *et al*. (2015) et Palupi *et al*. (2012) rapportent des résultats contradictoires pour la **vitamine E, la vitamine A et le β-carotène**. Les effets favorables du pâturage, plus fréquent dans les systèmes d'élevage biologiques, sont parfois contrebalancés par des apports plus importants d'aliments concentrés, enrichis envitamines A et E, dans les sytèmes

d'élevage conventionnels. Par ailleurs, des teneurs moins élevées en vitamines B_1 et B_2 dans du lait biologique, par rapport à du lait conventionnel, ont été rapportées par Zagorska et Ciprovica (2008).

La teneur en **minéraux** des laits biologiques ou conventionnels diffère peu, à l'exception des teneurs en iode et en sélénium, qui sont moindres dans les laits biologiques (de l'ordre de -30% et -20%, respectivement), et de la teneur en fer, qui est un peu plus élevée (environ +10 %) (Schwendel *et al.*, 2015 ; Srednicka-Tober *et al.*, 2016b). De même, la teneur des laits biologiques ou conventionnels en **métaux lourds** diffère très peu et leurs concentration sont généralement très faibles (Schwendel *et al.*, 2015; Srednicka-Tober *et al.*, 2016b).

Les produits laitiers biologiques se positionnent au 2ème rang du « top 5 des produits bio » en France (Agence Bio, 2017a), après les fruits et légumes. Les motivations d'achat de produits laitiers biologiques sont principalement leur valeur santé, le respect du bien-être animal et de l'environnementet leur qualité organoleptique (Akaichi *et al.*, 2012 ; Schleenbecker et Hamm, 2013)

Synthèse des effets positifs ou négatifs associés à l'élevage biologique des troupeaux laitiers (versus élevage conventionnel) sur les différentes qualités du lait.

Dimensions de la qualité	Effets positifs	Effets négatifs
Caractéristiques commerciales	Teneurs en matières grasses et matières protéiques, numération cellulaire et flore totale : résultats divergents selon les études.	
	Incidence de mammites un peu moins élevée	
Caractéristiques organoleptiques	Peu de données et globalement pas de différence significative	
Caractéristiques nutritionnelles	Plus d'acides gras polyinsaturés oméga 3	Moins de sélénium
	Ratio oméga 6 / oméga 3 plus faible	Moins d'iode
	Plus d'acide ruménique (CLA) et d'acides gras *trans* précurseurs du CLA	
	Plus de fer	
Caractéristiques technologiques	Pas de données	
Caractéristiques d'image	Image positive du label agriculture biologique (AB)	Prix plus élevé
	Bien-être animal	
	Respect de l'environnement	
	Qualité organoleptique du produit	
	Valeur santé	
	Pas d'utilisation de pesticides	

2.7.4.2. Lait de montagne versus lait de plaine

Les zones de montagne sont définies en Europe comme des territoires caractérisés par un faible potentiel d'utilisation des terres et par un accroissement important des coûts de production agricole. Ces surcoûts sont dus soit à l'altitude et aux conditions climatiques difficiles, à l'origine d'une saison de végétation courte entraînant des stocks fourragers importants, soit à la présence d'un relief limitant les possibilités de mécanisation ou nécessitant l'utilisation d'un matériel onéreux, soit encore à la combinaison de ces deux facteurs. À partir de ces principes généraux, la plupart des définitions nationales se basent sur un critère d'altitude minimale, variable selon la latitude, et également sur un critère relatif à la pente, seul ou en combinaison avec l'altitude. En France métropolitaine, par exemple, la zone de montagne est définie à l'échelle de la commune par la loi montagne de 1985, selon un seuil minimal d'altitude de 700 m ou des pentes supérieures à 20% sur 80% du territoire communal (Martin *et al.*, 2014). En Europe, la mention facultative « Produit de montagne » a été créée en 2012. Sa simplicité d'usage favorise son développement, en complément des autres signes de qualité déjà existants.

De nombreux travaux se sont attachés à mettre en évidence les spécificités du lait et des produits laitiers de montagne, le plus souvent en les comparant aux produits laitiers de plaine. **Les différences entre laits de montagne ou de plaine sont principalement liées aux différences de régime alimentaire des vaches**. En milieu montagnard, compte tenu des contraintes pédoclimatiques, les systèmes fourragers valorisent la ressource naturelle que constituent les prairies. Ces dernières, majoritairement des prairies permanentes plus ou moins diversifiées, sont pâturées pendant la période de végétation (de 3 à 8 mois selon l'altitude) et en partie récoltées, sous forme de foin ou d'ensilage, pour nourrir les troupeaux à l'étable pendant l'hivernage. Contrairement aux zones de plaine, la culture du maïs est quasi inexistante au-dessus de 900 ou 1 000 m d'altitude et peu développée dans les zones de montagne dont l'altitude est comprise entre 700 et 900 m. Les cultures de céréales sont également moins fréquentes en altitude qu'en plaine et les rendements y sont inférieurs. D'autre part, les zones de montagne sont également le berceau de races locales adaptées aux conditions spécifiques du milieu (Martin *et al.*, 2014).

Sur le plan de la **qualité commerciale**, les laits de plaine et de montagne diffèrent peu. Le lait de montagne présente quelquefois des teneurs en matières grasses et protéiques légèrement plus faibles, en raison de l'utilisation quasi-exclusive de fourrages herbagers. La numération cellulaire du lait de montagne peut être un peu plus élevée, notamment lorsqu'il est produit sur des pâturages d'altitude où les vaches doivent se déplacer (Koczura *et al.*, 2019). Ces laits de montagne présentent globalement une moins bonne aptitude à la coagulation (Niero *et al.*, 2018).

Les **fromages** de montagne présentent des **profils sensoriels** plus complexes que ceux produits en plaine ; ils sont caractérisés par un plus grand nombre d'attributs sensoriels (Giaccone *et al.*, 2016; Martin *et al.*, 2005), avec des notes herbacées et animales spécifiques et diversifiées, ainsi qu'un goût et une saveur plus prononcés. La plupart des travaux s'est cependant intéressée aux particularités des fromages d'alpage par rapport aux fromages produits dans les vallées. Les fromages d'alpage se caractérisent aussi par une coloration jaune plus prononcée, une texture plus fondante que les fromages de vallée (Farruggia *et al.*, 2014). Le lait et les fromages de montagne sont également plus riches en composés volatils terpéniques (Agabriel *et al.*, 2007), en lien avec l'abondance, dans les prairies de montagne, de plantes diverses riches en métabolites secondaires.

Sur le plan **nutritionnel**, le lait de montagne présente des concentrations plus élevées en acides gras oméga 3 et en acide ruménique, et plus faibles en acides gras saturés, par rapport au lait de plaine (Collomb *et al.*, 2002 ; Segato *et al.*, 2017). Le lait de montagne contient également plus de vitamines A, E, B_2 et B_9 que le lait de plaine, et moins de vitamine B12 (Segato *et al.*, 2017). Coppa *et al*. (2019) ont clairement montré que les particularités nutritionnelles du lait de montagne sont nettement plus marquées au cours de la saison de pâturage et qu'elles sont dues à la proportion de pâturage dans la ration des vaches et à l'utilisation de prairies diversifiées. Ainsi, c'est le système fourrager spécifique aux zones de montagne qui explique les particularités du lait de montagne, et non le lieu de production en lui-même.

La majorité des consommateurs européens ont une image positive des produits laitiers de montagne, d'autant plus que la présence de zones montagneuses dans leur pays est importante (Martin *et al.*, 2014). Cette image positive repose sur la petite taille des fermes et leur faible niveau d'intensification, ainsi que sur le rôle qu'elles jouent sur la préservation de la biodiversité, l'entretien des paysages, la conservation du patrimoine culturel et les services écosystémiques en général. Les systèmes de production montagnards sont également considérés comme respectueux du bien-être animal et comme étant à l'origine de produits authentiques et sains (Bentivoglio *et al.*, 2019b ; Martins et Ferreira, 2017; Mazzocchi et Sali, 2016 ; Zuliani *et al.*, 2018).

Synthèse des effets positifs ou négatifs associés à l'élevage des troupeaux laitiers en montagne (versus en plaine) sur les différentes qualités du lait.

Dimensions de la qualité	Effets positifs	Effets négatifs
Caractéristiques commerciales		Teneurs en matières grasses et protéiques légèrement plus faibles et numération cellulaire légèrement plus élevée
Caractéristiques organoleptiques	Coloration plus jaune Texture plus fondante (beurre et fromages) Goût, arôme et odeur plus prononcés (plus « animal » et « herbacé »)	

Caractéristiques nutritionnelles	Plus d'acides gras polyinsaturés oméga 3 Ratio oméga 6 / oméga 3 plus faible Plus d'acide ruménique (CLA) et d'acides gras *trans* précurseurs du CLA Moins d'acides gras saturés (surtout acide palmitique) Plus d'antioxydants et de vitamines A, E, B_2 et B_9.	Moins de vitamine B_{12} Qualité nutritionnelle du lait plus variable en lien avec la variabilité de la composition botanique et du stade phénologique des prairies
Caractéristiques technologiques		Moins bonne aptitude à la coagulation
Caractéristiques d'image	Meilleur pour la santé Bien-être animal Petites unités de production Circuits courts Naturalité, tradition Entretien des paysages Préservation de l'environnement (très peu d'intrants) Préservation de la biodiversité	

2.7.5. Conclusion

La filière laitière européenne occupe une place prépondérante parmi les productions animales, puisqu'elle représente en valeur environ un tiers de l'ensemble des produits animaux (selon Eurostats 2019) et affiche un solde commercial largement positif. La filière se caractérise par une grande diversité de systèmes de production, tant en termes de taille des structures que de conduite des animaux. Le niveau d'intensification des fermes est très variable, avec des systèmes herbagers traditionnels rencontrés majoritairement dans les zones de montagne, et des systèmes de production plus intensifs et plus productifs, plutôt situés dans les zones de plaine. En revanche, dans toute l'Europe, le lait cru est très largement collecté par l'industrie laitière pour le transformer en une multitude de produits, fabriqués selon des procédés divers (fermentation, séchage, stérilisation, séparation des constituants…), pour la consommation courante (lait liquide, fromage, beurre, yaourts lait infantile…) ou pour des applications industrielles (poudre de lactosérum par exemple). La production laitière européenne est également remarquable par le nombre de produits sous signes de qualité, qui valorisent la production biologique ou le riche patrimoine culturel associé à la production et à la transformation du lait en produits d'AOP ou d'IGP.

Les différentes caractéristiques des produits laitiers s'élaborent progressivement depuis la production du lait jusqu'au produit fini. Les caractéristiques du lait cru varient selon la conduite des animaux, qui est différente selon le système de production et selon la période de l'année. La diversité des modes de production est à l'origine d'un lait de composition variable, en particulier au niveau de la composition chimique (profil en acides gras, certains minéraux et vitamines, notamment) et microbienne. L'effet des facteurs de variation des différentes dimensions de la qualité et leur importance sont résumés dans les tableaux de synthèse ci-dessous.

La grande panoplie des procédés technologiques mis en œuvre pour transformer le lait a un effet majeur sur les caractéristiques des produits finis. Ces procédés permettent de s'affranchir en grande partie de la variabilité initiale du lait et d'obtenir des produits finis aux caractéristiques standardisées, dont la qualité sanitaire est garantie, et qui reflètent finalement assez peu les modes de production du lait. Les procédés impactent fortement la teneur et la structure de l'ensemble des constituants du lait (micelles de caséine, globules gras…), mais certains d'entre eux conservent leur composition initiale jusqu'au produit fini (composition en acides gras et composés liposolubles, notamment). Lorsque le lait subit peu de traitements technologiques avant sa transformation (fabrication au lait cru et entier par exemple), le mode de production du lait joue un rôle beaucoup plus important sur les caractéristiques finales du produit.

La consommation de lait et de produits laitiers est ancrée dans les habitudes alimentaires européennes. Ces derniers permettent de couvrir une part significative des apports conseillés pour plusieurs types de nutriments (en particulier en matières grasses, minéraux et vitamines). Les produits laitiers bénéficient d'une image positive et d'un capital de confiance élevé auprès des consommateurs, qui les associent à la santé, la fraicheur et la praticité. Les produits porteurs d'un signe de qualité sont de surcroît positivement associés au bien-être animal, au respect de l'environnement et de la biodiversité.

Depuis plusieurs décennies, un effort de recherche important a été réalisé pour comprendre les déterminants, au niveau de la production, des différentes facettes de la qualité du lait, notamment au regard des caractéristiques nutritionnelles. L'alimentation à l'herbe et l'enrichissement des rations avec des lipides insaturés sont les leviers majeurs qui permettent d'orienter la composition en acides gras du lait vers moins d'acides gras saturés et davantage d'acides gras polyinsaturés. Comparativement, les références manquent encore sur les facteurs de variation d'autres constituants du lait (certaines vitamines et minéraux en particulier), ainsi que sur l'impact des procédés technologiques sur la qualité nutritionnelle des produits laitiers et sur la santé des consommateurs. Des zones d'ombre subsistent, notamment sur des impacts de procédés technologiques, tels que les traitements thermiques (garants de l'absence de germes pathogènes mais dont les effets à long terme sur la santé humaine ne sont pas connus), ou l'homogénéisation des matières grasses.

Synthèse des effets des facteurs de variation de la qualité commerciale du lait cru

Facteur	Matières grasses	Matières protéiques	Cellules somatiques	Germes totaux (à 30°C)
Espèce	+++	+++	+++	-
Race	+++	+++	+	-
Individu (génétique)	+++	+++	++	-
Age (parité)	+	+	++	-
Stade physiologique	+++	+++	+++	-
Santé (mammite)	-	+	+++	+
Saison [1]	+	+	+	+
Alimentation	++	++	-	-
Conditions de traite[2]	+	+	++	+++
Robot de traite	-	-	+	++
Stockage à la ferme	-	-	-	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++)
[1] L'effet de la saison s'entend au sens strict : durée du jour et de la température, hors effets de l'alimentation et du stade physiologique
[2] Rythme et environnement de traite

Synthèse des effets des facteurs de variation de la qualité organoleptique du lait cru

Facteur	Aspect (couleur)	Texture [1]	Odeur	Saveurs
Espèce	+++	+++	+++	++
Race	++	+++	?	?
Individu (génétique)	++	+++	?	?
Age (parité)	?	+	?	?
Stade physiologique	-	+++	?	?
Santé (mammite)	+	-	++	++
Saison [2]	-	+	?	?
Alimentation	+++	++	++	++
Conditions de traite [3]	-	-	?	?

Robot de traite	-	-	?	?
Stockage à la ferme	-	-	?	?

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++), incertain (?).
[1] Texture crémeuse qui varie essentiellement en fonction de la teneur du lait en matières grasses
[2] L'effet de la saison s'entend au sens strict : effet de la durée du jour et de la température (hors effets de l'alimentation et du stade physiologique).
[3] Rythme et environnement de traite

Synthèse des effets des facteurs de variation de la qualité nutritionnelle du lait cru

Facteur	Acides aminés	Acides gras	Vitamines liposolubles (A et E)	Vitamines hydrosolubles (B)	Minéraux (Calcium)
Espèce	+++	++	+++	+	++
Race	+	+	+	?	+
Individu (génétique)	++	++	++	?	++
Age (parité)	+	-	+	?	?
Stade physiologique	++	+	+	?	+
Santé (mammite)	++	-	?	?	++
Saison [1]	-	-	?	?	+
Alimentation	-	+++	+++	++	++
Conditions de traite [2]	-	-	-	-	+
Robot de traite	-	-	-	-	-
Stockage à la ferme	-	-	-	-	-

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++), incertain (?).
[1] L'effet de la saison s'entend au sens strict : effet de la durée du jour et de la température,hors effets de l'alimentation et du stade physiologique
[2] Rythme et environnement de traite

Synthèse des effets des facteurs de variation de la qualité technologique du lait cru

Facteur	Rendement fromager	Aptitude à la coagulation	Protéolyse	Lipolyse	Flores indésirables
Espèce	+++	+++	-	+	-
Race	++	++	-	+	-
Individu (génétique)	+++	+++	+	++	-
Age (parité)	+	+	?	?	-
Stade physiologique	+++	+++	++	++	-
Santé (mammite)	++	+++	+++	+++	+
Saison[1]	+	+	-	-	?
Alimentation	++	++	+	+	-
Conditions de traite[2]	-	+	+	+++	+++
Robot de traite	-	+	-	++	++
Stockage à la ferme	+	++	+++	++	+++

Effet nul (-), faible (+), moyen (++), fort (+++), incertain (?).
[1] L'effet de la saison s'entend au sens strict : effet de la durée du jour et de la température, hors effets de l'alimentation et du stade physiologique
[2] Rythme et environnement de traite

Références bibliographiques

Aaslyng, M.D.; Meinert, L., 2017. Meat flavour in pork and beef - From animal to meal. *Meat Science*, 132: 112-117. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.012

Abbeddou, S.; Rischkowsky, B.; Hilali, M.E.; Hess, H.D.; Kreuzer, M., 2011. Influence of feeding Mediterranean food industry by-products and forages to Awassi sheep on physicochemical properties of milk, yoghurt and cheese. *Journal of Dairy Research*, 78 (4): 426-435. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029911000665

Abeni, F.; Degano, L.; Calza, F.; Giangiacomo, R.; Pirlo, G., 2005. Milk quality and automatic milking: Fat globule size, natural creaming, and lipolysis. *Journal of Dairy Science*, 88 (10): 3519-3529. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73037-X

Abeni, F.; Degano, L.; Giangiacomo, R.; Speroni, M.; Pirlo, G., 2003. Robotic milking and milk quality: effects on the cheese-making properties of milk. *Italian Journal of Animal Science*, 2 (4): 301-312. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2003.301

Aberle, E.D.; Forrest, J.C.; Gerrard, D.E.; Mills, E.W., 2012. Conversion of muscle to meat : biochemistry of meat quality development. In: Gerrard, D.E.; Mills, E.W.; Forrest, J.C.; Judge, M.; Merkel, R.A.; Aberle, E.D., eds. *Principles of meat science*. 5 edition ed. Dubuque (USA): Kendall Hunt Publishing.

Abilleira, E.; Virto, M.; Najera, A.I.; Salmeron, J.; Albisu, M.; Perez-Elortondo, F.J.; de Gordoa, J.C.R.; de Renobales, M.; Barron, L.J.R., 2010. Effects of seasonal changes in feeding management under part-time grazing on the evolution of the composition and coagulation properties of raw milk from ewes. *Journal of Dairy Science*, 93 (9): 3902-3909. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2983

Ackman, R.G.; Parazo, M.P.M.; Lall, S.P., 1997. Impact of dietary peroxides and tocopherols on fillet flavor of farmed Atlantic salmon. In: Shahidi, F.; Cadwallader, K.R., eds. *Flavor and Lipid Chemistry of Seafoods*. (ACS Symposium Series), 148-165.

Adams, D.C.; Salois, M.J., 2010. Local versus organic: A turn in consumer preferences and willingness-to-pay. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25 (4): 331-341. http://dx.doi.org/10.1017/s1742170510000219

Addeo, F.; Chianese, L.; Sacchi, R.; Musso, S.S.; Ferranti, P.; Malorni, A., 1994. Characterization of the oligopeptides of parmigiano-reggiano cheese soluble in 120 g trichloroacetic acid/L. *Journal of Dairy Research*, 61 (3): 365-374. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900030788

Addeo, F.; Chianese, L.; Salzano, A.; Sacchi, R.; Cappuccio, U.; Ferranti, P.; Malorni, A., 1992. Characterization of the 12-percent trichloroacetic acid-insoluble oligopeptides of parmigiano-reggiano cheese. *Journal of Dairy Research*, 59 (3): 401-411. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900030673

Addis, M.; Pinna, G.; Molle, G.; Fiori, M.; Spada, S.; Decandia, M.; Scintu, M.F.; Piredda, G.; Pirisi, A., 2006. The inclusion of a daisy plant (Chrysanthemum coronarium) in dairy sheep diet: 2. Effect on the volatile fraction of milk and cheese. *Livestock Science*, 101 (1-3): 68-80. http://dx.doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.09.009

Adler, S.A.; Dahl, A.V.; Jensen, S.K.; Thuen, E.; Gustavsson, A.M.; Steinshamn, H., 2013a. Fatty acid composition, fat-soluble vitamin concentrations and oxidative stability in bovine milk produced on two pastures with different botanical composition. *Livestock Science*, 154 (1-3): 93-102. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2013.03.013

Adler, S.A.; Jensen, S.K.; Govasmark, E.; Steinshamn, H., 2013b. Effect of short-term versus long-term grassland management and seasonal variation in organic and conventional dairy farming on the composition of bulk tank milk. *Journal of Dairy Science*, 96 (9): 5793-5810. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5765

Adrian, C.; Ballard, V.; Loriot, A.; Maignan, S., 2011. Impact du temps de préfanage sur la composition chimique de la luzerne déshydratée. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, p. 210. http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/Texte19_qualite_produit_Adrian.pdf

AFNOR, 1996. Norme française NF V46-001 - Viandes de gros bovins : conditions de valorisation du potentiel de tendreté.

Afssa, 2007. *Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à une demande d'avis sur la liste des dangers pris en compte dans le projet de guide de bonnes pratiques d'hygiène et d'application des principes HACCP "abattage des volailles"*. Paris: Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Saisine n°2007-SA-0006).

Afssa, 2008a. *Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif aux critères microbiologiques exigibles pour le lait cru de bovin livré en l'état et destiné à la consommation humaine*. Paris: Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Saisine n°2007-SA-0149), 10 p.

Afssa, 2008b. *Contamination microbienne des préparations lactées en poudres destinées aux nourrissons et personnes âgées*. Paris: Agence française de sécurité sanitaire des aliments, 106 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/MIC-Ra-PoudresLait.pdf

Afssa, 2010. *Avis relatif aux conséquences sur les flores microbiennes d'une réduction en taux de sel dans les aliments*. Paris: Afsa, (Saisine n°2008-SA_0173), 8 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/MIC2008sa0173.pdf

Agabriel, C.; Cornu, A.; Journal, C.; Sibra, C.; Grolier, P.; Martin, B., 2007. Tanker milk variability according to farm feeding practices: Vitamins A and E, carotenoids, color, and terpenoids. *Journal of Dairy Science*, 90 (10): 4884-4896. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0171

Agabriel, C.; Martin, B.; Sibra, C.; Bonnefoy, J.C.; Montel, M.C.; Didienne, R.; Hulin, S., 2004. Effect of dairy production systems on the sensory characteristics of Cantal cheeses: a plant-scale study. *Animal Research*, 53 (3): 221-234. http://dx.doi.org/10.1051/animres:2004013

Agence Bio, 2017a. *La Bio change d'échelle en préservant ses fondamentaux ! Dossier de presse*, 50 p. http://www.agencebio.org/sites/default/files/upload/documents/5_Communication/Relations_Presse/dp_bio_barometre_val.pdf

Agence Bio, 2017b. *Le marché alimentaire bio en 2016 : estimation de la consommation des ménages en produits alimentaires biologiques en 2016*, p. 48.

Agren, E.C.C.; Frossling, J.; Wahlstrom, H.; Emanuelson, U.; Lewerin, S.S., 2017. A questionnaire study of associations between potential risk factors and salmonella status in Swedish dairy herds. *Preventive Veterinary Medicine*, 143: 21-29. http://dx.doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.05.004

Agreste, 2018a. En 2017, poursuite du repli de la consommation de viande à domicile par les ménages français et stabilité de la consommation de viande calculée par bilan. *Agreste Synthèses - Consommation*, Avril 2018 (n°2018/322): 10 p.

Agreste, 2018b. Les signes officiels de qualité. *GraphAgri 2018*. Paris: Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, p. 113. http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Graf1839_-_Signes_de_qualite.pdf.

Ahn, D.U.; Ajuyah, A.; Wolfe, F.H.; Sim, J.S., 1993. Oxygen availability affects prooxidant catalyzed lipid oxidation of cooked turkey patties. *Journal of Food Science*, 58 (2): 278-+. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04255.x

Akaichi, F.; Nayga, R.M., Jr.; Gil, J.M., 2012. Assessing Consumers' Willingness to Pay for Different Units of Organic Milk: Evidence from Multiunit Auctions. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 60 (4): 469-494. http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7976.2012.01254.x

Akkerman, R.; Faas, M.M.; de Vos, P., 2019. Non-digestible carbohydrates in infant formula as substitution for human milk oligosaccharide functions: Effects on microbiota and gut maturation. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59 (9): 1486-1497. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2017.1414030

Aksnes, A.; Gjerde, B.; Roald, S.O., 1986. Biological, chemical and organoleptic changes during maturation of farmed Atlantic salmon, Salmo salar. *Aquaculture*, 53 (1): 7-20. http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(86)90295-4

Al-Tobasei, R.; Ali, A.; Leeds, T.D.; Liu, S.X.; Palti, Y.; Kenney, B.; Salem, M., 2017. Identification of SNPs associated with muscle yield and quality traits using allelic-imbalance analyses of pooled RNA-Seq samples in rainbow trout. *Bmc Genomics*, 18: 15. http://dx.doi.org/10.1186/s12864-017-3992-z

Alaei, F.; Hojjatoleslamy, M.; Dehkordi, S.M.H., 2018. The effect of inulin as a fat substitute on the physicochemical and sensory properties of chicken sausages. *Food Science & Nutrition*, 6 (2): 512-519. http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.585

Alali, W.Q.; Thakur, S.; Berghaus, R.D.; Martin, M.P.; Gebreyes, W.A., 2010. Prevalence and Distribution of Salmonella in Organic and Conventional Broiler Poultry Farms. *Foodborne Pathogens and Disease*, 7 (11): 1363-1371. http://dx.doi.org/10.1089/fpd.2010.0566

Alamprese, C.; Casiraghi, E.; Rossi, M., 2011. Effects of housing system and age of laying hens on egg performance in fresh pasta production: pasta cooking behaviour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91 (5): 910-914. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.4264

Alamprese, C.; Casiraghi, E.; Rossi, M., 2012a. Foaming, gelling and rheological properties of egg albumen as affected by the housing system and the age of laying hens. *International Journal of Food Science and Technology*, 47 (7): 1411-1420. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02988.x

Alamprese, C.; Casiraghi, E.; Rossi, M., 2012b. Mechanical and rheological properties of fresh egg pasta as affected by shell egg production factors. *International Journal of Food Science and Technology*, 47 (12): 2503-2509. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03128.x

Albuquerque, T.G.; Oliveira, M.; Sanches-Silva, A.; Bento, A.C.; Costa, H.S., 2016. The impact of cooking methods on the nutritional quality and safety of chicken breaded nuggets. *Food & Function*, 7 (6): 2736-2746. http://dx.doi.org/10.1039/c6fo00353b

Alexi, N.; Byrne, D.V.; Nanou, E.; Grigorakis, K., 2018. Investigation of sensory profiles and hedonic drivers of emerging aquaculture fish species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98 (3): 1179-1187. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.8571

Ali, A.E.; Andrews, A.T.; Cheeseman, G.C., 1980. Influence of storage of milk on casein distribution between the micellar and soluble phases and its relationship to cheese-making parameters. *Journal of Dairy Research*, 47 (3): 371-382. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900021269

Ali, M.S.; Kang, G.H.; Yang, H.S.; Jeong, J.Y.; Hwang, Y.H.; Park, G.B.; Joo, S.T., 2007. A comparison of meat characteristics between duck and chicken breast. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 20 (6): 1002-1006. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.2007.1002

Ali, M.S.; Yang, H.S.; Jeong, J.Y.; Moon, S.H.; Hwang, Y.H.; Park, G.B.; Joo, S.T., 2008. Effect of chilling temperature of carcass on breast meat quality of duck. *Poultry Science*, 87 (9): 1860-1867. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2007-00194

Almena-Aliste, M.; Mietton, B., 2014. Cheese Classification, Characterization, and Categorization: A Global Perspective. *Microbiol Spectrum*, 2 (1): Cm-0003-2012. http://dx.doi.org/10.1128/microbiolspec.CM-0003-2012

Alnahhas, N.; Berri, C.; Boulay, M.; Baeza, E.; Jego, Y.; Baumard, Y.; Chabault, M.; Le Bihan-Duval, E., 2014. Selecting broiler chickens for ultimate pH of breast muscle: Analysis of divergent selection experiment and phenotypic consequences on meat quality, growth, and body composition traits. *Journal of Animal Science*, 92 (9): 3816-3824. http://dx.doi.org/10.2527/jas2014-7597

Alnahhas, N.; Le Bihan-Duval, E.; Baeza, E.; Chabault, M.; Chartrin, P.; Bordeau, T.; Cailleau-Audouin, E.; Meteau, K.; Berri, C., 2015. Impact of divergent selection for ultimate pH of pectoralis major muscle on biochemical, histological, and sensorial attributes of broiler meat. *Journal of Animal Science*, 93 (9): 4524-4531. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2015-9100

Aluwe, M.; Aaslyng, M.; Backus, G.; Bonneau, M.; Chevillon, P.; Haugen, J.E.; Meier-Dinkel, L.; Morlein, D.; Oliver, M.A.; Snoek, H.M.; Tuyttens, F.A.M.; Font-i-Furnols, M., 2018. Consumer acceptance of minced meat patties from boars in four European countries. *Meat Science*, 137: 235-243. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.11.034

Alvarado-Gilis, C.A.; Aperce, C.C.; Miller, K.A.; Van Bibber-Krueger, C.L.; Klamfoth, D.; Drouillard, J.S., 2015. Effects of flaxseed encapsulation on biohydrogenation of polyunsaturated fatty acids by ruminal microorganisms: feedlot performance, carcass quality, and tissue fatty acid composition. *Journal of Animal Science*, 93 (9): 4368-4376. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2015-9171

Alvarez-Rodriguez, J.; Villalba, D.; Cubilo, D.; Babot, D.; Tor, M., 2016. Organic practices and gender are effective strategies to provide healthy pork loin. *Journal of Integrative Agriculture*, 15 (3): 608-617. http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(15)61172-8

Amalfitano, N.; Cipolat-Gotet, C.; Cecchinato, A.; Malacarne, M.; Summer, A.; Bittante, G., 2019. Milk protein fractions strongly affect the patterns of coagulation, curd firming, and syneresis. *Journal of Dairy Science*, 102 (4): 2903-2917. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2018-15524

Amigo, L.; Recio, I.; Ramos, M., 2000. Genetic polymorphism of ovine milk proteins: its influence on technological properties of milk - a review. *International Dairy Journal*, 10 (3): 135-149. http://dx.doi.org/10.1016/s0958-6946(00)00034-0

Anderson, F.; Williams, A.; Pannier, L.; Pethick, D.W.; Gardner, G.E., 2015. Sire carcass breeding values affect body composition in lambs-1. Effects on lean weight and its distribution within the carcass as measured by computed tomography. *Meat Science*, 108: 145-154. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.06.002

Anderson, F.; Williams, A.; Pannier, L.; Pethick, D.W.; Gardner, G.E., 2016. Sire carcass breeding values affect body composition in lambs-2. Effects on fat and bone weight and their distribution within the carcass as measured by computed tomography. *Meat Science*, 116: 243-252. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.02.013

Andreoletti, O.; Baggesen, D.L.; Bolton, D.; Butaye, P.; Cook, P.; Davies, R.; Escamez, P.S.F.; Griffin, J.; Hald, T.; Havellar, A.; Koutsoumanis, K.; Lindqvist, R.; McLauchlin, J.; Nesbakken, T.; Maradona, M.P.; Ricci, A.; Ru, G.; Sanaa, M.; Simmons, M.; Sofos, J.; Threlfall, J.; Efsa Panel Biological Hazards, B., 2015. Scientific Opinion on the public health risks related to the consumption of raw drinking milk. *Efsa Journal*, 13 (1). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3940

Andres, A.I.; Cava, R.; Martin, D.; Ventanas, J.; Ruiz, J., 2005. Lipolysis in dry-cured ham: Influence of salt content and processing conditions. *Food Chemistry*, 90 (4): 523-533. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.013

Andres, A.I.; Cava, R.; Ventanas, J.; Thovar, V.; Ruiz, J., 2004. Sensory characteristics of Iberian ham: Influence of salt content and processing conditions. *Meat Science*, 68 (1): 45-51. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.08.019

Andres, A.I.; Ruiz, J.; Mayoral, A.I.; Tejeda, J.F.; Cava, R., 2000. Influence of rearing conditions and crossbreeding on muscle color in Iberian pigs. *Food Science and Technology International*, 6 (4): 315-321. http://dx.doi.org/10.1177/108201320000600406

Andrieux, G., 2004. *La filière française des coproduits de la pêche et de l'aquaculture : état des lieux et analyse*: Etude de l'OFIMER,, 59 p.

Angood, K.M.; Wood, J.D.; Nute, G.R.; Whittington, F.M.; Hughes, S.I.; Sheard, P.R., 2008. A comparison of organic and conventionally-produced lamb purchased from three major UK supermarkets: Price, eating quality and fatty acid composition. *Meat Science*, 78 (3): 176-184. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.002

Anses, 2011a. *Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. Rapport d'expertise collective*. Paris: Anses, (Saisine n°2006-SA-0359), 323 p.

Anses, 2011b. *Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) Tome 1 : Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes Tome 2 : Résidus de pesticides, additifs, acrylamide, hydrocarbures aromatiques polycycliques. Rapport d'expertise*. Paris: Anses, 305 p. - 362 p. https://www.anses.fr/fr/documents/PASER2006sa0361Ra1.pdf ; https://www.anses.fr/fr/documents/PASER2006sa0361Ra2.pdf

Anses, 2013. *Avis de l'Anses relatif à la demande de réévaluation des produits de la mer à risque pour les femmes enceintes dans le guide PNNS « Le guide nutrition pendant et après la grossesse »*, 11 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2012sa0102.pdf

Anses, 2015a. *Avis relatif à un projet de décret pris en application de l'article L. 214-1 du code de la consommation et concernant l'étiquetage du lait cru destiné à être remis en l'état au consommateur final* Paris: Anses (Avis de l'Anses - Saisine n°2015-SA-0114)), 19 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0114.pdf

Anses, 2015b. *Information des consommateurs en matière de prévention des risques biologiques liés aux aliments. Tome 2 : Évaluation de l'efficacité des stratégies de communication*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 170 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2012sa0118Ra-02.pdf

Anses, 2017a. *Avis de l'Anses relatif à la détection d'E. coli producteurs de shigatoxines (STEC) considérés comme hautement pathogènes en filière viande hachée bovine*. Paris: Anses, (Saisine 2012-SA-0118), 54 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0121.pdf

Anses, 2017b. *Avis de l'Anses relatif à la contamination de produits de charcuterie crue par Trichinella spp*. Paris: Anses (Saisine n°2016-SA-0040), 34 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0040.pdf

Anses, 2017c. *Avis et rapport de l'Anses relatif à l'attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 1 : Revue des méthodes et inventaire des données*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 189 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra.pdf

Anses, 2017d. *Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective*. Paris: Anses, 566 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

Anses, 2017e. *Suivi des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques en France en 2016. Rapport annuel*. Paris: ANSES, 108 p.

Anses, 2018a. *Attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 2 : Analyse des données épidémiologiques*. Paris: Anses, (Saisine n°2015-SA-0162), 112 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra-2.pdf

Anses, 2018b. *Contamination des poulets de chair par Campylobacter*. Paris: Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Saisine n°2016-SA-0183), 81 p.

Anses, 2018c. *Mesures de maîtrise des salmonelles en filière porcine : état des connaissances et appréciation quantitative des risques - Avis de l'Anses - Rapport d'expertise scientifique*. Paris: Anses (Saisine n°2016-SA-0037), 154 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2016SA0037Ra.pdf

Anses, 2018d. *Suivi des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques en France en 2017. Rapport annuel*. Paris: ANSES, 98 p.

Anses, 2019. *Suivi des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques en France en 2018. Rapport annuel*. Paris: ANSES, 108 p.

Anton, M.; Gandemer, G., 1997. Composition, solubility and emulsifying properties of granules and plasma of egg yolk. *Journal of Food Science*, 62 (3): 484-487. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb04411.x

Antunes, P.; Mourao, J.; Campos, J.; Peixe, L., 2016. Salmonellosis: the role of poultry meat. *Clinical Microbiology and Infection*, 22 (2): 110-121. http://dx.doi.org/10.1016/j.cmi.2015.12.004

Arguelo, N.N.; Garcia, E.R.M.; de Lara, J.A.F.; Ferraz, A.L.I., 2016. Physicochemical Characteristics and Lipid Oxidation of Chicken Inner Fillets Subjected to Different Thermal Processing Types. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 18 (3): 443-449. http://dx.doi.org/10.1590/1806-9061-2015-0150

Arnau, J.; Picouet, P., 2007. Technologie de production du jambon sec en Espagne. *39. Journées de la Recherche Porcine*. Paris, 6-8 février 2007, 331-336. http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2007/espagne/eps05.pdf

Arrizabalaga, J.J.; Jalon, M.; Espada, M.; Canas, M.; Latorre, P.M., 2015. Iodine concentration in ultra-high temperature pasteurized cow's milk. Applications in clinical practice and in community nutrition. *Medicina Clinica*, 145 (2): 55-61. http://dx.doi.org/10.1016/j.medcli.2014.04.027

Arsenos, G.; Banos, G.; Fortomaris, P.; Katsaounis, N.; Stamataris, C.; Tsaras, L.; Zygoyiannis, D., 2002. Eating quality of lamb meat: effects of breed, sex, degree of maturity and nutritional management. *Meat Science*, 60 (4): 379-387. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00147-4

Arshad, M.S.; Imran, A.; Nadeem, M.T.; Sohaib, M.; Saeed, F.; Anjum, F.M.; Kwon, J.H.; Hussain, S., 2017. Enhancing the quality and lipid stability of chicken nuggets using natural antioxidants. *Lipids in Health and Disease*, 16: 9. http://dx.doi.org/10.1186/s12944-017-0496-4

Arshad, M.S.; Sohaib, M.; Ahmad, R.S.; Nadeem, M.T.; Imran, A.; Arshad, M.U.; Kwon, J.H.; Amjad, Z., 2018. Ruminant meat flavor influenced by different factors with special reference to fatty acids. *Lipids in Health and Disease*, 17. http://dx.doi.org/10.1186/s12944-018-0860-z

Asmaa, A.A.; Tajul, A.Y., 2017. Influence of superheated steam and deep frying cooking on the proximate, fatty acids, and amino acids composition of chicken sausage. *International Food Research Journal*, 24 (3): 1308-1313.

Atti, N.; Ben Salem, H., 2008. Compensatory growth and carcass composition of Barbarine lambs receiving different levels of feeding with partial replacement of the concentrate with feed blocks. *Animal Feed Science and Technology*, 147 (1-3): 265-277. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.022

Aubin, J., 2014. Empreinte environnementale de la viande et des produits carnés. *Viandes & Produits carnés*, 30 (6-2): 1-7.

Auffret, M.; Yergeau, E.; Pilote, A.; Proulx, E.; Proulx, D.; Greer, C.W.; Vandenberg, G.; Villemur, R., 2013. Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavours in recirculating aquaculture systems. *Fems Microbiology Ecology*, 84 (2): 235-247. http://dx.doi.org/10.1111/1574-6941.12053

Augustin, J.C.; Minvielle, B., 2008. Design of control charts to monitor the microbiological contamination of pork meat cuts. *Food Control*, 19 (1): 82-97. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2007.02.007

Auldist, M.J.; Coats, S.; Sutherland, B.J.; Mayes, J.J.; McDowell, G.H., 1996. Effects of somatic cell count and stage of lactation on raw milk composition and the yield and quality of Cheddar cheese. *Journal of Dairy Research*, 63 (2): 269-280. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900031769

Aurousseau, B.; Bauchart, D.; Calichon, E.; Micol, D.; Priolo, A., 2004. Effect of grass or concentrate feeding systems and rate of growth on triglyceride and phospholipid and their fatty acids in the M-longissimus thoracis of lambs. *Meat Science*, 66 (3): 531-541. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00156-6

Aurousseau, B.; Bauchart, D.; Faure, X.; Galot, A.L.; Prache, S.; Micol, D.; Priolo, A., 2007a. Indoor fattening of lambs raised on pasture: (1) Influence of stall finishing duration on lipid classes and fatty acids in the longissimus thoracis muscle. *Meat Science*, 76 (2): 241-252. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.11.005

Aurousseau, B.; Bauchart, D.; Galot, A.L.; Prache, S.; Micol, D.; Priolo, A., 2007b. Indoor fattening of lambs raised on pasture: 2. Influence of stall finishing duration on triglyceride and phospholipid fatty acids in the longissimus thoracis muscle. *Meat Science*, 76 (3): 417-427. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.12.001

Aussanasuwannakul, A.; Kenney, P.B.; Weber, G.M.; Yao, J.B.; Slider, S.D.; Manor, M.L.; Salem, M., 2011. Effect of sexual maturation on growth, fillet composition, and texture of female rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) on a high nutritional plane. *Aquaculture*, 317 (1-4): 79-88. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.04.015

Aykin, E.; Arslan, S.; Durak, A.N.; Erbas, M., 2016. Effect of Bicarbonate Salts and Sequential Using of Frying Oil on Acrylamide and 5-Hydroxymethylfurfural Contents in Coated Fried Chicken Meat. *International Journal of Food Properties*, 19 (1): 222-232. http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2015.1023397

Babaheydari, S.B.; Keyvanshokooh, S.; Dorafshan, S.; Johari, S.A., 2016. Proteomic analysis of skeletal deformity in diploid and triploid rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology D-Genomics & Proteomics*, 19: 1-7. http://dx.doi.org/10.1016/j.cbd.2016.05.001

Baeza, E., 2000. Carcasses et viandes de canard : des facteurs de variation de mieux en mieux connus. *Viandes et Produits Carnés*, 21 (5): 159-167.

Baeza, E.; Arnould, C.; Jlali, M.; Chartrin, P.; Gigaud, V.; Mercerand, F.; Durand, C.; Meteau, K.; Le Bihan-Duval, E.; Berri, C., 2012. Influence of increasing slaughter age of chickens on meat quality, welfare, and technical and economic results. *Journal of Animal Science*, 90 (6): 2003-2013. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2011-4192

Baeza, E.; Bourin, M.; Allain, V.; Roul, H.; Prigent, J.P.; Le Bouquin, S.; Magras, C., 2015a. Etat des lieux sur les défauts de la qualité des carcasses et de la viande de poulets. *11. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. Tours. ITAVI - Institut Technique de l'Aviculture, 1095-1103.

Baeza, E.; Bourin, M.C.; Berri, C., 2018. Etat des lieux sur les défauts de qualité de la viande de poulets. *Viandes et Produits Carnés*, 34: 1-12.

Baeza, E.; Chartrin, P.; Gigaud, V.; Tauty, S.; Meteau, K.; Lessire, M.; Berri, C., 2013a. Effects of dietary enrichment with n3 fatty acids on the quality of raw and processed breast meat of high and low growth rate chickens. *British Poultry Science*, 54 (2): 190-198. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2013.775695

Baeza, E.; Chartrin, P.; Lessire, M.; Meteau, K.; Chesneau, G.; Guillevic, M.; Mourot, J., 2015b. Is it possible to increase n-3 fatty acid content of meat without affecting its technological and/or sensory quality and the growing performance of chickens? *British Poultry Science*, 56 (5): 543-550. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2015.1068428

Baeza, E.; Chartrin, P.; Meteau, K.; Bordeau, T.; Juin, H.; Le Bihan-Duval, E.; Lessire, M.; Berri, C., 2010. Effect of sex and genotype on carcase composition and nutritional characteristics of chicken meat. *British Poultry Science*, 51 (3): 344-353. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2010.503472

Baeza, E.; Dessay, C.; Wacrenier, N.; Marche, G.; Listrat, A., 2002. Effect of selection for improved body weight and composition on muscle and meat characteristics in Muscovy duck. *British Poultry Science*, 43 (4): 560-568. http://dx.doi.org/10.1080/0007166022000004471

Baeza, E.; Fernandez, X.; Marie-Etancelin, C., 2013b. Carcass and meat quality of overfed waterfowl. *Inra Productions Animales*, 26 (5): 425-433.

Baeza, E.; Guy, G.; Salichon, M.R.; Juin, H.; Rousselot-Pailley, D.; Klosowska, D.; Elminowska-Wenda, G.; Srutek, M.; Rosinski, A., 1998a. Influence of feeding systems, extensive vs intensive, on fatty liver and meat production in geese. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 62 (4): 169-175.

Baeza, E.; Salichon, M.R.; Marche, G.; Juin, H., 1998b. Effect of sex on growth, technological and organoleptic characteristics of the Muscovy duck breast muscle. *British Poultry Science*, 39 (3): 398-403. http://dx.doi.org/10.1080/00071669888953

Baeza, E.; Salichon, M.R.; Marche, G.; Wacrenier, N.; Dominguez, B.; Culioli, J., 2000. Effects of age and sex on the structural, chemical and technological characteristics of male duck meat. *British Poultry Science*, 41 (3): 300-307. http://dx.doi.org/10.1080/713654934

Bahuaud, D.; Gaarder, M.; Veiseth-Kent, E.; Thomassen, M., 2010. Fillet texture and protease activities in different families of farmed Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture*, 310 (1-2): 213-220. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2010.10.008

Bai, S.C.; Gatlin, D.M., 1993. Dietary vitamin-E concentration and duration of feeding affect tissue alpha-tocopherol concentrations of channel catfish (Ictalurus-punctatus). *Aquaculture*, 113 (1-2): 129-135. http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(93)90346-z

Balia, F.; Pazzola, M.; Dettori, M.L.; Mura, M.C.; Luridiana, S.; Carcangiu, V.; Piras, G.; Vacca, G.M., 2013. Effect of CSN1S1 gene polymorphism and stage of lactation on milk yield and composition of extensively reared goats. *Journal of Dairy Research*, 80 (2): 129-137. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029912000702

Baltic, M.Z.; Starcevic, M.D.; Basic, M.; Zenunovic, A.; Ivanovic, J.; Markovic, R.; Janjic, J.; Mahmutovic, H., 2015. Effects of selenium yeast level in diet on carcass and meat quality, tissue selenium distribution and glutathione peroxidase activity in ducks. *Animal Feed Science and Technology*, 210: 225-233. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.10.009

Banon, S.; Gil, M.D.; Garrido, M.D., 2003. The effects of castration on the eating quality of dry-cured ham. *Meat Science*, 65 (3): 1031-1037. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00321-2

Bao, M.; Pierce, G.J.; Pascual, S.; Gonzalez-Munoz, M.; Mattiucci, S.; Mladineo, I.; Cipriani, P.; Buselic, I.; Strachan, N.J.C., 2017. Assessing the risk of an emerging zoonosis of worldwide concern: anisakiasis. *Scientific Reports*, 7. http://dx.doi.org/10.1038/srep43699

Baraton, Y.; Mage, C., 1985. *La Contamination du lait par les spores butyriques*. Institut technique de l'élevage bovin.

Barbano, D.M.; Ma, Y.; Santos, M.V., 2006. Influence of raw milk quality on fluid milk shelf life. *Journal of Dairy Science*, 89: E15-E19. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72360-8

Barbut, S., 2015. *Principles of meat processing. In: The science of poultry and meat processing*. Guelph, Canada: University of Guelph, 89 p.

Barillet, F., 2007. Genetic improvement for dairy production in sheep and goats. *Small Ruminant Research*, 70 (1): 60-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2007.01.004

Baron, F.; Nau, F.; Guerin-Dubiard, C.; Gonnet, F.; Dubois, J.J.; Gautier, M., 2003. Effect of dry heating on the microbiological quality, functional properties, and natural bacteriostatic ability of egg white after reconstitution. *Journal of Food Protection*, 66 (5): 825-832. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-66.5.825

Barton Gade, P., 2008. Effect of rearing system and mixing at loading on transport and lairage behaviour and meat quality: comparison of outdoor and conventionally raised pigs. *Animal*, 2 (6): 902-911. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731108002000

Bartoszewiez, M.; Hansen, B.M.; Swiecicka, I., 2008. The members of the Bacillus cereus group are commonly present contaminants of fresh and heat-treated milk. *Food Microbiology*, 25 (4): 588-596. http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2008.02.001

Bartov, I.; Sklan, D.; Friedman, A., 1997. Effect of vitamin A on the oxidative stability of broiler meat during storage: lack of interactions with vitamin E. *British Poultry Science*, 38 (3): 255-257. http://dx.doi.org/10.1080/00071669708417982

Bas, P.; Berthelot, V.; Pottier, E.; Normand, J., 2007. Effect of level of linseed on fatty acid composition of muscles and adipose tissues of lambs with emphasis on trans fatty acids. *Meat Science*, 77 (4): 678-688. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.022

Basset-Mens, C.; van der Werf, H.M.G., 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 105 (1-2): 127-144. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2004.05.007

Bastian, E.D.; Brown, R.J.; Ernstrom, C.A., 1991. Plasmin Activity and Milk Coagulation. *Journal of Dairy Science*, 74 (11): 3677-3685. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78557-3

Bastide, N.M.; Naud, N.; Nassy, G.; Vendeuvre, J.L.; Tache, S.; Gueraud, F.; Hobbs, D.A.; Kuhnle, G.G.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2017. Red Wine and Pomegranate Extracts Suppress Cured Meat Promotion of Colonic Mucin-Depleted Foci in Carcinogen-Induced Rats. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 69 (2): 289-298. http://dx.doi.org/10.1080/01635581.2017.1263745

Batorek, N.; Candek-Potokar, M.; Bonneau, M.; Van Milgen, J., 2012. Meta-analysis of the effect of immunocastration on production performance, reproductive organs and boar taint compounds in pigs. *Animal*, 6 (8): 1330-1338. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731112000146

Bauchart, D.; Chantelot, F.; Gandemer, G., 2008. Qualités nutritionnelles de la viande et des abats chez le bovin : données récentes sur les principaux constituants d'intérêt nutritionnel. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 43: 29-39.

Bauchart, D.; Oueslati, K.; Ballet, J.; Prache, S., 2012. Un mode de conduite biologique et un niveau d'herbe élevé améliorent la qualité nutritionnelle des acides gras de la viande chez l'agneau engraissé au pâturage. *14. Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes (JSMTV).* Caen.

Baudry, J.; Pointereau, P.; Seconda, L.; Vidal, R.; Taupier-Letage, B.; Langevin, B.; Alles, B.; Galan, P.; Hercberg, S.; Amiot, M.J.; Boizot-Szantai, C.; Hamza, O.; Cravedi, J.P.; Debrauwer, L.; Soler, L.G.; Lairon, D.; Kesse-Guyot, E., 2019. Improvement of diet sustainability with increased level of organic food in the diet: findings from the BioNutriNet cohort. *American Journal of Clinical Nutrition*, 109 (4): 1173-1188. http://dx.doi.org/10.1093/ajcn/nqy361

Beaudet, V.; Gervais, R.; Graulet, B.; Noziere, P.; Doreau, M.; Fanchone, A.; Castagnino, D.D.S.; Girard, C.L., 2016. Effects of dietary nitrogen levels and carbohydrate sources on apparent ruminal synthesis of some B vitamins in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99 (4): 2730-2739. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10521

Beckers, Y.; Piron, F., 2009. Utilisation des enzymes exogènes en alimentation porcine et avicole. *9. Journée des Productions Porcines et Avicoles*. Gembloux, Belgique, 45-53. https://www.researchgate.net/profile/Yves_Beckers/publication/266407671_Utilisation_des_enzymes_exogenes_en_alimentation_porcine_et_avicole/links/55436fff0cf23ff71684316b.pdf

Bee, G.; Guex, G.; Herzog, W., 2004. Free-range rearing of pigs during the winter: Adaptations in muscle fiber characteristics and effects on adipose tissue composition and meat quality traits. *Journal of Animal Science*, 82 (4): 1206-1218.

Belaud, M., 2008. Première transformation des viandes bovines : abattage-découpe. *Techniques de l'ingénieur*, F 6 700: 1-11.

Bell, J.G.; Tocher, D.R.; Henderson, R.J.; Dick, J.R.; Crampton, V.O., 2003. Altered fatty acid compositions in Atlantic salmon (Salmo salar) fed diets containing linseed and rapeseed oils can be partially restored by a subsequent fish oil finishing diet. *Journal of Nutrition*, 133 (9): 2793-2801.

Belles, M.; Alonso, V.; Roncales, P.; Beltran, J.A., 2019. Sulfite-free lamb burger meat: antimicrobial and antioxidant properties of green tea and carvacrol. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (1): 464-472. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.9208

Bellet, V.; Carlier, M.; Chotteau, P.; Milet, G.; Morin, E.; Rubin, B.; You, G., 2018. *Economie de l'Elevage-Dossier Annuel ovins-Année 2017-Perspectives 2018.* Lens: Marguet M., Dossier Annuel Ovins-Institut de l'Elevage.

Bellinge, R.H.S.; Liberles, D.A.; Iaschi, S.P.A.; O'Brien, P.A.; Tay, G.K., 2005. Myostatin and its implications on animal breeding: a review. *Animal Genetics*, 36 (1): 1-6. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2052.2004.01229.x

Benchaar, C.; Chouinard, P.Y., 2009. Assessment of the potential of cinnamaldehyde, condensed tannins, and saponins to modify milk fatty acid composition of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 92 (7): 3392-3396. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2111

Bencze-Rora, A.M.; Morkore, T.; Einen, O., 2001. Primary processing (evisceration and filleting). In: Kestin, S.C.; Warriss, P.D., eds. *Farmed Fish Quality*. Oxford: Blackwell Science, 249-260.

Benoit, M.; Meda, B., 2017. Challenges and assets of official signs of quality in livestock production to meet societal expectations: the example of organic lamb and Label Rouge chicken productions. *Inra Productions Animales*, 30 (4): 381-394. https://productions-animales.org/article/view/2267/4861

Bentivoglio, D.; Bucci, G.; Finco, A., 2019a. Farmers' general image and attitudes to traditional mountain food labelled : a swot analysis. *Quality-Access to Success*, 20: 48-55.

Bentivoglio, D.; Savini, S.; Finco, A.; Bucci, G.; Boselli, E., 2019b. Quality and origin of mountain food products: the new European label as a strategy for sustainable development. *Journal of Mountain Science*, 16 (2): 428–440. http://dx.doi.org/10.1007/s11629-018-4962-x

Berardinelli, A.; Le Floch-Fouere, C.; Beaufils, S.; Renault, A.; Talansier, E.; David-Briand, E.; Anton, M.; Nau, F.; Lechevalier, V., 2006. Interfacial properties of egg white powders before and after dry pasteurisation. *EPC 2006-12th European Poultry Conference, Verona, Italy, 10-14 September, 2006*. World's Poultry Science Association (WPSA).

Bergamaschi, M.; Aprea, E.; Betta, E.; Biasioli, F.; Cipolat-Gotet, C.; Cecchinato, A.; Bittante, G.; Gasperi, F., 2015. Effects of dairy system, herd within dairy system, and individual cow characteristics on the volatile organic compound profile of ripened model cheeses. *Journal of Dairy Science*, 98 (4): 2183-2196. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8807

Bergamaschi, M.; Cecchinato, A.; Biasioli, F.; Gasperi, F.; Martin, B.; Bittante, G., 2016. From cow to cheese: genetic parameters of the flavour fingerprint of cheese investigated by direct-injection mass spectrometry (PTR-ToF-MS). *Genetics Selection Evolution*, 48. http://dx.doi.org/10.1186/s12711-016-0263-4

Berger, J.; Kim, Y.H.B.; Legako, J.F.; Martini, S.; Lee, J.; Ebner, P.; Zuelly, S.M.S.; G, C.D.V.P., 2018. Dry-aging improves meat quality attributes of grass-fed beef loins. *Meat Science*, 145: 285-291. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.004

Bergquist, D.H., 1995. Egg dehydration. In: Stadelman, W.J.; O.J., C., eds. *Egg science and technology*. 4th ed. New York (USA): The Haworth Press Inc., 335-376.

Bernard, A.; Broeckaert, F.; De Poorter, G.; De Cock, A.; Hermans, C.; Saegerman, C.; Houins, G., 2002. The Belgian PCB/dioxin incident: Analysis of the food chain contamination and health risk evaluation. *Environmental Research*, 88 (1): 1-18. http://dx.doi.org/10.1006/enrs.2001.4274

Bernard, L.; Leroux, C.; Chilliard, Y., 2008. Expression and Nutritional Regulation of Lipogenic Genes in the Ruminant Lactating Mammary Gland. In: Bösze, Z., ed. *Bioactive Components of Milk*. New York, NY: Springer (Advances in Experimental Medicine and Biology, vol 606), 67-108. http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-74087-4_2

Bernes, G.; Turner, T.; Pickova, J., 2012. Sheep fed only silage or silage supplemented with concentrates 2. Effects on lamb performance and fatty acid profile of ewe milk and lamb meat. *Small Ruminant Research*, 102 (2-3): 114-124. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.08.001

Berntssen, M.H.G.; Olsvik, P.A.; Torstensen, B.E.; Julshamn, K.; Midtun, T.; Goksoyr, A.; Johansen, J.; Sigholt, T.; Joerum, N.; Jakobsen, J.V.; Lundebye, A.K.; Lock, E.J., 2010. Reducing persistent organic pollutants while maintaining long chain omega-3 fatty acid in farmed Atlantic salmon using decontaminated fish oils for an entire production cycle. *Chemosphere*, 81 (2): 242-252. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.06.031

Berntssen, M.H.G.; Sanden, M.; Hove, H.; Lie, O., 2016. Modelling scenarios on feed-to-fillet transfer of dioxins and dioxi-like PCBs in future feeds to farmed Atlantic salmon (Salmo salar). *Chemosphere*, 163: 413-421. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.067

Bernues, A.; Olaizola, A.; Corcoran, K., 2003a. Extrinsic attributes of red meat as indicators of quality in Europe: an application for market segmentation. *Food Quality and Preference*, 14 (4): 265-276. http://dx.doi.org/10.1016/s0950-3293(02)00085-x

Bernues, A.; Olaizola, A.; Corcoran, K., 2003b. Labelling information demanded by European consumers and relationships with purchasing motives, quality and safety of meat. *Meat Science*, 65 (3): 1095-1106. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00327-3

Berri, C.; Besnard, J.; Relandeau, C., 2008. Increasing dietary lysine increases final pH and decreases drip loss of broiler breast meat. *Poultry Science*, 87 (3): 480-484. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2007-00226

Berri, C.; Debut, M.; Sante-Lhoutellier, V.; Arnould, C.; Boutten, B.; Sellier, N.; Baeza, E.; Jehl, N.; Jego, Y.; Duclos, M.J.; Le Bihan-Duval, E., 2005a. Variations in chicken breast meat quality: implications of struggle and muscle glycogen content at death. *British Poultry Science*, 46 (5): 572-579. http://dx.doi.org/10.1080/00071660500303099

Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Baeza, E.; Chartrin, P.; Picgirard, L.; Jehl, N.; Quentin, M.; Picard, M.; Duclos, M.J., 2005b. Further processing characteristics of breast and leg meat from fast-, medium- and slow-growing commercial chickens. *Animal Research*, 54 (2): 123-134. http://dx.doi.org/10.1051/animres:2005008

Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Debut, M.; Sante-Lhoutellier, V.; Baeza, E.; Gigaud, V.; Jego, Y.; Duclos, M.J., 2007. Consequence of muscle hypertrophy on characteristics of Pectoralis major muscle and breast meat quality of broiler chickens. *Journal of Animal Science*, 85 (8): 2005-2011. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2006-398

Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Lepetit, J.; Baeza, E.; Bordeau, T.; Peyrin, F.; Cormier, D.; Gigaud, V., 2006. Effet du délai entre abattage et découpe sur la qualité des filets de poulets labels, certifiés et standards. *11. Journées Sciences du Muscle et Technologies des Viandes*. Clermont Ferrand. ADIV, 215-216.

Berri, C.; Wacrenier, N.; Millet, N.; Le Bihan-Duval, E., 2001. Effect of selection for improved body composition on muscle and meat characteristics of broilers from experimental and commercial lines. *Poultry Science*, 80 (7): 833-838. http://dx.doi.org/10.1093/ps/80.7.833

Berry, B.W., 1997. Sodium alginate plus modified tapioca starch improves properties of low-fat beef patties. *Journal of Food Science*, 62 (6): 1245-1249. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb12254.x

Berry, S.D.; Davis, S.R.; Beattie, E.M.; Thomas, N.L.; Burrett, A.K.; Ward, H.E.; Stanfield, A.M.; Biswas, M.; Ankersmit-Udy, A.E.; Oxley, P.E.; Barnett, J.L.; Pearson, J.F.; van der Does, Y.; MacGibbon, A.H.F.; Spelman, R.J.; Lehnert, K.; Snell, R.G., 2009. Mutation in Bovine beta-Carotene Oxygenase 2 Affects Milk Color. *Genetics*, 182 (3): 923-926. http://dx.doi.org/10.1534/genetics.109.101741

Berthelot, V.; Bas, P.; Pottier, E.; Normand, J., 2012. The effect of maternal linseed supplementation and/or lamb linseed supplementation on muscle and subcutaneous adipose tissue fatty acid composition of indoor lambs. *Meat Science*, 90 (3): 548-557. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.09.014

Berthelot, V.; Bas, P.; Schmidely, P.; Duvaux-Ponter, C., 2001. Effect of dietary propionate on intake patterns and fatty acid composition of adipose tissues in lambs. *Small Ruminant Research*, 40 (1): 29-39. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-4488(00)00217-0

Berthelot, V.; Domange, C., 2018. La qualité de la viande de petits ruminants. In: Roulleaux, F.; Peyrot, B., eds. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Lavoisier 8, 275-307.

Berthelot, V.; Gruffat, D., 2018. 12. Fatty acid composition of muscles in cattle and lamb. In: Noziere, P.; Sauvant, D.; Delaby, L., eds. *Feeding system for ruminants*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 193-202.

Bertocchi, L.; Vitali, A.; Lacetera, N.; Nardone, A.; Varisco, G.; Bernabucci, U., 2014. Seasonal variations in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationship. *Animal*, 8 (4): 667-674. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731114000032

Beuvier, E.; Gagnaire-Soumet, V.; Gaucheron, F., 2014. Les liens entre les procédés technologiques de transformation du lait et les composés d'intérêt nutritionnel du fromage. *Composés d'intérêt nutritionnel du lait et des fromages de terroir*. RMT « Filières fromagères valorisant leur terroir », 59-72.

Bianchi, L.; Martin, B.; Védrine, A.; Leroux, C.; Haudebourg, E.; Ferlay, A.; Agabriel, J.; Cirie, C.; Miranda, G.; Martin, P., 2014. Caractérisation de l'aptitude à coagulation du lait des vaches Salers et identification d'un variant rare de la caséine kappa. *Rencontres Recherches Ruminants*. Paris, p. 267.

Bidanel, J.P.; Silalahi, P.; Tribout, T.; Canario, L.; Ducos, A.; Garreau, H.; Gilbert, H.; Larzul, C.; Milan, D.; Riquet, J.; Schwob, S.; Mercat, M.J.; Hessenfratz, C.; Bouquet, A.; Bazin, C.; Bidanel, J., 2018. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives. *50. Journées de la Recherche Porcine*. Paris, 61-74.

Bittante, G.; Cipolat-Gotet, C.; Cecchinato, A., 2013. Genetic parameters of different measures of cheese yield and milk nutrient recovery from an individual model cheese-manufacturing process. *Journal of Dairy Science*, 96 (12): 7966-7979. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-6517

Bittante, G.; Cipolat-Gotet, C.; Malchiodi, F.; Sturaro, E.; Tagliapietra, F.; Schiavon, S.; Cecchinato, A., 2015. Effect of dairy farming system, herd, season, parity, and days in milk on modeling of the coagulation, curd firming, and syneresis of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 98 (4): 2759-2774. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8909

Bjornevik, M.; Espe, M.; Beattie, C.; Nortvedt, R.; Kiessling, A., 2004. Temporal variation in muscle fibre area, gaping, texture, colour and collagen in triploid and diploid Atlantic salmon (Salmo salar L). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (6): 530-540. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1656

Bjornevik, M.; Hansen, H.; Roth, B.; Foss, A.; Vikingstad, E.; Solberg, C.; Imsland, A.K., 2017. Effects of starvation, subsequent feeding and photoperiod on flesh quality in farmed cod (Gadus morhua). *Aquaculture Nutrition*, 23 (2): 285-292. http://dx.doi.org/10.1111/anu.12391

Blacha, I.; Krischek, C.; Klein, G., 2013. Quality alterations of turkey and pig meat during storage in modified atmosphere or vacuum packages. *Journal of Food Safety and Food Quality-Archiv Fur Lebensmittelhygiene*, 64 (6): 160-167. http://dx.doi.org/10.2376/0003-925x-64-160

Blacha, I.; Krischek, C.; Klein, G., 2014. Influence of Modified Atmosphere Packaging on Meat Quality Parameters of Turkey Breast Muscles. *Journal of Food Protection*, 77 (1): 127-132. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-13-242

Blaga, R.; Aubert, D.; Thébault, A.; Perret, C.; Geers, R.; Thomas, M.; Alliot, A.; Djokic, V.; Ducry, T.; Ortis, N., 2015. Étude de la contamination par Toxoplasma gondii des viandes ovines, bovines et porcines–résultats des plans de surveillance pour les années 2007, 2009 et 2013. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation*, 69: 15-19. https://be.anses.fr/sites/default/files/BEP-mg-BE69-art4.pdf

Blanc, M.; Experton, C.; Pavie, J., 2018. Quelle dynamique de la production de lait biologique en Europe ? *Rencontres Recherches Ruminants*. Paris, 442-446. http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/texte_2_economie_m-blanc-2.pdf

Bloksma, J.; Adriaansen-Tennekes, R.; Huber, M.; de Vijver, L.; Baars, T.; de Wit, J., 2008. Comparison of organic and conventional raw milk quality in the Netherlands. *Biological Agriculture & Horticulture*, 26 (1): 69-83. http://dx.doi.org/10.1080/01448765.2008.9755070

Bobe, G.; Freeman, A.E.; Lindberg, G.L.; Beitz, D.C., 2004. The influence of milk protein phenotypes on fatty acid composition of milk from Holstein cows. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 59 (1-2): 3-6.

Boichard, D.; Govignon-Gion, A.; Larroque, H.; Maroteau, C.; Palhiere, I.; Tosser-Klopp, G.; Rupp, R.; Sanchez, M.P.; Brochard, M., 2014. Genetic determinism of milk composition in fatty acids and proteins in ruminants, and selection potential. *Inra Productions Animales*, 27 (4): 283-298.

Bokkers, E.A.M.; de Boer, I.J.M., 2009. Economic, ecological, and social performance of conventional and organic broiler production in the Netherlands. *British Poultry Science*, 50 (5): 546-557. http://dx.doi.org/10.1080/00071660903140999

Bolger, Z.; Brunton, N.P.; Monahan, F.J., 2017. Effect of mode of addition of flaxseed oil on the quality characteristics of chicken sausage containing vitamin E and omega 3 fatty acids at levels to support a health claim. *Food & Function*, 8 (10): 3563-3575. http://dx.doi.org/10.1039/c7fo00929a

Bolger, Z.; Brunton, N.P.; Monahan, F.J., 2018. Impact of inclusion of flaxseed oil (pre-emulsified or encapsulated) on the physical characteristics of chicken sausages. *Journal of Food Engineering*, 230: 39-48. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.026

Bonneau, M., 1998. Use of entire males for pig meat in the European Union. *Meat Science*, 49: S257-S272.

Bonneau, M.; Antoine-Ilari, E.; Phatsara, C.; Brinkmann, D.; Hviid, M.; Christiansen, M.G.; Fabrega, E.; Rodríguez, P.; Rydhmer, L.; Enting, I., 2011. Diversity of pig production systems at farm level in Europe. *Journal on Chain and Network Science*, 11 (2): 115-135.

Bonneau, M.; Lebret, B., 2010. Production systems and influence on eating quality of pork. *Meat Science*, 84 (2): 293-300. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.03.013

Bonny, S.P.F.; Hocquette, J.F.; Pethick, D.W.; Legrand, I.; Wierzbicki, J.; Allen, P.; Farmer, L.J.; Polkinghorne, R.J.; Gardner, G.E., 2018. Review: The variability of the eating quality of beef can be reduced by predicting consumer satisfaction. *Animal*, 12 (11): 2434-2442. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731118000605

Boom, C.J.; Sheath, G.W., 1997. Nutritional effects on carotenoid concentrations in the fat of beef cattle. *Proceddings of the New Zealand Society of Animal Production*, 57: 282-285.

Borderias, A.J.; Sanchez-Alonso, I., 2011. First Processing Steps and the Quality of Wild and Farmed Fish. *Journal of Food Science*, 76 (1): R1-R5. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01900.x

Borggaard, C.; Birkler, R.; Meinert, L.; Støier, S., 2017. At-line rapid instrumental method for measuring the boar taint components androstenone and skatole in pork fat. *63. International Congress of Meat Science and Technology: Nurturing Locally, Growing*

Globally, Session 4, n°8. Cork, Ireland, 13-18 August 2017, 2 p. http://icomst-proceedings.helsinki.fi/papers/2017_04_08.pdf

Borreani, G.; Coppa, M.; Revello-Chion, A.; Comino, L.; Giaccone, D.; Ferlay, A.; Tabacco, E., 2013. Effect of different feeding strategies in intensive dairy farming systems on milk fatty acid profiles, and implications on feeding costs in Italy. *Journal of Dairy Science*, 96 (11): 6840-6855. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6710

Borucki Castro, S.I.; Lacasse, P.; Fouquet, A.; Beraldin, F.; Robichaud, A.; Berthiaume, R., 2011. Short communication: Feed iodine concentrations on farms with contrasting levels of iodine in milk. *Journal of Dairy Science*, 94 (9): 4684-4689. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3714

Bosworth, B.G.; Holland, M.; Brazil, B.L., 2001. Evaluation of ultrasound imagery and body shape to predict carcass and fillet yield in farm-raised catfish. *Journal of Animal Science*, 79 (6): 1483-1490.

Bosworth, B.G.; Wolters, W.R., 2004. Comparison of production, meat yield, and meat quality traits of NWAC103 line channel catfish, norris line channel catfish, and female channel catfish x male blue catfish F-1 hybrids. *North American Journal of Aquaculture*, 66 (3): 177-183. http://dx.doi.org/10.1577/a03-032.1

Botsoglou, N.A.; Grigoropoulou, S.H.; Botsoglou, E.; Govaris, A.; Papageorgiou, G., 2003. The effects of dietary oregano essential oil and alpha-tocopheryl acetate on lipid oxidation in raw and cooked turkey during refrigerated storage. *Meat Science*, 65 (3): 1193-1200. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00029-9

Bou, R.; Guardiola, F.; Barroeta, A.C.; Codony, R., 2005. Effect of dietary fat sources and zinc and selenium supplements on the composition and consumer acceptability of chicken meat. *Poultry Science*, 84 (7): 1129-1140. http://dx.doi.org/10.1093/ps/84.7.1129

Bou, R.; Guardiola, F.; Grau, A.; Grimpa, S.; Manich, A.; Barroeta, A.C.; Codony, R., 2001. Influence of dietary fat source, alpha-tocopherol, and ascorbic acid supplementation on sensory quality of dark chicken meat. *Poultry Science*, 80 (6): 800-807. http://dx.doi.org/10.1093/ps/80.6.800

Bou, R.; Guardiola, F.; Tres, A.; Barroeta, A.C.; Codony, R., 2004. Effect of dietary fish oil, alpha-tocopheryl acetate, and zinc supplementation on the composition and consumer acceptability of chicken meat. *Poultry Science*, 83 (2): 282-292. http://dx.doi.org/10.1093/ps/83.2.282

Bouraoui, R.; Lahmar, M.; Majdoub, A.; Djemali, M.; Belyea, R., 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*, 51 (6): 479-491. http://dx.doi.org/10.1051/animres:2002036

Bourin, M.C.; Bignon, L.; Méda, B.; Mercerand, F.; Dusart, L.; Bouvarel, I.; Berri, C., 2015. Multicriteria assessment of different rearing systems for intermediary growing broilers. *22. European Symposium on the Quality of Poultry Meat - 16th European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products*. Nantes, 86.

Bourlieu, C.; Menard, O.; Bouzerzour, K.; Mandalari, G.; Macierzanka, A.; Mackie, A.R.; Dupont, D., 2014. Specificity of Infant Digestive Conditions: Some Clues for Developing Relevant In Vitro Models. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54 (11): 1427-1457. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2011.640757

Bourlieu, C.; Menard, O.; De La Chevasnerie, A.; Sams, L.; Rousseau, F.; Madec, M.N.; Robert, B.; Deglaire, A.; Pezennec, S.; Bouhallab, S.; Carriere, F.; Dupont, D., 2015. The structure of infant formulas impacts their lipolysis, proteolysis and disintegration during in vitro gastric digestion. *Food Chemistry*, 182: 224-235. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.001

Bourlieu, C.; Michalski, M.C., 2015. Structure-function relationship of the milk fat globule. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 18 (2): 118-127. http://dx.doi.org/10.1097/mco.0000000000000138

Boutoial, K.; Ferrandini, E.; Rovira, S.; Garcia, V.; Lopez, M.B., 2013a. Effect of feeding goats with rosemary (Rosmarinus officinalis spp.) by-product on milk and cheese properties. *Small Ruminant Research*, 112 (1-3): 147-153. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2012.12.002

Boutoial, K.; Garcia, V.; Rovira, S.; Ferrandini, E.; Abdelkhalek, O.; Lopez, M.B., 2013b. Effect of feeding goats with distilled and non-distilled thyme leaves (Thymus zygis subsp gracilis) on milk and cheese properties. *Journal of Dairy Research*, 80 (4): 448-456. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029913000459

Boutonnet, J.P., 2006. Pale meat from young ruminants in the Mediterranean. Diversity and common traits. Implications for trade. *Animal Products from the Mediterranean Area*, 21-25.

Bouvarel, I.; Fortun-Lamothe, L., 2013. Evaluation de la durabilité pour les filières avicoles : pourquoi, comment et pour qui ? . *10. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. La Rochelle, France, 26-28/03/2013, 42-52. https://www.itavi.asso.fr/download/7806

Bovolenta, S.; Corazzin, M.; Sacca, E.; Gasperi, F.; Biasioli, F.; Ventura, W., 2009. Performance and cheese quality of Brown cows grazing on mountain pasture fed two different levels of supplementation. *Livestock Science*, 124 (1-3): 58-65. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2008.12.009

Bovolenta, S.; Romanzin, A.; Corazzin, M.; Spanghero, M.; Aprea, E.; Gasperi, F.; Piasentier, E., 2014. Volatile compounds and sensory properties of Montasio cheese made from the milk of Simmental cows grazing on alpine pastures. *Journal of Dairy Science*, 97 (12): 7373-7385. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8396

Bowman, M.; Marshall, K.K.; Kuchler, F.; Lynch, L., 2016. Raised without antibiotics: lessons from voluntary labeling of antibiotic use practices in the broiler industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 98 (2): 622-642. http://dx.doi.org/10.1093/ajae/aaw008

Bozkurt, Y.; Dogan, C., 2018. Carcass performance of heifers and bulls of different breeds. *Scientific Papers-Series D-Animal Science*, 61 (1): 31-34.

Brambilla, G.; Fochi, I.; De Filippis, S.P.; Iacovella, N.; di Domenico, A., 2009. Pentachlorophenol, polychlorodibenzodioxin and polychlorodibenzofuran in eggs from hens exposed to contaminated wood shavings. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 26 (2): 258-264. http://dx.doi.org/10.1080/02652030802322572

Bramley, P.M.; Elmadfa, I.; Kafatos, A.; Kelly, F.J.; Manios, Y.; Roxborough, H.E.; Schuch, W.; Sheehy, P.J.A.; Wagner, K.H., 2000. Vitamin E. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80 (7): 913-938. http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1097-0010(20000515)80:7<913::aid-jsfa600>3.0.co;2-3

Brewer, V.B.; Kuttappan, V.A.; Emmert, J.L.; Meullenet, J.F.C.; Owens, C.M., 2012. Big-bird programs: Effect of strain, sex, and debone time on meat quality of broilers. *Poultry Science*, 91 (1): 248-254. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2011-01705

Briens, M.; Mercier, Y.; Rouffineau, F.; Vacchina, V.; Geraert, P.A., 2013. Comparative study of a new organic selenium source v. seleno-yeast and mineral selenium sources on muscle selenium enrichment and selenium digestibility in broiler chickens. *British Journal of Nutrition*, 110 (4): 617-624. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114512005545

Briskey, E.J., 1964. Etiological status and associated studies of pale, soft, exudative porcine musculature. *Advances in food research*. Elsevier, 89-178. http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2628(08)60100-7

Britton, W.M.; Fletcher, D.L., 1987. Influence of storage environment on ease of shell removal from hard-cooked eggs. *Poultry Science*, 66 (3): 453-457. http://dx.doi.org/10.3382/ps.0660453

Brooke-Taylor, S.; Dwyer, K.; Woodford, K.; Kost, N., 2017. Systematic Review of the Gastrointestinal Effects of A1 Compared with A2 beta-Casein. *Advances in Nutrition*, 8 (5): 739-748. http://dx.doi.org/10.3945/an.116.013953

Brown, J.M.; McIntosh, M.K., 2003. Conjugated linoleic acid in humans: Regulation of adiposity and insulin sensitivity. *Journal of Nutrition*, 133 (10): 3041-3046.

Buay, D.; Foong, S.K.; Kiang, D.; Kuppan, L.; Liew, V.H., 2006. How long does it take to boil an egg? Revisited. *European Journal of Physics*, 27 (1): 119-131. http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/27/1/013

Buchin, S.; Martin, B.; Dupont, D.; Bornard, A.; Achilleos, C., 1999. Influence of the composition of Alpine highland pasture on the chemical, rheological and sensory properties of cheese. *Journal of Dairy Research*, 66 (4): 579-588. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029999003842

Bugaud, C.; Buchin, S.; Coulon, J.B.; Hauwuy, A.; Dupont, D., 2001. Influence of the nature of alpine pastures on plasmin activity, fatty acid and volatile compound composition of milk. *Lait*, 81 (3): 401-414.

Bugeon, J.; Lefevre, F.; Fauconneau, B., 2003. Fillet texture and muscle structure in brown trout (Salmo trutta) subjected to long-term exercise. *Aquaculture Research*, 34 (14): 1287-1295. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00938.x

Bugeon, J.; Lefevre, F.; Fauconneau, B., 2004. Correlated changes in skeletal muscle connective tissue and flesh texture during starvation and re-feeding in brown trout (Salmo trutta) reared in seawater. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (11): 1433-1441. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1837

Buitenhuis, B.; Poulsen, N.A.; Larsen, L.B.; Sehested, J., 2015. Estimation of genetic parameters and detection of quantitative trait loci for minerals in Danish Holstein and Danish Jersey milk. *Bmc Genetics*, 16. http://dx.doi.org/10.1186/s12863-015-0209-9

Bullock, K.B.; Huffman, D.L.; Egbert, W.R.; Mikel, W.B.; Bradford, D.D.; Jones, W.R., 1994. Storage stability of low-fat ground beef made with lower value cuts of beef. *Journal of Food Science*, 59 (1): 6-9. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb06884.x

Burel, C.; Médale, F., 2014. Quid de l'utilisation des protéines d'origine végétale en aquaculture? *OCL*, 21 (4): D406, 15 p. http://dx.doi.org/10.1051/ocl/2014013

Butikofer, U.; Meyer, J.; Sieber, R.; Wechsler, D., 2007. Quantification of the angiotensin-converting enzyme-inhibiting tripeptides Val-Pro-Pro and Ile-Pro-Pro in hard, semi-hard and soft cheeses. *International Dairy Journal*, 17 (8): 968-975. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.11.003

Cabedo, L.; Sofos, J.N.; Smith, G.C., 1998. Bacterial growth in ground beef patties made with meat from animals fed diets without or with supplemental vitamin E. *Journal of Food Protection*, 61 (1): 36-40. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-61.1.36

Cagiltay, F.; Erkan, N.; Ulusoy, S.; Selcuk, A.; Ozden, O., 2015. Effects of stock density on texture-colour quality and chemical composition of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 14 (3): 687-698.

Calderon, F.; Chauveau-Duriot, B.; Pradel, P.; Martin, B.; Graulet, B.; Doreau, M.; Noziere, P., 2007. Variations in carotenoids, vitamins A and E, and color in cow's plasma and milk following a shift from hay diet to diets containing increasing levels of Carotenoids and vitamin E. *Journal of Dairy Science*, 90 (12): 5651-5664. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0264

Callon, C.; Berdague, J.L.; Dufour, E.; Montel, M.C., 2005. The effect of raw milk microbial flora on the sensory characteristics of Salers-type cheeses. *Journal of Dairy Science*, 88 (11): 3840-3850. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73069-1

Calnan, H.; Jacob, R.H.; Pethick, D.W.; Gardner, G.E., 2016. Production factors influence fresh lamb longissimus colour more than muscle traits such as myoglobin concentration and pH. *Meat Science*, 119: 41-50. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.009

Campagnol, P.C.B.; dos Santos, B.A.; Lorenzo, J.M.; Cichoski, A.J., 2017. A combined approach to decrease the technological and sensory defects caused by fat and sodium reduction in Bologna-type sausages. *Food Science and Technology International*, 23 (6): 471-479. http://dx.doi.org/10.1177/1082013217701859

Campbell, A.W.; McLaren, R.J., 2007. LoinMAX™ and MyoMAX™: taking DNA marker tests from the research environment to commercial reality. *Proceddings of the New Zealand Society of Animal Production*, 67: 160-162.

Campbell, L.; Raikos, V.; Euston, S.R., 2005. Heat stability and emulsifying ability of whole egg and egg yolk as related to heat treatment. *Food Hydrocolloids*, 19 (3): 533-539. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.10.031

Campidonico, L.; Toral, P.G.; Priolo, A.; Luciano, G.; Valenti, B.; Hervas, G.; Frutos, P.; Copani, G.; Ginane, C.; Niderkorn, V., 2016. Fatty acid composition of ruminal digesta and longissimus muscle from lambs fed silage mixtures including red clover, sainfoin, and timothy. *Journal of Animal Science*, 94 (4): 1550-1560. http://dx.doi.org/10.2527/jas2015-9922

Campo, M.M.; Muela, E.; Olleta, J.L.; Moreno, L.A.; Santaliestra-Pasias, A.M.; Mesana, M.I.; Sanudo, C., 2013. Influence of cooking method on the nutrient composition of Spanish light lamb. *Journal of Food Composition and Analysis*, 31 (2): 185-190. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2013.05.010

Candek-Potokar, M.; Skrlep, M., 2012. Factors in pig production that impact the quality of dry-cured ham: a review. *Animal*, 6 (2): 327-338. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731111001625

Cannon, J.E.; Morgan, J.B.; Heavner, J.; McKeith, F.K.; Smith, G.C.; Meeker, D.L., 1995. Pork quality audit: a review of the factors influencing pork quality. *Journal of Muscle Foods*, 6 (4): 369-402.

Carbonell, M.; Nunez, M.; Fernandez-Garcia, E., 2002. Seasonal variation of volatile compounds in ewe raw milk La Serena cheese. *Lait*, 82 (6): 699-711. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2002043

Cardinal, M.; Cornet, J.; Donnay-Moreno, C.; Gouygou, J.P.; Berge, J.P.; Rocha, E.; Soares, S.; Escorcio, C.; Borges, P.; Valente, L.M.P., 2011. Seasonal variation of physical, chemical and sensory characteristics of sea bream (Sparus aurata) reared under intensive conditions in Southern Europe. *Food Control*, 22 (3-4): 574-585. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.10.007

Carnicella, D.; Dario, M.; Ayres, M.C.C.; Laudadio, V.; Dario, C., 2008. The effect of diet, parity, year and number of kids on milk yield and milk composition in Maltese goat. *Small Ruminant Research*, 77 (1): 71-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.02.006

Carpenter, Z.L.; King, G.T., 1969. Effects of composition upon ground beef palatability. *Proceedings of the European Meeting of Meat Research Workers*, 21-22.

Carpentier, A.; Latouche, K.; Rainelli, P., 2003. Les attributs de la viande de porc et la demande des consommateurs français. *Journées Recherche Porcine en France*, 229-234.

Carpino, S.; Horne, J.; Melilli, C.; Licitra, G.; Barbano, D.M.; Van Soest, P.J., 2004. Contribution of native pasture to the sensory properties of Ragusano cheese. *Journal of Dairy Science*, 87 (2): 308-315. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73169-0

Carrapiso, A.I.; Bonilla, F.; Garcia, C., 2003. Effect of crossbreeding and rearing system on sensory characteristics of Iberian ham. *Meat Science*, 65 (1): 623-629. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00256-5

Carrasco, S.; Panea, B.; Ripoll, G.; Sanz, A.; Joy, M., 2009. Influence of feeding systems on cortisol levels, fat colour and instrumental meat quality in light lambs. *Meat Science*, 83 (1): 50-56. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.03.014

Carreras, I.; Guerrero, L.; Guardia, M.D.; Esteve-Garcia, E.; Regueiro, J.A.G.; Sarraga, C., 2004. Vitamin E levels, thiobarbituric acid test and sensory evaluation of breast muscles from broilers fed alpha-tocopheryl acetate- and beta-carotene-supplemented diets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (4): 313-317. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1639

Casabianca, F., 2018. Les viandes bovines sous signe de qualité et d'origine. In: Ellies-Oury, M.P.; Hocquette, J.F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation* Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Sciences et techniques agroalimentaires), Chapitre 9, 143-163.

Casal, N.; Font-i-Furnols, M.; Gispert, M.; Manteca, X.; Fabrega, E., 2018. Effect of Environmental Enrichment and Herbal Compounds-Supplemented Diet on Pig Carcass, Meat Quality Traits, and Consumers' Acceptability and Preference. *Animals*, 8 (7). http://dx.doi.org/10.3390/ani8070118

Casiraghi, E.; Alamprese, C.; Rossi, M., 2007. Whipping and gelling properties of egg as affected by compositional variability. *28. European Symposium on the Quality of Poultry Meat and 12. European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products*. Prague, 02-05 september 2007. WPSA, 103-104. https://air.unimi.it/retrieve/handle/2434/43398/427815/Casiraghi%20et%20al_functional%20properties.pdf

Cassignol, F., 2011. *Le steak haché et les français.* SNIV-SNCP, 28 p.

Cassignol, F., 2012. Les élaborés, la voie du succès. *Zoom, Magazine d'information des entreprises françaises de viandes*, 10.

Castagnino, D.S.; Seck, M.; Beaudet, V.; Kammes, K.L.; Linton, J.A.V.; Allen, M.S.; Gervais, R.; Chouinard, P.Y.; Girard, C.L., 2016. Effects of forage family on apparent ruminal synthesis of B vitamins in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99 (3): 1884-1894. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10319

Castellani, O.; Martinet, V.; David-Briand, E.; Guerin-Dubiard, C.; Anton, M., 2003. Egg yolk phosvitin: preparation of metal-free purified protein by fast protein liquid chromatography using aqueous solvents. *Journal of Chromatography B-Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*, 791 (1-2): 273-284. http://dx.doi.org/10.1016/s1570-0232(03)00230-7

Castellini, C.; Mugnai, C.; Dal Bosco, A., 2002. Effect of organic production system on broiler carcass and meat quality. *Meat Science*, 60 (3): 219-225. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00124-3

Castillo, C.; Pereira, V.; Abuelo, A.; Hernandez, J., 2013. Effect of Supplementation with Antioxidants on the Quality of Bovine Milk and Meat Production. *Scientific World Journal*: 8. http://dx.doi.org/10.1155/2013/616098

Caubilla-Barron, J.; Forsythe, S.J., 2007. Dry stress and survival time of Enterobacter sakazakii and other Enterobacteriaceae in dehydrated powdered infant formula. *Journal of Food Protection*, 70 (9): 2111-2117. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-70.9.2111

Caubilla-Barron, J.; Hurrell, E.; Townsend, S.; Cheetham, P.; Loc-Carrillo, C.; Fayet, O.; Prere, M.F.; Forsythe, S.J., 2007. Genotypic and phenotypic analysis of Enterobacter sakazakii strains from an outbreak resulting in fatalities in a neonatal intensive care unit in France. *Journal of Clinical Microbiology*, 45 (12): 3979-3985. http://dx.doi.org/10.1128/jcm.01075-07

Cava, R.; Ventanas, J.; Ruiz, J.; Andres, A.I.; Antequera, T., 2000. Sensory characteristics of Iberian ham: Influence of rearing system and muscle location. *Food Science and Technology International*, 6 (3): 235-242. http://dx.doi.org/10.1177/108201320000600306

Cavani, C.; Bianconi, L.; Manfredini, M.; Rizzi, L.; Zarri, M.C., 1991. Effects of a complete diet on the qualitative characteristics of ewe milk and cheese. *Small Ruminant Research*, 5 (3): 273-284. http://dx.doi.org/10.1016/0921-4488(91)90131-9

Ceballos, A.; Sanchez, J.; Stryhn, H.; Montgomery, J.B.; Barkema, H.W.; Wichtel, J.J., 2009. Meta-analysis of the effect of oral selenium supplementation on milk selenium concentration in cattle. *Journal of Dairy Science*, 92 (1): 324-342. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1545

Cecchinato, A.; Chessa, S.; Ribeca, C.; Cipolat-Gotet, C.; Bobbo, T.; Casellas, J.; Bittante, G., 2015. Genetic variation and effects of candidate-gene polymorphisms on coagulation properties, curd firmness modeling and acidity in milk from Brown Swiss cows. *Animal*, 9 (7): 1104-1112. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115000440

Chabault, M.; Baeza, E.; Gigaud, V.; Chartrin, P.; Chapuis, H.; Boulay, M.; Arnould, C.; D'Abbadie, F.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E., 2012. Analysis of a slow-growing line reveals wide genetic variability of carcass and meat quality-related traits. *Bmc Genetics*, 13: 8. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2156-13-90

Chaillou, S.; Chaulot-Talmon, A.; Caekebeke, H.; Cardinal, M.; Christieans, S.; Denis, C.; Desmonts, M.H.; Dousset, X.; Feurer, C.; Hamon, E.; Joffraud, J.J.; La Carbona, S.; Leroi, F.; Leroy, S.; Lorre, S.; Mace, S.; Pilet, M.F.; Prevost, H.; Rivollier, M.; Roux, D.; Talon, R.; Zagorec, M.; Champomier-Verges, M.C., 2015. Origin and ecological selection of core and food-specific bacterial communities associated with meat and seafood spoilage. *Isme Journal*, 9 (5): 1105-1118. http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2014.202

Chaiyapechara, S.; Liu, K.K.M.; Barrows, F.T.; Hardy, R.W.; Dong, F.M., 2003. Proximate composition, lipid oxidation, and sensory characteristics of fillets from rainbow trout Oncorhynchus mykiss fed diets containing 10% to 30% lipid. *Journal of the World Aquaculture Society*, 34 (3): 266-277. http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-7345.2003.tb00065.x

Chambers, D.H.; Esteve, E.; Retiveau, A., 2010. Effect of milk pasteurization on flavor properties of seven commercially available french cheese types. *Journal of Sensory Studies*, 25 (4): 494-511. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-459X.2010.00282.x

Chambers, S.; Lobb, A.; Butler, L.; Harvey, K.; Traill, W.B., 2007. Local, national and imported foods: A qualitative study. *Appetite*, 49 (1): 208-213. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2007.02.003

Chambres d'agriculture de Bretagne, 2018. *La règlementation pour les poules pondeuses en agriculture biologique*, 4 p.

Channon, H.A.; Baud, S.R.; Kerr, M.G.; Walker, P.J., 2003. Effect of low voltage electrical stimulation of pig carcasses and ageing on sensory attributes of fresh pork. *Meat Science*, 65 (4): 1315-1324. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00052-4

Channon, H.A.; D'Souza, D.N.; Dunshea, F.R., 2016. Developing a cuts-based system to improve consumer acceptability of pork: Impact of gender, ageing period, endpoint temperature and cooking method. *Meat Science*, 121: 216-227. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.011

Channon, H.A.; Thatcher, L.P.; Leury, B.J., 1997. Effect of age and nutrition on meat flavor of lean, heavy weight cryptorchid and weather lambs. *43. International Congress of Meat Science and Technology*. Auckland, New Zealand, 268-269.

Chartrin, P.; Berri, C.; Lebihan-Duval, E.; Quentin, M.; Baeza, E., 2005a. Lipid and fatty acid composition of fresh and cured-cooked breast meat of standard, certified and label chickens. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 69 (5): 219-225.

Chartrin, P.; Meteau, K.; Juin, H.; Bernadet, M.D.; Guy, G.; Larzul, C.; Remignon, H.; Mourot, J.; Duclos, M.J.; Baeza, E., 2006. Effects of intramuscular fat levels on sensory characteristics of duck breast meat. *Poultry Science*, 85 (5): 914-922. http://dx.doi.org/10.1093/ps/85.5.914

Chartrin, P.; Schiavone, A.; Bernadet, M.D.; Guy, G.; Mourot, J.; Duclos, M.J.; Baeza, E., 2005b. Effect of genotype and overfeeding on lipid deposition in myofibres and intramuscular adipocytes of breast and thigh muscles of ducks. *Reproduction Nutrition Development*, 45 (1): 87-99. http://dx.doi.org/10.1051/rnd:2005006

Chassaing, C.; Graulet, B.; Agabriel, C.; Martin, B.; Girard, C.L., 2011. Vitamin B9 and B12 contents in cow milk according to production system. *Dairy Production in Mountain: farming systems, milk and cheese quality and implications for the future. Proceedings of the 10th International Meeting on Mountain cheese, 14-15 September 2011, Dronero, italy*. University of Turin, Italy, 35. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.1327&rep=rep1&type=pdf#page=35

Chatain, B., 1994. Abnormal swimbladder development and lordosis in sea bass (dicentrarchus-labrax) and sea bream (sparus-auratus). *Aquaculture*, 119 (4): 371-379. http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(94)90301-8

Chauhan, S.S.; Celi, P.; Ponnampalam, E.N.; Leury, B.J.; Liu, F.; Dunshea, F.R., 2014. Antioxidant dynamics in the live animal and implications for ruminant health and product (meat/milk) quality: role of vitamin E and selenium. *Animal Production Science*, 54 (10): 1525-1536. http://dx.doi.org/10.1071/an14334

Chazal, M.P.; Chilliard, Y., 1986. Effect of stage of lactation, stage of pregnancy, milk-yield and herd management on seasonal-variation in spontaneous lipolysis in bovine-milk. *Journal of Dairy Research*, 53 (4): 529-538. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900033057

Chemaly, M.; Toquin, M.T.; Le Notre, Y.; Fravalo, P., 2008. Prevalence of Listeria monocytogenes in Poultry Production in France. *Journal of Food Protection*, 71 (10): 1996-2000. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-71.10.1996

Chen, M.T.; Lin, S.S.; Lin, L.C., 1991. Effect of stresses before slaughter on changes to the physiological, biochemical and physical characteristics of duck muscle. *British Poultry Science*, 32 (5): 997-1004. http://dx.doi.org/10.1080/00071669108417424

Chen, S.X.; Wang, J.Z.; Van Kessel, J.S.; Ren, F.Z.; Zeng, S.S., 2010. Effect of somatic cell count in goat milk on yield, sensory quality, and fatty acid profile of semisoft cheese. *Journal of Dairy Science*, 93 (4): 1345-1354. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2366

Cheng, C.S.; Liu, Z.H.; Zhou, Y.F.; Wei, H.K.; Zhang, X.M.; Xia, M.; Deng, Z.; Zou, Y.; Jiang, S.W.; Peng, J., 2017. Effect of oregano essential oil supplementation to a reduced-protein, amino acid-supplemented diet on meat quality, fatty acid composition, and oxidative stability of Longissimus thoracis muscle in growing-finishing pigs. *Meat Science*, 133: 103-109. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.06.011

Cheng, J.H.; Sun, D.W.; Han, Z.; Zeng, X.A., 2014. Texture and Structure Measurements and Analyses for Evaluation of Fish and Fillet Freshness Quality: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13 (1): 52-61. http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12043

Cheng, Q.; Sun, D.W., 2008. Factors affecting the water holding capacity of red meat products: A review of recent research advances. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48 (2): 137-159. http://dx.doi.org/10.1080/10408390601177647

Chenut, R., 2017. Quel avenir pour les élevages de poules pondeuses en cage ? *Journée Nationale des professionnels poules pondeuses et oeufs de consommation*. Pacé, 7 décembre 2017 ITAVI, 71-78. https://www.itavi.asso.fr/download/9442

Chenut, R., 2018. De la cage vers l'alternatif : quelles possibilités de conversion ? Quel modèle pour demain ? *Journée Nationale d'information des professionnels poules pondeuses et oeufs de consommation*. Cesson-Sévigné, 4 décembre 2018 ITAVI.

Chenut, R.; Coutelet, G.; Magdelaine, P., 2013. *Structures et organisation des filières volailles de chair en Europe*. Paris: Itavi, 106 p.

Chevance, F.F.V.; Farmer, L.J.; Desmond, E.M.; Novelli, E.; Troy, D.J.; Chizzolini, R., 2000. Effect of some fat replacers on the release of volatile aroma compounds from low-fat meat products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48 (8): 3476-3484. http://dx.doi.org/10.1021/jf991211u

Chevillon, P.; Bonneau, M.; Le Strat, P.; Guingand, N.; Courboulay, V.; Quiniou, N.; Gault, E.; Lhommeau, T., 2010. Acceptabilité par les consommateurs des viandes de porc mâle entier transformées en saucisse, lardon, saucisson sec et jambon cuit. *Journées Recherche Porcine en France*, 227-228.

Chevillon, P.; Escriva, J.P., 2019. Alternative à la castration : vers une détection automatique des carcasses malodorantes ? *Réussir Porc/Tech Porc*, 270 (juillet-août): 6-8. https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/chevillon2019techporcp6-8.pdf

Chikwanha, O.C.; Vahmani, P.; Muchenje, V.; Dugan, M.E.R.; Mapiye, C., 2018. Nutritional enhancement of sheep meat fatty acid profile for human health and wellbeing. *Food Research International*, 104: 25-38. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.005

Chilliard, Y.; Ferlay, A., 2004. Dietary lipids and forages interactions on cow and goat milk fatty acid composition and sensory properties. *Reproduction Nutrition Development*, 44 (5): 467-492. http://dx.doi.org/10.1051/rnd:2004052

Chilliard, Y.; Gagliostro, G.; Flechet, J.; Lefaivre, J.; Sebastian, I., 1991. Duodenal rapeseed oil infusion in early and midlactation cows .5. Milk fatty-acids and adipose-tissue lipogenic activities. *Journal of Dairy Science*, 74 (6): 1844-1854. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78349-5

Chilliard, Y.; Glasser, F.; Ferlay, A.; Bernard, L.; Rouel, J.; Doreau, M., 2007. Diet, rumen biohydrogenation and nutritional quality of cow and goat milk fat. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109 (8): 828-855. http://dx.doi.org/10.1002/ejlt.200700080

Chilliard, Y.; Lamberet, G., 1984. La lipolyse dans le lait: les différents types, mécanismes, facteurs de variation, signification pratique. *Lait*, 64 (645-646): 544-578. https://lait.dairy-journal.org/articles/lait/pdf/1984/645/lait_64_1984_645-646_41.pdf

Chilliard, Y.; Rouel, J.; Leroux, C., 2006. Goat's alpha-s1 casein genotype influences its milk fatty acid composition and delta-9 desaturation ratios. *Animal Feed Science and Technology*, 131 (3-4): 474-487. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.05.025

Chilliard, Y.; Toral, P.G.; Shingfield, K.J.; Rouel, J.; Leroux, C.; Bernard, L., 2014. Effects of diet and physiological factors on milk fat synthesis, milk fat composition and lipolysis in the goat: A short review. *Small Ruminant Research*, 122 (1-3): 31-37. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.07.014

Chizoba Ekezie, F.G.; Cheng, J.H.; Sun, D.W., 2018. Effects of nonthermal food processing technologies on food allergens: A review of recent research advances. *Trends in Food Science & Technology*, 74: 12-25. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.007

Choe, J.; Min, J.S.; Lee, S.O.; Khan, M.I.; Yim, D.G.; Lee, M.; Jo, C., 2018. Influence of Cooking, Storage Period, and Re-heating on Production of Cholesterol Oxides in Chicken Meat. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38 (3): 433-441. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2018.38.3.433

Choi, Y.M.; Kim, B.C., 2009. Muscle fiber characteristics, myofibrillar protein isoforms, and meat quality. *Livestock Science*, 122 (2-3): 105-118. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2008.08.015

Chotteau, P., 2014. La filière viande bovine française. *Viandes & Produits carnés*, 30 (6): 1-5.

Choubert, G., 1992. Salmonid pigmentation : Dynamics and factors of variation. A review. *Inra Productions Animales*, 5 (4): 235-246.

Choubert, G.; Baccaunaud, M., 2006. Colour changes of fillets of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss W.) fed astaxanthin or canthaxanthin during storage under controlled or modified atmosphere. *Lwt-Food Science and Technology*, 39 (10): 1203-1213. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2005.06.017

Choubert, G.; Blanc, J.M.; Vallee, F., 1997. Colour measurement, using the CIELCH colour space, of muscle of rainbow trout, Oncorhynchus mykiss (Walbaum), fed astaxanthin: Effects of family, ploidy, sex, and location of reading. *Aquaculture Research*, 28 (1): 15-22. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.1997.t01-1-00824.x

Chouinard, P.Y.; Girard, V.; Brisson, G.J., 1998. Fatty acid profile and physical properties of milk fat from cows fed calcium salts of fatty acids with varying unsaturation. *Journal of Dairy Science*, 81 (2): 471-481. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75599-7

Ciobanu, D.C.; Lonergan, S.M.; Huff-Lonergan, E.J.; Rothschild, M.F.; Ruvinsky, A., 2011. Genetics of meat quality and carcass traits. In: Rothschild, M.F.; Ruvinsky, A., eds. *The Genetics of the Pig*. 2nd Edition ed. Wallingford (UK): CAB International, 355-389.

Cipolat-Gotet, C.; Cecchinato, A.; Drake, M.A.; Marangon, A.; Martin, B.; Bittante, G., 2018a. From cow to cheese: Novel phenotypes related to the sensory profile of model cheeses from individual cows. *Journal of Dairy Science*, 101 (7): 5865-5877. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2017-14342

Cipolat-Gotet, C.; Cecchinato, A.; Malacarne, M.; Bittante, G.; Summer, A., 2018b. Variations in milk protein fractions affect the efficiency of the cheese-making process. *Journal of Dairy Science*, 101 (10): 8788-8804. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2018-14503

Claps, S.; Sepe, L.; Caputo, A.R.; Di Trana, A.; Paladino, F.; Di Napoli, M.A.; Pizzillo, M.; Fedele, V., 2009. Influence of four single fresh forages on volatile organic compound (VOC) content and profile and sensory properties of goat Caciotta cheese. *Italian Journal of Animal Science*, 8: 390-392. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2009.s2.390

Clare, D.A.; Bang, W.S.; Cartwright, G.; Drake, M.A.; Coronel, P.; Simunovic, J., 2005. Comparison of sensory, microbiological, and biochemical parameters of microwave versus indirect UHT fluid skim milk during storage. *Journal of Dairy Science*, 88 (12): 4172-4182. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73103-9

Claret, A.; Guerrero, L.; Gartzia, I.; Garcia-Quiroga, M.; Gines, R., 2016. Does information affect consumer liking of farmed and wild fish? *Aquaculture*, 454: 157-162. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.12.024

Claus, J.R.; Jeong, J.Y., 2018. Processing conditions and endpoint temperature effects on development of pink defect without pink-generating ligands in cooked ground turkey breast. *Poultry Science*, 97 (2): 667-675. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex168

Cleveland, B.M.; Kenney, P.B.; Manor, M.L.; Weber, G.M., 2012. Effects of feeding level and sexual maturation on carcass and fillet characteristics and indices of protein degradation in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, 338: 228-236. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.01.032

Clinquart, A.; Hornick, J.L.; Van Eenaeme, C.; Istasse, L., 1998. The influence of double muscling on production and quality of meat in Belgian Blue cattle. *Productions Animales*, 11 (4): 285-297.

Clinquart, A.; Istasse, L.; Dufrasne, I.; Mayombo, A.; Vaneenaeme, C.; Bienfait, J.M., 1991. Effects on animal performance and fat composition of 2 fat concentrates in diets for growing-fattening bulls. *Animal Production*, 53: 315-320. http://dx.doi.org/10.1017/s0003356100020316

Cloete, J.J.E.; Hoffman, L.C.; Cloete, S.W.P., 2012. A comparison between slaughter traits and meat quality of various sheep breeds: Wool, dual-purpose and mutton. *Meat Science*, 91 (3): 318-324. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.02.010

CNIEL, 2014. *A.O.P. La plus belle preuve d'authenticité*. Paris: CNIEL, 32 p.

CNIEL, 2015. *Observatoire de l'alimentation des vaches laitières : description des 8 principaux systèmes d'élevage- Références. Edition 2015-2018*, 39 p. http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/26c6068e-7305-420e-9c95-2c43f47b21ff

CNIEL, 2019. *L'économie laitière en chiffres : édition 2019*. Paris: CNIEL, 194 p. https://presse.filiere-laitiere.fr/assets/economie-laitiere-en-chiffres-edition-2019-11a6-ef05e.html?dl=1

Coetzee, G.J.M.; Hoffman, L.C., 2001. Effect of dietary vitamin E on the performance of broilers and quality of broiler meat during refrigerated and frozen storage. *South African Journal of Animal Science*, 31 (3-4): 158-173.

Coggins, P.C.; Schilling, M.W.; Kumari, S.; Gerrard, P.D., 2008. Development of a sensory lexicon for conventional milk yogurt in the United States. *Journal of Sensory Studies*, 23 (5): 671-687. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-459X.2008.00179.x

Collomb, M.; Butikofer, U.; Sieber, R.; Jeangros, B.; Bosset, J.O., 2002. Composition of fatty acids in cow's milk fat produced in the lowlands, mountains and highlands of Switzerland using high-resolution gas chromatography. *International Dairy Journal*, 12 (8): 649-659. http://dx.doi.org/10.1016/s0958-6946(02)00061-4

Colonna, A.; Durham, C.; Meunier-Goddik, L., 2011. Factors affecting consumers' preferences for and purchasing decisions regarding pasteurized and raw milk specialty cheeses. *Journal of Dairy Science*, 94 (10): 5217-5226. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4456

Comino, L.; Righi, F.; Coppa, M.; Quarantelli, A.; Tabacco, E.; Borreani, G., 2015. Relationships among early lactation milk fat depression, cattle productivity and fatty acid composition on intensive dairy farms in Northern Italy. *Italian Journal of Animal Science*, 14 (3): 350-361. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2015.3656

Commission européenne, 1991. Directive 91/630/CEE du Conseil établissant les normes minimales relatives à la protection des porcs *JOCE n°340 du 11 décembre 1991 page 33*. https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000339168&categorieLien=id

Commission européenne, 2000a. Règlement (CE) n°1760/2000 du Parlement européen et du Conseil du 17 juillet 2000 établissant un système d'identification et d'enregistrement des bovins et concernant l'étiquetage de la viande bovine et des produits à base de viande bovine, et abrogeant le règlement (CE) n° 820/97 du Conseil. *JOUE L 204 du 11/08/2000 p. 0001 - 0010*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32000R1760&qid=1469534314565

Commission européenne, 2000b. Règlement (CE) n°1825/2000 de la Commission du 25 août 2000 portant modalités d'application du règlement (CE) n° 1760/2000 du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne l'étiquetage de la viande bovine et des produits à base de viande bovin. *JOUE L 216, 26.8.2000, p. 8–12*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32000R1825

Commission européenne, 2003. Règlement (CE) n° 1831/2003 du Parlement européen et du Conseil du 22 septembre 2003 relatif aux additifs destinés à l'alimentation des animaux (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 268 du 18.10.2003, p.29-43*.

Commission européenne, 2004. Règlement (CE) n°853/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale. *JOUE L 139 du 30/04/2004, p.55 -205*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004R0853

Commission européenne, 2005a. Règlement (CE) n°2073/2005 de la Commission du 15 novembre 2005 concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE n° L 338 du 22/12/2005 p. 0001-0026*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32005R2073&qid=1469526990047

Commission européenne, 2005b. Règlement (CE) n° 1/2005 du Conseil du 22 décembre 2004 relatif à la protection des animaux pendant le transport et les opérations annexes et modifiant les directives 64/432/CEE et 93/119/CE et le règlement (CE) n° 1255/97. *JOUE L 3 du 5.1.2005, p. 1–44*

Commission européenne, 2006. Règlement (CE) n°1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires. *JOUE L 364 du 20.06.2012, p. 5-24*.

Commission européenne, 2007. Règlement (CE) n°834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n°2092/91. *JOUE L 189 du 20.07.2007, p. 1–23*.

Commission européenne, 2008a. Directive 2008/120/CE du Conseil du 18 décembre 2008 établissant les normes minimales relatives à la protection des porcs (version codifiée). *JOUE L 221 47 du 18 février 2009, p. 5–13*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0120&from=FR

Commission européenne, 2008b. Règlement (CE) n°889/2008 de la Commission du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n°834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles. *JOUE L 250 du 18.9.2008, p. 1–84*.

Commission européenne, 2009. Règlement (CE) n o 450/2009 de la Commission du 29 mai 2009 concernant les matériaux et objets actifs et intelligents destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE 135, 30.5.2009, p. 3–11*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32009R0450

Commission européenne, 2018a. Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) no 834/2007 du Conseil. *JOUE L 150 du 14.6.2018, p. 1–92*.

Commission européenne, 2018b. Règlement d'exécution (UE) 2018/1584 de la Commission du 22 octobre 2018 modifiant le règlement (CE) n° 889/2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.). *JOUE L 264 du 23.10.2018, p. 1–12*.

Concollato, A.; Parisi, G.; Masoero, G.; Romvari, R.; Olsen, R.E.; Zotte, A.D., 2016. Carbon monoxide stunning of Atlantic salmon (Salmo salar L.) modifies rigor mortis and sensory traits as revealed by NIRS and other instruments. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96 (10): 3524-3535. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7537

Concollato, A.; Zotte, A.D.; Vargas, S.C.; Cullere, M.; Secci, G.; Parisi, G., 2019. Effects of three different stunning/slaughtering methods on physical, chemical, and sensory changes in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (2): 613-619. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.9222

Conde-Aguilera, J.A.; Cobo-Ortega, C.; Tesseraud, S.; Lessire, M.; Mercier, Y.; van Milgen, J., 2013. Changes in body composition in broilers by a sulfur amino acid deficiency during growth. *Poultry Science*, 92 (5): 1266-1275. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2012-02796

Cooney, S.; Tiernan, D.; Joyce, P.; Kelly, A.L., 2000. Effect of somatic cell count and polymorphonuclear leucocyte content of milk on composition and proteolysis during ripening of Swiss-type cheese. *Journal of Dairy Research*, 67 (2): 301-307. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900004076

Copin, S.; Robert-Pillot, A.; Gay, M.; Quilici, M.L., 2015. Vibrio impliqués en pathologie humaine: une étude de leur répartition dans des produits de la mer consommés en France. *Bulletin épidémiologique:,santé animale, alimentation*, (68): 21-25. https://hal-pasteur.archives-ouvertes.fr/pasteur-01162421/document

Coppa, M.; Chassaing, C.; Sibra, C.; Cornu, A.; Verbic, J.; Golecky, J.; Engel, E.; Ratel, J.; Boudon, A.; Ferlay, A.; Martin, B., 2019. Forage system is the key driver of mountain milk specificity. *Journal of Dairy Science*, 102 (11): 10483-10499. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2019-16726

Coppa, M.; Verdier-Metz, I.; Ferlay, A.; Pradel, P.; Didienne, R.; Farruggia, A.; Montel, M.C.; Martin, B., 2011. Effect of different grazing systems on upland pastures compared with hay diet on cheese sensory properties evaluated at different ripening times. *International Dairy Journal*, 21 (10): 815-822. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2011.04.006

Corkins, K.G.; Shurley, T., 2016. What's in the Bottle? A Review of Infant Formulas. *Nutrition in Clinical Practice*, 31 (6): 723-729. http://dx.doi.org/10.1177/0884533616669362

Corlay, Y.; Causeret, D.; Lorient, D. 1993. Process for fractioning of chicken yolk. Brevet.

Cornforth, D., 1994. Color - its basis and importance. In: Pearson, A.M.; Dutson, T.R., eds. *Quality Attributes and their Measurement in Meat, Poultry and Fish Products*. Boston, MA: Springer (Advances in Meat Research, vol 9), 34-78. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-2167-9_2

Cornu, A.; Rabiau, N.; Kondjoyan, N.; Verdier-Metz, I.; Pradel, P.; Tournayre, P.; Berdague, J.L.; Martin, B., 2009. Odour-active compound profiles in Cantal-type cheese: Effect of cow diet, milk pasteurization and cheese ripening. *International Dairy Journal*, 19 (10): 588-594. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.04.008

Corraze, G.; Kaushik, S., 1999. Les lipides des poisons marins et d'eau douce. . *OCL*, 6 (1): 111-115.

Corraze, G.; Kaushik, S., 2009. Lipid nutrition and fish oil replacement by vegetable oils in pisciculture. *Cahiers Agricultures*, 18 (2-3): 112-118. http://dx.doi.org/10.1684/agr.2009.0276

Cortinas, L.; Barroeta, A.C.; Villaverde, C.; Galobart, J.; Guardiola, F.; Baucells, M.D., 2005. Influence of the dietary polyunsaturation level on chicken meat quality: Lipid oxidation. *Poultry Science*, 84 (1): 48-55. http://dx.doi.org/10.1093/ps/84.1.48

Costa, C.; Antonucci, F.; Boglione, C.; Menesatti, P.; Vandeputte, M.; Chatain, B., 2013. Automated sorting for size, sex and skeletal anomalies of cultured seabass using external shape analysis. *Aquacultural Engineering*, 52: 58-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.09.001

Coulon, J.B.; Delacroix-Buchet, A.; Martin, B.; Pirisi, A., 2004. Relationships between ruminant management and sensory characteristics of cheeses: a review. *Lait*, 84 (3): 221-241. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2004008

Coulon, J.B.; Delacroix-Buchet, A.; Martin, B.; Pirisi, A., 2005. Ruminant management and sensory characteristics of cheeses. *Productions Animales*, 18 (1): 49-62.

Coulon, J.B.; Gasqui, P.; Barnouin, J.; Ollier, A.; Pradel, P.; Pomies, D., 2002. Effect of mastitis and related-germ on milk yield and composition during naturally-occurring udder infections in dairy cows. *Animal Research*, 51 (5): 383-393. http://dx.doi.org/10.1051/animres:2002031

Coulon, J.B.; Remond, B., 1991. Variations in milk output and milk protein-content in response to the level of energy supply to the dairy-cow -A review. *Livestock Production Science*, 29 (1): 31-47. http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226(91)90118-a

Coulon, J.B.; Verdier, I.; Pradel, P.; Almena, M., 1998. Effect of lactation stage on the cheesemaking properties of milk and the quality of Saint-Nectaire-type cheese. *Journal of Dairy Research*, 65 (2): 295-305. http://dx.doi.org/10.1017/s002202999700277x

Coutron-Gambotti, C.; Gandemer, G.; Rousset, S.; Maestrini, O.; Casabianca, F., 1999. Reducing salt content of dry-cured ham: effect on lipid composition and sensory attributes. *Food Chemistry*, 64 (1): 13-19. http://dx.doi.org/10.1016/s0308-8146(98)00111-3

Couvreur, S.; Hurtaud, C.; Marnet, P.G.; Faverdin, P.; Peyraud, J.L., 2007. Composition of milk fat from cows selected for milk fat globule size and offered either fresh pasture or a corn silage-based diet. *Journal of Dairy Science*, 90 (1): 392-403. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72640-1

Covaci, A.; Roosens, L.; Dirtu, A.C.; Waegeneers, N.; Van Overmeire, I.; Neels, H.; Goeyens, L., 2009. Brominated flame retardants in Belgian home-produced eggs: Levels and contamination sources. *Science of the Total Environment*, 407 (15): 4387-4396. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.057

Cozar, A.; Vergara, H., 2018. Lamb burgers made with low and high value cuts: Effect of the spice added and the packaging method on shelf life. *Cyta-Journal of Food*, 16 (1): 1115-1124. http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2018.1537303

Cozma, A.; Martin, B.; Guiadeur, M.; Pradel, P.; Tixier, E.; Ferlay, A., 2013. Influence of calf presence during milking on yield, composition, fatty acid profile and lipolytic system of milk in Prim'Holstein and Salers cow breeds. *Dairy Science & Technology*, 93 (1): 99-113. http://dx.doi.org/10.1007/s13594-012-0094-1

Craigie, C.R.; Fowler, S.; Knight, M.; Stuart, A.; Hopkins, D.; Reis, M.M., 2014. Spectral imaging techniques for predicting meat quality-An Australian perspective. In: Maltin, C.; Craigie, C.; Bunger, L., eds. *Farm Animal Imaging*

Craigie, C.R.; Lambe, N.R.; Richardson, R.I.; Haresign, W.; Maltin, C.A.; Rehfeldt, C.; Roehe, R.; Morris, S.T.; Bunger, L., 2012. The effect of sex on some carcass and meat quality traits in Texel ewe and ram lambs. *Animal Production Science*, 52 (6-7): 601-607. http://dx.doi.org/10.1071/an11282

Crouse, C.C.; Davidson, J.W.; Good, C.M.; May, T.C.; Summerfelt, S.T.; Kenney, P.B.; Leeds, T.D.; Cleveland, B.M., 2018. Growth and fillet quality attributes of five genetic strains of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) reared in a partial water reuse system and harvested at different sizes. *Aquaculture Research*, 49 (4): 1672-1681. http://dx.doi.org/10.1111/are.13623

Cui, S.H.; Ge, B.L.; Zheng, J.; Meng, J.H., 2005. Prevalence and antimicrobial resistance of Campylobacter spp. and Salmonella serovars in organic chickens from Maryland retail stores. *Applied and Environmental Microbiology*, 71 (7): 4108-4111. http://dx.doi.org/10.1128/aem.71.7.4108-4111.2005

Culioli, J.; Touraille, C.; Bordes, P.; Girard, J.P., 1990. Carcass and meat characteristics of label fermier chickens. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 54 (6): 237-245.

D'Alessandro, A.G.; Maiorano, G.; Kowaliszyn, B.; Loiudice, P.; Martemucci, G., 2012. How the nutritional value and consumer acceptability of suckling lambs meat is affected by the maternal feeding system. *Small Ruminant Research*, 106 (2-3): 83-91. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2012.02.001

d'Alexis, S.; Sauvant, D.; Boval, M., 2014. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *Journal of Agricultural Science*, 152 (4): 655-666. http://dx.doi.org/10.1017/s0021859613000622

D'Arce, M.R.B., 2006. Química básica de lipídeos. In: Oetterer, M., ed. *Fundamentos de Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Manole, Barueri, 196-240.

Dadgar, S.; Lee, E.S.; Leer, T.L.V.; Crowe, T.G.; Classen, H.L.; Shand, P.J., 2011. Effect of acute cold exposure, age, sex, and lairage on broiler breast meat quality. *Poultry Science*, 90 (2): 444-457. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2010-00840

Dallin, J.; Perkins, D., 2017. *Backyard Poultry Biosecurity*: Utah State University,Agriculture, 6 p.

Dalmau, A.; Di Nardo, A.; Realini, C.E.; Rodriguez, P.; Llonch, P.; Temple, D.; Velarde, A.; Giansante, D.; Messori, S.; Villa, P.D., 2014. Effect of the duration of road transport on the physiology and meat quality of lambs. *Animal Production Science*, 54 (2): 179-186. http://dx.doi.org/10.1071/an13024

Damir, A.A.; Elzalaki, E.M.; Ibrahim, T.M., 1988. Preparation, foaming, electrophoretic patterns and storage of concentrated liquid eggs. *Nahrung-Food*, 32 (9): 881-888.

Daniel, Z.; Wynn, R.J.; Salter, A.M.; Buttery, P.J., 2004. Differing effects of forage and concentrate diets on the oleic acid and conjugated linoleic acid content of sheep tissues: The role of stearoyl-CoA desaturase. *Journal of Animal Science*, 82 (3): 747-758.

Dashdorj, D.; Amna, T.; Hwang, I., 2015. Influence of specific taste-active components on meat flavor as affected by intrinsic and extrinsic factors: an overview. *European Food Research and Technology*, 241 (2): 157-171. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-015-2449-3

Dashdorj, D.; Tripathi, V.K.; Cho, S.; Kim, Y.; Hwang, I., 2016. Dry aging of beef; Review. *Journal of Animal Science and Technology*, 58 (1): 20. https://doi.org/10.1186/s40781-016-0101-9

Dashti, N.G.; Mirlohi, M.; Dashti, M.G.; Jafari, M.; Esfahani, N.B., 2015. Antioxidant Effect of Thyme Essential Oil on Oxidative Stability of Chicken Nuggets. *International Journal of Food Engineering*, 1 (2): 115-120,. http://dx.doi.org/10.18178/ijfe.1.2.115-120

Davidson, J.; Schrader, K.; Ruan, E.; Swift, B.; Aalhus, J.; Juarez, M.; Wolters, W.; Burr, G.; Good, C.; Summerfelt, S.T., 2014a. Evaluation of depuration procedures to mitigate the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol from Atlantic salmon Salmo salar raised to market-size in recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 61: 27-34. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.05.006

Davidson, J.W.; Kenney, P.B.; Manor, M.; Good, C.M.; Weber, G.M.; Aussanasuwannakul, A.; Turk, P.J.; Welsh, C.; Summerfelt, S.T., 2014b. Growth performance, fillet quality, and reproductive maturity of Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) cultured to 5 kilograms within freshwater recirculating systems. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 5 (4): 1. http://dx.doi.org/10.4172/2155-9546.1000238

De Brito, G.F.; McGrath, S.R.; Holman, B.W.B.; Friend, M.A.; Fowler, S.M.; van de Ven, R.J.; Hopkins, D.L., 2016. The effect of forage type on lamb carcass traits, meat quality and sensory traits. *Meat Science*, 119: 95-101. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.030

De Briyne, N.; Berg, C.; Blaha, T.; Temple, D., 2016. Pig castration: will the EU manage to ban pig castration by 2018? *Porcine Health Management*, 2. http://dx.doi.org/10.1186/s40813-016-0046-x

De Cesare, A., 2018. Salmonella in Foods: A Reemerging Problem. *Advances in food and nutrition research*. Elsevier, 137-179. http://dx.doi.org/10.1016/bs.afnr.2018.02.007

de Medeiros, E.J.L.; Queiroga, R.; de Medeiros, A.N.; Bomfim, M.A.D.; Batista, A.S.M.; Felex, S.S.D.; Madruga, M.S., 2013. Sensory profile and physicochemical parameters of cheese from dairy goats fed vegetable oils in the semiarid region of Brazil. *Small Ruminant Research*, 113 (1): 211-218. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.02.006

De Noni, I.; FitzGerald, R.J.; Korhonen, H.J.; Le Roux, Y.; Livesey, C.T.; Thorsdottir, I.; Tomé, D.; Witkamp, R., 2009. *Review of the potential health impact of β-casomorphins and related peptides* EFSA Scientific Report, 107 p. https://www.ruminantia.it/wp-content/uploads/2017/03/EFSA-2009-EFSA_Journal.pdf

de Roest, K.; Montanari, C.; Fowler, T.; Baltussen, W., 2009. Resource efficiency and economic implications of alternatives to surgical castration without anaesthesia. *Animal*, 3 (11): 1522-1531. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109990516

de Shazo, R.D.; Bigler, S.; Skipworth, L.B., 2013. The Autopsy of Chicken Nuggets Reads "Chicken Little". *American Journal of Medicine*, 126 (11): 1018-1019. http://dx.doi.org/10.1016/j.amjmed.2013.05.005

De Smet, S.; Raes, K.; Demeyer, D., 2004. Meat fatty acid composition as affected by fatness and genetic factors: a review. *Animal Research*, 53 (2): 81-98. http://dx.doi.org/10.1051/animres:2004003

De Smet, S.; Webb, E.C.; Claeys, E.; Uytterhaegen, L.; Demeyer, D.I., 2000. Effect of dietary energy and protein levels on fatty acid composition of intramuscular fat in double-muscled Belgian Blue bulls. *Meat Science*, 56 (1): 73-79.

De Verdal, H.; Narcy, A.; Chapuis, H.; Bastianelli, D.; Même, N.; Le Bihan-Duval, E.; Mignon-Grasteau, S., 2011. Possibilités de diminution des rejets chez les poulets par la sélection génétique. *9. Journées de la Recherche Avicole*. Tours, France, 29 et 30 mars 2011, 212-216. http://agritrop.cirad.fr/559664/1/document_559664.pdf

De Vries, M.; Kwakkel, R.P.; Kijlstra, A., 2006. Dioxins in organic eggs: a review. *Njas-Wageningen Journal of Life Sciences*, 54 (2): 207-221.

Debut, M.; Berri, C.; Arnould, C.; Guemene, D.; Sante-Lhoutellier, V.; Sellier, N.; Baeza, E.; Jehl, N.; Jego, Y.; Beaumont, C.; Le Bihan-Duval, E., 2005. Behavioural and physiological responses of three chicken breeds to pre-slaughter shackling and acute heat stress. *British Poultry Science*, 46 (5): 527-535. http://dx.doi.org/10.1080/00071660500303032

Degre, A.; Debouche, C.; Verheve, D., 2007. Conventional versus alternative pig production assessed by multicriteria decision analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 27 (3): 185-195. http://dx.doi.org/10.1051/agro:2007004

Delbarre-Ladrat, C.; Cheret, R.; Taylor, R.; Verrez-Bagnis, V., 2006. Trends in postmortem aging in fish: Understanding of proteolysis and disorganization of the myofibrillar structure. *Critical reviews in food science and nutrition*, 46 (5): 409-421. http://dx.doi.org/10.1080/10408390591000929

Delmotte, C.; Rondia, P.; Raes, K.; Dehareng, F.; Decruynaere, V., 2007. Omega 3 and CLA naturally enhanced levels of animal products: effects of grass and linseed supplementation on the fatty acid composition of lamb meat and sheep milk. *Options Mediterrannéennes*, 74: 41-48.

Demarigny, Y.; Beuvier, E.; Buchin, S.; Pochet, S.; Grappin, R., 1997. Influence of raw milk microflora on the characteristics of Swiss-type cheeses: II. Biochemical and sensory characteristics. *Lait*, 77 (1): 151-167.

Demirok, E.; Kolsarici, N., 2014. Effect of green tea extract and microwave pre-cooking on the formation of acrylamide in fried chicken drumsticks and chicken wings. *Food Research International*, 63: 290-298. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.003

den Hertog Meischke, M.J.A.; Smulders, F.J.M.; Houben, J.H.; Eikelenboom, G., 1997. The effect of dietary vitamin E supplementation on drip loss of bovine Longissimus lumborum, Psoas major and Semitendinosus muscles. *Meat Science*, 45 (2): 153-160. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(96)00119-2

Denis, C.; Protais, J.; Corbion, B.; Picoche, B.; Colin, P.; Lahellec, C., 1995. Thermorésistance de Salmonella enteritidis inoculée dans des ovoproduits: influence de l'activité de l'eau sur la thermorésistance: Gestion des populations microbiennes dans les industries agro-alimentaires. *Industries alimentaires et agricoles*, 112 (9): 659-663.

Denys, S.; Caboche, J.; Tack, K.; Rychen, G.; Wragg, J.; Cave, M.; Jondreville, C.; Feidt, C., 2012. In Vivo Validation of the Unified BARGE Method to Assess the Bioaccessibility of Arsenic, Antimony, Cadmium, and Lead in Soils. *Environmental Science & Technology*, 46 (11): 6252-6260. http://dx.doi.org/10.1021/es3006942

Dervilly-Pinel, G.; Guerin, T.; Minvielle, B.; Travel, A.; Normand, J.; Bourin, M.; Royer, E.; Dubreil, E.; Mompelat, S.; Hommet, F.; Nicolas, M.; Hort, V.; Inthavong, C.; Saint-Hilaire, M.; Chafey, C.; Parinet, J.; Cariou, R.; Marchand, P.; Le Bizec, B.; Verdon, E.; Engel, E., 2017. Micropollutants and chemical residues in organic and conventional meat. *Food Chemistry*, 232: 218-228. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.013

Descalzo, A.M.; Sancho, A.M., 2008. A review of natural antioxidants and their effects on oxidative status, odor and quality of fresh beef produced in Argentina. *Meat Science*, 79 (3): 423-436. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.12.006

Deschamps, M.H.; Labbe, L.; Baloche, S.; Fouchereau-Peron, M.; Dufour, S.; Sire, J.Y., 2009. Sustained exercise improves vertebral histomorphometry and modulates hormonal levels in rainbow trout. *Aquaculture*, 296 (3-4): 337-346. http://dx.doi.org/10.1016/j.cbd.2016.05.001

Deschamps, M.H.; Meunier, F.; Sire, J.T., 2010. Le squelette. In: Bernard Jalabert, A.F., ed. *La truite arc-en-ciel. De la biologie à l'élevage*. Paris: Editions Quae.

Dessen, J.E.; Morkore, T.; Bildoy, J.I.; Johnsen, S.N.; Poppe, L.T.; Hatlen, B.; Thomassen, M.S.; Rorvik, K.A., 2019. Increased dietary protein-to-lipid ratio improves survival during naturally occurring pancreas disease in Atlantic salmon, Salmo salar L. *Journal of Fish Diseases*, 42 (1): 21-34. http://dx.doi.org/10.1111/jfd.12904

Devatkal, S.K.; Kadam, D.M.; Naik, P.K.; Sahoo, J., 2011. Quality characteristics of gluten-free chicken nuggets extended with sorghum flour. *Journal of Food Quality*, 34 (2): 88-92. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4557.2010.00367.x

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Nabinger, C.; Prache, S., 2014. Influence of fresh alfalfa supplementation on fat skatole and indole concentration and chop odour and flavour in lambs grazing a cocksfoot pasture. *Meat Science*, 98 (4): 607-614. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.008

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Prache, S., 2019. How does barley supplementation in lambs grazing alfalfa affect meat sensory quality and authentication? *Animal*, 13 (2): 427-434. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118001477

Dewhurst, R.J., 2013. Milk production from silage: comparison of grass, legume and maize silages and their mixtures. *Agricultural and Food Science*, 22 (1): 57-69.

DGCCRF, 2019. *Signes officiels de la qualité des produits alimentaires, Fiches pratiques*. Paris: DGCCRF, 7 p. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/documentation/fiches_pratiques/fiches/signes-officiels-de-qualite.pdf

Di Marco, P.; Petochi, T.; Marino, G.; Priori, A.; Finoia, M.G.; Tomassetti, P.; Porrello, S.; Giorgi, G.; Lupi, P.; Bonelli, A.; Parisi, G.; Poli, B.M., 2017. Insights into organic farming of European sea bass Dicentrarchus labrax and gilthead sea bream Sparus aurata through the assessment of environmental impact, growth performance, fish welfare and product quality. *Aquaculture*, 471: 92-105. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.012

Diaz, M.T.; Velasco, S.; Caneque, V.; Lauzurica, S.; de Huidobro, F.R.; Perez, C.; Gonzalez, J.; Manzanares, C., 2002. Use of concentrate or pasture for fattening lambs and its effect on carcass and meat quality. *Small Ruminant Research*, 43 (3): 257-268. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-4488(02)00016-0

Dinh, T.T.N.; Legako, J.F.; Miller, M.F.; Brooks, J.C., 2018. Effects of USDA quality grade and cooking on water-soluble precursors of beef flavor. *Meat Science*, 146: 122-130. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.08.008

Direction départementale de la protection des populations, 2015. *Sécurité sanitaire des aliments, dossier œufs* Pau: Direction départementale de la protection des populations, 6 p.

Djenane, D.; Roncales, P., 2018. Carbon Monoxide in Meat and Fish Packaging: Advantages and Limits. *Foods*, 7 (2): 34. http://dx.doi.org/10.3390/foods7020012

Dockes, A.C.; Delanoue, E.; Chouteau, A.; Philibert, A.; Magdelaine, P.; Roguet, C., 2017. Points de vue et attentes des consommateurs et citoyens vis-à-vis de l'élevage. Une étude quantitative auprès de 2 000 personnes en France. *12. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, 5 p. https://www.itavi.asso.fr/download/10114

Dominguez-Hernandez, E.; Salaseviciene, A.; Ertbjerg, P., 2018. Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms. *Meat Science*, 143: 104-113. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.032

Dourmad, J.Y.; Carpentier, A.; Lebret, B.; Meunier-Salaun, M.C., 2006. Le bien-être animal, un facteur d'évolution des systèmes de production porcine? *Bulletin de l'Académie vétérinaire de France*, 159 (3): 213-217.

Dourmad, J.Y.; Nassy, G.; Salaün, Y.; Riquet, J.; Lebret, B., 2015. Estimation des pertes alimentaires dans la filière porcine entre la sortie de l'élevage et la commercialisation des produits. *Innovations Agronomiques*, 48: 115-125. http://dx.doi.org/10.15454/1.4622710500090479e12

Dourmad, J.Y.; Ryschawy, J.; Trousson, T.; Bonneau, M.; Gonzalez, J.; Houwers, H.W.J.; Hviid, M.; Zimmer, C.; Nguyen, T.L.T.; Morgensen, L., 2014. Evaluating environmental impacts of contrasting pig farming systems with life cycle assessment. *Animal*, 8 (12): 2027-2037. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731114002134

Dourmad, J.Y.; Salaün, Y.; Lebret, B.; Riquet, J., 2018. Diversité des productions porcines en France. *Innovations Agronomiques*, 68: 151-170.

Dransfield, E., 1994. Tenderness of meat, poultry and fish. In: Pearson, A.M.; Dutson, T.R., eds. *Quality Attributes and their Measurement in Meat, Poultry and Fish Products (Advances in Meat Research, vol. 9)*. Boston, MA: Springer, 289-315. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-2167-9_11

Dransfield, E.; Ngapo, T.M.; Nielsen, N.A.; Bredahl, L.; Sjoden, P.O.; Magnusson, M.; Campo, M.M.; Nute, G.R., 2005. Consumer choice and suggested price for pork as influenced by its appearance, taste and information concerning country of origin and organic pig production. *Meat Science*, 69 (1): 61-70. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.06.006

Dreve, V.; Calin, I.; Bazga, B., 2016. Analysis on the evolution of romanian sheep and goat sector after EU accession. *Scientific Papers-Series D-Animal Science*, 59: 184-188.

Du, M.; Ahn, D.U., 2002. Effect of dietary conjugated linoleic acid on the growth rate of live birds and on the abdominal fat content and quality of broiler meat. *Poultry Science*, 81 (3): 428-433. http://dx.doi.org/10.1093/ps/81.3.428

du Plessis, H.J.; du Rand, G.E., 2012. The significance of traceability in consumer decision making towards Karoo lamb. *Food Research International*, 47 (2): 210-217. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.029

Dubroeucq, H.; Martin, B.; Ferlay, A.; Pradel, P.H.; Verdier-Metz, I.; Chilliard, Y.; Agabriel, J.; Coulon, J.B., 2002. L'alimentation des vaches est susceptible de modifier les caractéristiques sensorielles du lait. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 351-354.

Duckett, S.K.; Neel, J.P.S.; Fontenot, J.P.; Clapham, W.M., 2009. Effects of winter stocker growth rate and finishing system on: III. Tissue proximate, fatty acid, vitamin, and cholesterol content. *Journal of Animal Science*, 87 (9): 2961-2970. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2009-1850

Duckett, S.K.; Snowder, G.D.; Cockett, N.E., 2000. Effect of the callipyge gene on muscle growth, calpastatin activity, and tenderness of three muscles across the growth curve. *Journal of Animal Science*, 78 (11): 2836-2841.

Ducrot, C.; Fric, D.; Lalmanach, A.C.; Monnet, V.; Sanders, P.; Schouler, C., 2017. Prospects for therapeutic alternatives to antimicrobials on farms. *Inra Productions Animales*, 30 (1): 77-87.

Dufumier, A., 2018. Vers une grande AOP Camembert. *Revue de l'industrie agro-alimentaire*, 802: 54.

Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p.

Dunn, A.A.; Tolland, E.L.C.; Kilpatrick, D.J.; Gault, N.F.S., 1993. Effect of postmortem temperature on chicken m-pectoralis-major - isometric tension and ph profiles. *British Poultry Science*, 34 (4): 677-688. http://dx.doi.org/10.1080/00071669308417626

Dunne, P.G.; Monahan, F.J.; Moloney, A.P., 2011. Current perspectives on the darker beef often reported from extensively-managed cattle: Does physical activity play a significant role? *Livestock Science*, 142 (1-3): 1-22. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2011.06.018

Dunne, P.G.; Monahan, F.J.; O'Mara, F.P.; Moloney, A.P., 2009. Colour of bovine subcutaneous adipose tissue: A review of contributory factors, associations with carcass and meat quality and its potential utility in authentication of dietary history. *Meat Science*, 81 (1): 28-45. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.06.013

Dupont-Nivet, M.; Bugeon, J.; Le Boucher, R.; Paboeuf, G.; Le Calvez, J.M.; Goardon, L.; Labbe, L.; Vandeputte, M.; Quillet, E.; Lefevre, F., 2012. Genetic parameters of rainbow trout flesh texture. *European Aquaculture Society*. Pragues: September 1-5, 2012. https://www.aquaeas.eu/component/content/article/195

Dupont, D.; Boutrou, R.; Menard, O.; Jardin, J.; Tanguy, G.; Schuck, P.; Haab, B.B.; Leonil, J., 2010a. Heat Treatment of Milk During Powder Manufacture Increases Casein Resistance to Simulated Infant Digestion. *Food Digestion*, 1 (1): 28-39. http://dx.doi.org/10.1007/s13228-010-0003-0

Dupont, D.; Mandalari, G.; Molle, D.; Jardin, J.; Rolet-Repecaud, O.; Duboz, G.; Leonil, J.; Mills, C.E.N.; Mackie, A.R., 2010b. Food processing increases casein resistance to simulated infant digestion. *Molecular Nutrition & Food Research*, 54 (11): 1677-1689. http://dx.doi.org/10.1002/mnfr.200900582

Dupuy, C.; Morlot, C.; Gilot-Fromont, E.; Mas, M.; Grandmontagne, C.; Gilli-Dunoyer, P.; Gay, E.; Callait-Cardinal, M.P., 2014. Prevalence of Taenia saginata cysticercosis in French cattle in 2010. *Veterinary Parasitology*, 203 (1-2): 65-72. http://dx.doi.org/10.1016/j.vetpar.2014.02.054

Duque, B.; Daviaud, S.; Guillou, S.; Haddad, N.; Membre, J.M., 2018. Quantification of Campylobacter jejuni contamination on chicken carcasses in France. *Food Research International*, 106: 1077-1085. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.017

Duran, A.; Erdemli, U.; Karakaya, M.; Yilmaz, M.T., 2008. Effects of slaughter methods on physical, biochemical and microbiological quality of rainbow trout Oncorhynchus mykiss and mirror carp Cyprinus carpio filleted in pre-, in- or post-rigor periods. *Fisheries Science*, 74 (5): 1146-1156. http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-2906.2008.01634.x

Durand, D.; Gatellier, P.; Parafita, E., 2010. Stabilité oxydative et qualités des viandes. In: Bauchart, D.; Picard, B., eds. *Muscle et viande de ruminant*. Editions Quae, 183-196.

Duret, S.; Guillier, L.; Hoang, H.M.; Flick, D.; Laguerre, O., 2014. Identification of the significant factors in food safety using global sensitivity analysis and the accept-and-reject algorithm: application to the cold chain of ham. *International Journal of Food Microbiology*, 180: 39-48. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.04.009

Duret, S.; Hoang, H.M.; Derens-Bertheau, E.; Delahaye, A.; Laguerre, O.; Guillier, L., 2019. Combining Quantitative Risk Assessment of Human Health, Food Waste, and Energy Consumption: The Next Step in the Development of the Food Cold Chain? *Risk Analysis*, 39 (4): 906-925. http://dx.doi.org/10.1111/risa.13199

Duriot, B.; Pradel, P.; Nozière, P.; Troquier, O.; Martin, B.; Cirie, C.; Graulet, B., 2010. Couleur et teneurs en caroténoïdes et vitamine A du plasma et du lait chez la vache au cours de la lactation. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, p. 400.

Duru, M.; Bastien, D.; Froidmont, E.; Graulet, B.; Gruffat, D., 2017a. How products from grass-fed cattle contribute to nutritient intake and consumer health. *Fourrages*, 230: 131-140.

Duru, M.; Donnars, C.; Rychawy, J.; Therond, O.; Dumont, B., 2017b. The "barn": a conceptual framework for understanding the services provided by livestock in a territory. *Inra Productions Animales*, 30 (4): 273-284.

Duru, M.; Magrini, M.B., 2016. Can we balance our dietary intake of polyunsaturated fats by consuming products from grass-fed livestock? *Fourrages*, (228): 301-312.

Dutilh, C.E.; Groger, W., 1981. Improvement of product attributes of mayonnaise by enzymic-hydrolysis of egg-yolk with phospholipase-A2. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32 (5): 451-458. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2740320505

Dutot, S.; Durand, G.; Gaudru, M.L.; Martin, B.; Pomiès, D.; Hulin, S.; Marnet, P.G., 2011. La monotraite chez les éleveurs caprins fromagers: conséquences dans le cadre de l'AOP Rocamadour. *Rencontres autour des Recherches sur les ruminants*, 193-196.

Dutreuil, M.; Guinard-Flament, J.; Boutinaud, M.; Hurtaud, C., 2016. Effect of duration of milk accumulation in the udder on milk composition, especially on milk fat globule. *Journal of Dairy Science*, 99 (5): 3934-3944. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10002

Dvorak, P.; Suchy, P.; Strakova, E.; Dolezalova, J., 2010. Variation in Egg Yolk Colour in Different Systems of Rearing Laying Hens. *Acta Veterinaria Brno*, 79: S13-S19. http://dx.doi.org/10.2754/avb201079S9S013

Dyer-Hurdon, J.N.; Nnanna, I.A., 1993. Cholesterol content and functionality of plasma and granules fractionated from egg-yolk. *Journal of Food Science*, 58 (6): 1277-1281. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb06165.x

Edwards, S.A., 2005. Product quality attributes associated with outdoor pig production. *Livestock Production Science*, 94 (1-2): 5-14. http://dx.doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.11.028

Efsa, 2010. Results of the monitoring of non dioxin-like PCBs in food and feed. *Efsa Journal*, 8 (7): 1701. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2010.1701

Efsa, 2012. Update of the monitoring of levels of dioxins and PCBs in food and feed. *Efsa Journal*, 10 (7): 2832. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2832

Efsa; Efsa Ctr Dis Prevention Control, 2018. The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2017. *Efsa Journal*, 16 (12). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5500

Efsa Panel Biol Hazards BIOHAZ, 2016. Growth of spoilage bacteria during storage and transport of meat. *Efsa Journal*, 14 (6). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4523

Efsa Panel Biological Hazards; Koutsoumanis, K.; Allende, A.; Alvarez-Ordonez, A.; Bolton, D.; Bover-Cid, S.; Chemaly, M.; De Cesare, A.; Herman, L.; Hilbert, F.; Lindqvist, R.; Nauta, M.; Peixe, L.; Ru, G.; Simmons, M.; Skandamis, P.; Suffredini, E.; Dewulf, J.; Hald, T.; Michel, V.; Niskanen, T.; Ricci, A.; Snary, E.; Boelaert, F.; Messens, W.; Davies, R., 2019. Salmonella control in poultry flocks and its public health impact. *Efsa Journal*, 17 (2). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5596

Efsa Panel Contaminants Food Chain, 2018. Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food. *Efsa Journal*, 16 (11). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5333

Efsa Panel on Additives Products or Substances used in Animal Feed, 2014. Scientific Opinion on the safety and efficacy of synthetic astaxanthin as feed additive for salmon and trout, other fish, ornamental fish, crustaceans and ornamental birds. *Efsa Journal*, 12 (6): 3724. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3724

Efsa Panel on Additives Products or Substances used in Animal Feed, 2015. Safety and efficacy of ethoxyquin (6-ethoxy-1, 2-dihydro-2, 2, 4-trimethylquinoline) for all animal species. *Efsa Journal*, 13 (11): 4272. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4272

Efsa Panel on Biological Hazards, 2013. Scientific Opinion on the public health hazards to be covered by inspection of meat from sheep and goats. *Efsa Journal*, 11 (6): 3265. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3265

Efsa Panel on Biological Hazards, 2014. Scientific Opinion on the public health risks related to the maintenance of the cold chain during storage and transport of meat. Part 1 (meat of domestic ungulates). *Efsa Journal*, 12 (3): 3601. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3601

Egbert, W.R.; Huffman, D.L.; Chen, C.M.; Dylewski, D.P., 1991. Development of low-fat ground-beef. *Food Technology*, 45 (6): 64-&.

Einen, O.; Morkore, T.; Rora, A.M.B.; Thomassen, M.S., 1999. Feed ration prior to slaughter - a potential tool for managing product quality of Atlantic salmon (Salmo salar). *Aquaculture*, 178 (1-2): 149-169. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(99)00126-x

Einen, O.; Skrede, G., 1998. Quality characteristics in raw and smoked fillets of Atlantic salmon, Salmo salar, fed high-energy diets. *Aquaculture Nutrition*, 4 (2): 99-108. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2095.1998.00053.x

Einen, O.; Waagan, B.; Thomassen, M.S., 1998. Starvation prior to slaughter in Atlantic salmon (Salmo salar) - I. Effects on weight loss, body shape, slaughter- and fillet-yield, proximate and fatty acid composition. *Aquaculture*, 166 (1-2): 85-104. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(98)00279-8

El-Magoli, S.B.; Larola, S.; Hansen, P.M.T., 1995. Ultrastructure of low-fat ground beef patties with added whey protein concentrate. *Food Hydrocolloids*, 9 (4): 291-306. http://dx.doi.org/10.1016/s0268-005x(09)80260-9

Ellies-Oury, M.-P.; Hocquette, J.-F.; Chriki, S.; Conanec, A.; Farmer, L.; Chavent, M.; Saracco, J., 2020. Various Statistical Approaches to Assess and Predict Carcass and Meat Quality Traits. *Foods*, 9 (4): 525. http://dx.doi.org/10.3390/foods9040525

Ellies-Oury, M.P.; Cantalapiedra-Hijar, G.; Durand, D.; Gruffat, D.; Listrat, A.; Micol, D.; Ortigues-Marty, I.; Hocquette, J.F.; Chavent, M.; Saracco, J.; Picard, B., 2016. An innovative approach combining Animal Performances, nutritional value and sensory quality of meat. *Meat Science*, 122: 163-172. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.08.004

Elmore, J.S.; Cooper, S.L.; Enser, M.; Donald, S.M.A.; Sinclair, L.A.; Wilkinson, R.G.; Wood, J.D., 2005. Dietary manipulation of fatty acid composition in lamb meat and its effect on the volatile aroma compounds of grilled lamb. *Meat Science*, 69 (2): 233-242. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.07.002

Englmaierova, M.; Tumova, E.; Charvatova, V.; Skrivan, M., 2014. Effects of laying hens housing system on laying performance, egg quality characteristics, and egg microbial contamination. *Czech Journal of Animal Science*, 59 (8): 345-352. http://dx.doi.org/10.17221/7585-cjas

Engvall, A., 2002. May Organically Farmed Animals Pose a Risk for Campylobacter Infections in Humans? *Acta Veterinaria Scandinavica*, 43: 85-87.

Ennifar, M., 2011. Prix et marges dans la filière viande bovine : objectifs et méthodes. *AgroSup Dijon*.

Enser, M.; Hallett, K.G.; Hewett, B.; Fursey, G.A.J.; Wood, J.D.; Harrington, G., 1998. Fatty acid content and composition of UK beef and lamb muscle in relation to production system and implications for human nutrition. *Meat Science*, 49 (3): 329-341. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00144-7

Erasmus, S.W.; Muller, M.; Hoffman, L.C., 2017. Authentic sheep meat in the European Union: Factors influencing and validating its unique meat quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97 (7): 1979-1996. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.8180

Erikson, U.; Misimi, E., 2008. Atlantic salmon skin and fillet color changes effected by perimortem handling stress, rigor mortis, and ice storage. *Journal of Food Science*, 73 (2): C50-C59. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00617.x

Erikson, U.; Misimi, E.; Fismen, B., 2010. Bleeding of anaesthetized and exhausted Atlantic salmon: body cavity inspection and residual blood in pre-rigor and smoked fillets as determined by various analytical methods. *Aquaculture Research*, 41 (4): 496-510. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02338.x

Erikson, U.; Shabani, F.; Beli, E.; Muji, S.; Rexhepi, A., 2018. The impacts of perimortem stress and gutting on quality index and colour of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) during ice storage: a commercial case study. *European Food Research and Technology*, 244 (2): 197-206. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-017-2944-9

Esenbuga, N.; Yanar, M.; Dayioglu, H., 2001. Physical, chemical and organoleptic properties of ram lamb carcasses from four fat-tailed genotypes. *Small Ruminant Research*, 39 (2): 99-105. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-4488(00)00187-5

Esmer, O.K.; Irkin, R.; Degirmencioglu, N.; Degirmencioglu, A., 2011. The effects of modified atmosphere gas composition on microbiological criteria, color and oxidation values of minced beef meat. *Meat Science*, 88 (2): 221-226. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.021

Espe, M.; Ruohonen, K.; Bjornevik, M.; Froyland, L.; Nortvedt, R.; Kiessling, A., 2004. Interactions between ice storage time, collagen composition, gaping and textural properties in farmed salmon muscle harvested at different times of the year. *Aquaculture*, 240 (1-4): 489-504. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.04.023

Esposito, G.; Masucci, F.; Napolitano, F.; Braghieri, A.; Romano, R.; Manzo, N.; Di Francia, A., 2014. Fatty acid and sensory profiles of Caciocavallo cheese as affected by management system. *Journal of Dairy Science*, 97 (4): 1918-1928. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7292

Evanuarini, H.; Purnomo, H., 2011. Physical and organoleptic quality of chicken nuggets fried at different temperature and time. *Journal of Agricultural and Food Technology*, 11 (8): 133-136.

Experton, C.; Bellet, V.; Gac, A.; Morin, E.; Degloire, J.F.; Laignel, G.; Benoit, M., 2018. Double enjeu dans les systèmes ovins biologiques : reforcer l'autonomie alimentaire et créer de la valeur ajoutée au sein de la filière (Agneaux Bio). *Innovations Agronomiques*, 63: 337-356.

Falowo, A.B.; Fayemi, P.O.; Muchenje, V., 2014. Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review. *Food Research International*, 64: 171-181. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.022

Fanatico, A.C.; Pillai, P.B.; Cavitt, L.C.; Emmert, J.L.; Meullenet, J.F.; Owens, C.M., 2006. Evaluation of slower-growing broiler genotypes grown with and without outdoor access: Sensory attributes. *Poultry Science*, 85 (2): 337-343. http://dx.doi.org/10.1093/ps/85.2.337

Fanatico, A.C.; Pillai, P.B.; Emmert, J.L.; Gbur, E.E.; Meullenet, J.F.; Owens, C.M., 2007. Sensory attributes of slow- and fast-growing chicken genotypes raised indoors or with outdoor access. *Poultry Science*, 86 (11): 2441-2449. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2007-00092

FAO, 2013. *Statistics and Information Branch of the Fisheries and Aquaculture Department. 2013. yearbook. Fishery and Aquaculture Statistics. 2011*. Rome: FAO, 76 p.

FAO, 2016. *La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2016. Contribuer à la sécurité alimentaire et à la nutrition de tous*. Rome: FAO, 224 p.

Farmer, L.J.; Perry, G.C.; Lewis, P.D.; Nute, G.R.; Piggott, J.R.; Patterson, R.L.S., 1997. Responses of two genotypes of chicken to the diets and stocking densities of conventional UK and Label Rouge production systems .2. Sensory attributes. *Meat Science*, 47 (1-2): 77-93. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00040-5

Farouk, M.M.; Lane, G.; Tavendale, M.; Schreurs, N.M.; McNabb, W., 2007. Pastoral flavour in lamb: high ouliers x sensitive consumers, the practical issue. *53. International Congress of Meat Science and Technology*, 591-592.

Farrant, L.; Labau, M.P.; Padilla, M.; Deneufbourg, C.; Fortun-Lamothe, L.; Penavayre, S.; Besnier, A., 2018. Protected Geographical Indication "South West duck foie gras" sector: sustainability assessment. *Inra Productions Animales*, 31 (2): 131-144. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.2.2319

Farruggia, A.; Martin, B.; Baumont, R.; Prache, S.; Doreau, M.; Hoste, H.; Durand, D., 2008. Is floristic diversity of permanent pastures important for ruminants and animal products? *Productions Animales*, 21 (2): 181-199.

Farruggia, A.; Pomies, D.; Coppa, M.; Ferlay, A.; Verdier-Metz, I.; Le Morvan, A.; Bethier, A.; Pompanon, F.; Troquier, O.; Martin, B., 2014. Animal performances, pasture biodiversity and dairy product quality: How it works in contrasted mountain grazing systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 185: 231-244. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.001

Fauconneau, B.; Faure, A.; Haffray, P.; Médale, F.; Vallet, J.L., 1996. Amélioration des rendements de carcasse et maîtrise de l'état d'engraissement des poissons d'élevage. *La Pisciculture Française*, 124: 25-29.

Faulkner, H.; O'Callaghan, T.F.; McAuliffe, S.; Hennessy, D.; Stanton, C.; O'Sullivan, M.G.; Kerry, J.P.; Kilcawley, K.N., 2018. Effect of different forage types on the volatile and sensory properties of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 101 (2): 1034-1047. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2017-13141

Faustman, C.; Cassens, R.G.; Schaefer, D.M.; Buege, D.R.; Williams, S.N.; Scheller, K.K., 1989. Improvement of pigment and lipid stability in Holstein steer beef by dietary supplementation with vitamin E. *Journal of Food Science*, 54 (4): 858-862. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1989.tb07899.x

Faustman, C.; Chan, W.K.M.; Schaefer, D.M.; Havens, A., 1998. Beef color update: The role for vitamin E. *Journal of Animal Science*, 76 (4): 1019-1026.

Faustman, C.; Suman, S.P., 2017. Chapter 11 - The Eating Quality of Meat: I–Color. In: Toldra´, F., ed. *Lawrie´s Meat Science (Eighth Edition)*. Woodhead Publishing, 329-356. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100694-8.00011-X

Favier, J.C.; Ireland-Ripert, J.; Toque, C.; Feinberg, M., 1995. *Répertoire général des aliments : Table de composition. Composition tables*. INRA Editions.

Fedele, V.; Rubino, R.; Claps, S.; Sepe, L.; Morone, G., 2005. Seasonal evolution of volatile compounds content and aromatic profile in milk and cheese from grazing goat. *Small Ruminant Research*, 59 (2-3): 273-279. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.05.013

Fekadu, B.; Soryal, K.; Zeng, S.; Van Hekken, D.; Bah, B.; Villaquiran, M., 2005. Changes in goat milk composition during lactation and their effect on yield and quality of hard and semi-hard cheeses. *Small Ruminant Research*, 59 (1): 55-63. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2004.12.003

Ferguson, D.M.; Gerrard, D.E., 2014. Regulation of post-mortem glycolysis in ruminant muscle. *Animal Production Science*, 54 (4): 464-481. http://dx.doi.org/10.1071/an13088

Ferlay, A.; Bernard, L.; Meynadier, A.; Malpuech-Brugere, C., 2017. Production of trans and conjugated fatty acids in dairy ruminants and their putative effects on human health: A review. *Biochimie*, 141: 107-120. http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2017.08.006

Ferlay, A.; Doreau, M.; Martin, C.; Chilliard, Y., 2013a. Effects of incremental amounts of extruded linseed on the milk fatty acid composition of dairy cows receiving hay or corn silage. *Journal of Dairy Science*, 96 (10): 6577-6595. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6562

Ferlay, A.; Graulet, B.; Chilliard, Y., 2013b. Feeding control of fatty acid composition and vitamin content in the cow milk. *Inra Productions Animales*, 26 (2): 177-192.

Ferlay, A.; Martin, B.; Lerch, S.; Gobert, M.; Pradel, P.; Chilliard, Y., 2010. Effects of supplementation of maize silage diets with extruded linseed, vitamin E and plant extracts rich in polyphenols, and morning v. evening milking on milk fatty acid profiles in Holstein and Montbeliarde cows. *Animal*, 4 (4): 627-640. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109991224

Ferlay, A.; Martin, B.; Pradel, P.; Coulon, J.B.; Chilliard, Y., 2006. Influence of grass-based diets on milk fatty acid composition and milk lipolytic system in tarentaise and Montbeliarde cow breeds. *Journal of Dairy Science*, 89 (10): 4026-4041. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72446-8

Fernandez, X.; Monin, G.; Talmant, A.; Mourot, J.; Lebret, B., 1999. Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat - 2. Consumer acceptability of m. longissimus lumborum. *Meat Science*, 53 (1): 67-72. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(99)00038-8

Fernandez, X.; Sante, V.; Baeza, E.; Lebihan-Duval, E.; Berri, C.; Remignon, H.; Babile, R.; Le Pottier, G.; Astruc, T., 2002. Effects of the rate of muscle post mortem pH fall on the technological quality of turkey meat. *British Poultry Science*, 43 (2): 245-252. http://dx.doi.org/10.1080/00071660120121463

Feurer, C.; Le Roux, A.; Rossel, R.; Barnaud, E.; Dumarest, M.; Garry, P.; Pavio, N., 2018. High load of hepatitis E viral RNA in pork livers but absence in pork muscle at French slaughterhouses. *International Journal of Food Microbiology*, 264: 25-30. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.013

Fichtali, J.; Charter, E.A.; Lo, K.V.; Nakai, S., 1994. A new process for IgY isolation from industrially separated egg yolk including automation and scale-up. In: Sim, J.; Nakaï, S., eds. *Egg Uses and Processing Technologies- New Developments*. Oxon (UK): CAB International, 213-157.

Filières avicoles, 2019. Du code 3 à la volière *Filières avicoles*, 827 (février).

Filipiak-Florkiewicz, A.; Deren, K.; Florkiewicz, A.; Topolska, K.; Juszczak, L.; Cieslik, E., 2017. Processing and products:The quality of eggs (organic and nutraceutical vs. conventional) and their technological properties. *Poultry Science*, 96 (7): 2480-2490. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew488

Finco, A.; Bentivoglio, D.; Bucci, G., 2017. A label for mountain products? Let's turn it over to producers and retailers. *Quality-Access to Success*, 18: 198-205.

Fisher, A.V.; Enser, M.; Richardson, R.I.; Wood, J.D.; Nute, G.R.; Kurt, E.; Sinclair, L.A.; Wilkinson, R.G., 2000. Fatty acid composition and eating quality of lamb types derived from four diverse breed x production systems. *Meat Science*, 55 (2): 141-147. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(99)00136-9

Flores, J., 1997. Mediterranean vs northern European meat products. Processing technologies and main differences. *Food Chemistry*, 59 (4): 505-510. http://dx.doi.org/10.1016/s0308-8146(97)00011-3

FNAB, 2018. *Elever des porcs en Bio*. Paris: Fédération Nationale de l'Agriculture Biologique, 34 p. www.produire-bio.fr

Folkestad, A.; Rorvik, K.A.; Kolstad, K.; Morkore, T., 2008. Growth rates of individual farmed Atlantic salmon Salmo salar L. influence the texture of raw and smoked fillets. *Aquaculture Research*, 39 (3): 329-332. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01862.x

Font-i-Furnols, M., 2012. Consumer studies on sensory acceptability of boar taint: A review. *Meat Science*, 92 (4): 319-329. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.05.009

Font-i-Furnols, M.; Claret, A.; Guerrero, L.; Romero, A.; Pearce, M.; Gispert, M., 2015. Effet du sexe du porc sur les caractéristiques organoleptiques des muscles Semimembranosus et Biceps femoris du jambon sec. *47. Journées de la Recherche Porcine en France*, 53-54. http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2015/genetique_qualite/12Qp.pdf

Font-i-Furnols, M.; Guerrero, L., 2014. Consumer preference, behavior and perception about meat and meat products: An overview. *Meat Science*, 98 (3): 361-371. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.025

Font-i-Furnols, M.; Realini, C.; Montossi, F.; Sanudo, C.; Campo, M.M.; Oliver, M.A.; Nute, G.R.; Guerrero, L., 2011. Consumer's purchasing intention for lamb meat affected by country of origin, feeding system and meat price: A conjoint study in Spain, France and United Kingdom. *Food Quality and Preference*, 22 (5): 443-451. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.02.007

Font-i-Furnols, M.; Realini, C.E.; Guerrero, L.; Oliver, M.A.; Sanudo, C.; Campo, M.M.; Nutec, G.R.; Caneque, V.; Alvarez, I.; San Julian, R.; Luzardo, S.; Brito, G.; Montossi, F., 2009. Acceptability of lamb fed on pasture, concentrate or combinations of both systems by European consumers. *Meat Science*, 81 (1): 196-202. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.07.019

Font-i-Furnols, M.; San Julian, R.; Guerrero, L.; Sanudo, C.; Campo, M.M.; Olleta, J.L.; Oliver, M.A.; Caneque, V.; Alvarez, I.; Diaz, M.T.; Branscheid, W.; Wicke, M.; Nute, G.R.; Montossi, F., 2006. Acceptability of lamb meat from different producing systems and ageing time to German, Spanish and British consumers. *Meat Science*, 72 (3): 545-554. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.09.002

Fontagné-Dicharry, S.; Médale, F., 2010. Les lipides des poissons d'aquaculture et leurs facteurs de variation. *OCL*, 17 (4): 209-213.

Fosse, J., 2008. *Valeur informative d'indicateurs ante et post-mortem pour la détection des dangers biologiques pour le consommateur de viande porcine*. Doctorat (Biologie). Université de Rennes 1, Rennes. 299 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00437076/document

Fosse, J.; Seegers, H.; Magras, C., 2008. Foodborne zoonoses due to meat: a quantitative approach for a comparative risk assessment applied to pig slaughtering in Europe. *Veterinary Research*, 39 (1): 16. http://dx.doi.org/10.1051/vetres:2007039

Fosse, J.; Seegers, H.; Magras, C., 2009. Prevalence and Risk Factors for Bacterial Food-Borne Zoonotic Hazards in Slaughter Pigs: A Review. *Zoonoses and Public Health*, 56 (8): 429-454. http://dx.doi.org/10.1111/j.1863-2378.2008.01185.x

Fournier, A.; Feidt, C.; Travel, A.; Le Bizec, B.; Venisseau, A.; Marchand, P.; Jondreville, C., 2012. Relative bioavailability to laying hens of indicator polychlorobiphenyls present in soil. *Chemosphere*, 88 (3): 300-306. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.02.041

Fox, P.F.; McSweeney, P.L.H.; Cogan, T.M.; Guinee, T.P., 2000. *Fundamentals of Cheese Science*. Springer Science & Business Media, 587 p.

FranceAgriMer, 2010. *Les cahiers FranceAgriMer 2009, Chiffres-clés Elevage*: FranceAgriMer, 59-70.

FranceAgriMer, 2017a. *Consommation des produits de la pêche et de l'aquaculture 2016*, 125 p.

FranceAgriMer, 2017b. *Les filières pêche et aquaculture en France : production, entreprises, échanges, consommation*. Paris: FranceAgriMar (*Chiffres clés de FranceAgriMer*), 36 p.

FranceAgriMer, 2017c. *Les produits carnés : viande bovine. données statistiques 2016 France / Union européenne / Monde*. Paris: FranceAgriMer (Données et bilans de FranceAgriMer), 50 p. https://www.franceagrimer.fr/Bibliotheque/INFORMATIONS-ECONOMIQUES/VIANDES/VIANDES-ROUGES/CHIFFRES-ET-BILANS/2017/Donnees-statistiques-2016-Les-produits-carnes-viande-bovine

FranceAgriMer, 2018. *Les fiches de France Agrimer – Elevage. OEufs de consommation et ovoproduits*. Montreuil: France AGRIMER, 2 p.

FranceAgriMer, 2019a. *Consommation des produits carnés en 2018*. Paris: FranceAgriMer (Données et bilan). https://www.franceagrimer.fr/content/download/62489/document/STA-VIA-Consommation%20des%20produits%20carn%C3%A9s%20en%202018.pdf

FranceAgriMer, 2019b. *Les marchés des produits laitiers, carnés et avicoles. Bilan 2018, perspectives 2019*. Paris: FranceAgriMer, 150 p. https://www.franceagrimer.fr/content/download/59574/document/BIL-VIA-LAI-Bilan2018-Perspectives2019.pdf

Franczyk-Zarow, M.; Koronowicz, A.; Szymczyk, B.; Biezanowska-Kopec, R.; Leszczynska, T., 2017. Effect of dietary conjugated linoleic acid (CLA) and thermal processing on fatty acid composition of enriched chicken meat. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 26 (3): 236-246. http://dx.doi.org/10.22358/jafs/76184/2017

Frank, D.C.; Geesink, G.; Alyarenga, T.I.R.C.; Polkinghorne, R.; Stark, J.; Lee, M.; Warner, R., 2017. Impact of high oxygen and vacuum retail ready packaging formats on lamb loin and topside eating quality. *Meat Science*, 123: 126-133. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.09.010

Franke, K.; Kiessling, M., 2002. Influence of spray drying conditions on functionality of dried whole egg. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82 (15): 1837-1841. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1269

Franke, K.; Meyer, U.; Wagner, H.; Flachowsky, G., 2009. Influence of various iodine supplementation levels and two different iodine species on the iodine content of the milk of cows fed rapeseed meal or distillers dried grains with solubles as the protein source. *Journal of Dairy Science*, 92 (9): 4514-4523. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2027

Fraslin, C.; Dupont-Nivet, M.; Haffray, P.; Bestin, A.; Vandeputte, M., 2018. How to genetically increase fillet yield in fish: New insights from simulations based on field data. *Aquaculture*, 486: 175-183. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.012

Frattini, S.; Nicoloso, L.; Coizet, B.; Chessa, S.; Rapetti, L.; Pagnacco, G.; Crepaldi, P., 2014. The unusual genetic trend of alpha(s1)-casein in Alpine and Saanen breeds. *Journal of Dairy Science*, 97 (12): 7975-7979. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-7780

Fraysse, J.; Lagriffoul, G.; Bocquier, E.; Barillet, E., 1996. Brebis laitières : impact de la structure du troupeau et autres facteurs d'élevage sur la composition chimique du lait livré. *Inra Productions Animales*, 9 (3): 201-210. https://www6.inra.fr/productions-animales_eng/content/download/4750/45361/version/1/file/Prod_Anim_1996_9_3_04.pdf

Fretin, M.; Martin, B.; Rifa, E.; Isabelle, V.M.; Pomies, D.; Ferlay, A.; Montel, M.C.; Delbes, C., 2018. Bacterial community assembly from cow teat skin to ripened cheeses is influenced by grazing systems. *Scientific Reports*, 8. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-18447-y

Friesen, E.N.; Skura, B.J.; Ikonomou, M.G.; Oterhals, A.; Higgs, D.A., 2015. Influence of terrestrial lipid and protein sources and activated carbon-treated fish oil on levels of persistent organic pollutants and fatty acids in the flesh of Atlantic salmon. *Aquaculture Research*, 46 (2): 358-381. http://dx.doi.org/10.1111/are.12182

Frigg, M.; Prabucki, A.L.; Ruhdel, E.U., 1990. Effect of dietary vitamin-E levels on oxidative stability of trout fillets. *Aquaculture*, 84 (2): 145-158. http://dx.doi.org/10.1016/0044-8486(90)90344-m

Fujii, J.; Otsu, K.; Zorzato, F.; Deleon, S.; Khanna, V.K.; Weiler, J.E.; Obrien, P.J.; Maclennan, D.H., 1991. Identification of a mutation in porcine ryanodine receptor associated with malignant hyperthermia. *Science*, 253 (5018): 448-451. http://dx.doi.org/10.1126/science.1862346

Fursik, O.; Strashynskiy, I.; Pasichnyi, V.; Kochubei-Lytvynenko, O., 2018. Quality assessment of proteins in cooked sausages with food compositions. *Journal of Food Science and Technology-Ukraine*, 12 (2): 80-88. http://dx.doi.org/10.15673/fst.v12i2.936

Gagaoua, M.; Micol, D.; Picard, B.; Terlouw, C.E.M.; Moloney, A.P.; Juin, H.; Meteau, K.; Scollan, N.; Richardson, I.; Hocquette, J.F., 2016. Inter-laboratory assessment by trained panelists from France and the United Kingdom of beef cooked at two different end-point temperatures. *Meat Science*, 122: 90-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.07.026

Gagnaire, V.; Molle, D.; Herrouin, M.; Leonil, J., 2001. Peptides identified during emmental cheese ripening: Origin and proteolytic systems involved. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49 (9): 4402-4413. http://dx.doi.org/10.1021/jf000895z

Gaignon, P.; Gele, M.; Hurtaud, C.; Boudon, A., 2018. Characterization of the nongenetic causes of variation in the calcium content of bovine milk on French farms. *Journal of Dairy Science*, 101 (5): 4554-4569. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2017-14043

Gaillot, B.; Lavarde, P.k.; Balny, P.; Delcour, D.; Guillet, M., 2015. *Les épandages sur terres agricoles des matières fertilisantes d'origine résiduaire. Mission prospective sur les modalités d'encadrement et de suivi réglementaire*. Paris: Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt/CGAAER/CGEDD, (Rapport CGAAER n° 14074 - CGEDD n°009801-01), 180 p. https://agriculture.gouv.fr/telecharger/78684?token=4531aa0bc3544e3029b8a76123fc49b4

Galli, B.D.; Martin, J.G.P.; da Silva, P.P.M.; Porto, E.; Spoto, M.H.F., 2016. Sensory quality of Camembert-type cheese: Relationship between starter cultures and ripening molds. *International Journal of Food Microbiology*, 234: 71-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.06.025

Gallina Toschi, T.; Bendini, A.; Barbieri, S.; Valli, E.; Cezanne, M.L.; Buchecker, K.; Canavari, M., 2012. Organic and conventional nonflavored yogurts from the Italian market: study on sensory profiles and consumer acceptability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (14): 2788-2795. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5666

Galvin, K.; Morrissey, P.A.; Buckley, D.J., 1998. Cholesterol oxides in processed chicken muscle as influenced by dietary alpha-tocopherol supplementation. *Meat Science*, 48 (1-2): 1-9. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00069-7

Gandemer, G., 1999. Lipids and meat quality: lipolysis, oxidation, Maillard reaction and flavour. *Sciences Des Aliments*, 19 (3-4): 439-458.

Gandemer, G., 2002. Lipids in muscles and adipose tissues, changes during processing and sensory properties of meat products. *Meat Science*, 62 (3): 309-321. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00128-6

Gandemer, G.; Chantelot, F.; Duchene, C.; Durand, D.; Bauchart, D., 2008. The nutritional quality of meat and offals differed deeply in cereal (inddor) and grass (outdoor) fed fattening lambs. *Proceedings of the International Con Meat Sci Technol - 2B. Food safety and human nutrition challenges*. Cape Town, South Africa, 10-15 August 2008, 4 p. http://icomst-proceedings.helsinki.fi/papers/2008_02_32.pdf

Gandemer, G.; Viau, M.; Maillard, N.; Lessire, M.; Juin, H., 1999. Lipides alimentaires et qualité de la viande de poulet : influence de l'apport de quantité croissante d'acide linolénique (18:3 n-3). *3. Journées de la Recherche Avicole*. St-Malo, 403-406.

Garber, A.F.; Amini, F.; Gezan, S.A.; Swift, B.D.; Hodkinson, S.E.; Nickerson, J.; Bridger, C.J., 2019. Genetic and phenotypic evaluation of harvest traits from a comprehensive commercial Atlantic salmon, Salmo salar L., broodstock program. *Aquaculture*, 503: 242-253. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.01.001

Garcia-Celdran, M.; Ramis, G.; Manchado, M.; Estevez, A.; Navarro, A.; Armero, E., 2015. Estimates of heritabilities and genetic correlations of raw flesh quality traits in a reared gilthead sea bream (Sparus aurata L.) population sourced from broodstocks along the Spanish coasts. *Aquaculture*, 446: 181-186. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.04.030

Garcia-Fernandez, M.; Gutierrez-Gil, B.; Garcia-Gamez, E.; Sanchez, J.P.; Arranz, J.J., 2010. Detection of quantitative trait loci affecting the milk fatty acid profile on sheep chromosome 22: Role of the stearoyl-CoA desaturase gene in Spanish Churra sheep. *Journal of Dairy Science*, 93 (1): 348-357. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2490

Gardner, K.; Legako, J.F., 2018. Volatile flavor compounds vary by beef product type and degree of doneness. *Journal of Animal Science*, 96 (10): 4238-4250. http://dx.doi.org/10.1093/jas/sky287

Garnsworthy, P.C.; Feng, S.; Lock, A.L.; Royal, M.D., 2010. Short communication: Heritability of milk fatty acid composition and stearoyl-CoA desaturase indices in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 93 (4): 1743-1748. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2695

Gassi, J.Y.; Theve, M.; Beaucher, E.; Camier, B.; Maillard, M.B.; Rousseau, F.; Leboeuf-Schneider, L.; Lepage, E.; Gaucheron, F.; Lopez, C., 2012. Soft goats' cheese enriched with polyunsaturated fatty acids by dietary supplementation: manufacture, physicochemical and sensory characterisation. *Dairy Science & Technology*, 92 (5): 569-591. http://dx.doi.org/10.1007/s13594-012-0071-8

Gatellier, P.; Kondjoyan, A.; Portanguen, S.; Sante-Lhoutellier, V., 2010. Effect of cooking on protein oxidation in n-3 polyunsaturated fatty acids enriched beef. Implication on nutritional quality. *Meat Science*, 85 (4): 645-650. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.03.018

Gaucheron, F., 2005. The minerals of milk. *Reproduction Nutrition Development*, 45 (4): 473-483. http://dx.doi.org/10.1051/rnd:2005030

Gautron, J.; Guyot, N.; Brionne, A.; Réhault-Godbert, S., 2019. Bioactive egg minor proteins. In: Wu, J., ed. *Eggs as Functional Foods and Nutraceuticals for Human Health*. London, UK: Royal Society of Chemistry, 133-150.

Gautron, J.; Rehault-Godbert, S.; Nys, Y.; Mann, K.; Righetti, P.G., 2011. Use of high-throughput technology to identify new egg components. In: Nys, Y.; Bain, M.; VanImmerseel, F., eds. *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products, Vol 1: Egg Chemistry, Production and Consumption*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing in Food Science Technology and Nutrition, 213), 133-150.

Gelé, M.; Ferrand, M.; Miranda, G.; Ballot, N.; Bianchi, L.; Brunschwig, P.; Lecomte, C.; Martin, P.; Thomas, G.; Brochard, M., 2014a. Profils en acides gras et protéines du lait : détermination par spectrométrie moyen infrarouge, facteurs de variation et modèle de prévision en élevage. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 51-54. http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/Texte_1_Qualite_des_produits_M-Ferrand.pdf

Gele, M.; Minery, S.; Astruc, J.M.; Brunschwig, P.; Ferrand-Calmels, M.; Lagriffoul, G.; Larroque, H.; Legarto, J.; Leray, O.; Martin, P.; Miranda, G.; Palhiere, I.; Trossat, P.; Brochard, M., 2014. Large scale phenotyping and genotyping of milk fine composition in the cow, goat and ewe. *Inra Productions Animales*, 27 (4): 255-268.

Germain, K.; Brachet, M.; Juin, H.; Lamothe, E.; Roinsard, A., 2015. Le parcours pour volailles de chair : une ressource protéique à exploiter. *11. Journées de la Recherche Avicole et Palmidèdes à Foie Gras*. Tours, 1023-1028.

Geverink, N.A.; de Jong, I.C.; Lambooij, E.; Blokhuis, H.J.; Wiegant, V.M., 1999. Influence of housing conditions on responses of pigs to preslaughter treatment and consequences for meat quality. *Canadian Journal of Animal Science*, 79 (3): 285-291. http://dx.doi.org/10.4141/a98-108

Ghielmetti, G.; Trinchera, C. 1975. Process for the extraction and purification of lysozyme. Brevet.

Giaccone, D.; Revello-Chion, A.; Galassi, L.; Bianchi, P.; Battelli, G.; Coppa, M.; Tabacco, E.; Borreani, G., 2016. Effect of milk thermisation and farming system on cheese sensory profile and fatty acid composition. *International Dairy Journal*, 59: 10-19. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.02.047

Giambra, I.J.; Jager, S.; Erhardt, G., 2010. Isoelectric focusing reveals additional casein variants in German sheep breeds. *Small Ruminant Research*, 90 (1-3): 11-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.12.025

Gibis, M.; Weiss, J., 2013. Formation of Heterocyclic Amines in Salami and Ham Pizza Toppings During Baking of Frozen Pizza. *Journal of Food Science*, 78 (6): C832-C838. http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.12121

Gigaud, V.; Bordeau, T.; Chartrin, P.; Baeza, E.; Berri, C., 2011. Technological variability of chicken breast meat qualiy encountered in France according to the production system. *20. European Symposium on the Quality of Poultry Meat*. Leipzig. WPSA.

Gigaud, V.; Geffrard, A.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Travel, A.; Bordeau, T., 2007. Filets de poulet standard : Conditions environnementales ante-mortem (ramassage - transport - abattage) et qualité technologique. *Viandes & Produits carnés*, 26: 17-20.

Gigaud, V.; Sante-Lhoutellier, V.; Parafita, E.; Le Bihan-Duval, E.; Berri, C., 2010. Electrical or gas stunning: which consequences for the meat quality in three chicken genotypes? *13. European Poultry Conference (EPC 2010)*. Tours. French Branch of World's Poultry Science Association, p:277.

Gillis, J.-C.; Ayerbe, A., 2018. *Le Fromage*. Paris: Tec & Doc Lavoisier, 1001 p.

Gines, R.; Afonso, J.M.; Arguello, A.; Zamorano, M.J.; Lopez, J.L., 2004a. The effects of long-day photoperiod on growth, body composition and skin colour in immature gilthead sea bream (Sparus aurata L.). *Aquaculture Research*, 35 (13): 1207-1212. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01126.x

Gines, R.; Valdimarsdottir, T.; Sveinsdottir, K.; Thorarensen, H., 2004b. Effects of rearing temperature and strain on sensory characteristics, texture, colour and fat of Arctic charr (Salvelinus alpinus). *Food Quality and Preference*, 15 (2): 177-185. http://dx.doi.org/10.1016/s0950-3293(03)00056-9

Girad, J.P.; Culioli, J.; Denoyer, C.; Berdague, J.L.; Touraille, C., 1993. Comparison between 2 populations of 2 poultry species according to their fat-composition. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 57 (1): 9-15.

Girard, M.; Dohme-Meier, F.; Silacci, P.; Kragten, S.A.; Kreuzer, M.; Bee, G., 2016a. Forage legumes rich in condensed tannins may increase n-3 fatty acid levels and sensory quality of lamb meat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96 (6): 1923-1933. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7298

Girard, M.; Dohme-Meier, F.; Wechsler, D.; Goy, D.; Kreuzer, M.; Bee, G., 2016b. Ability of 3 tanniferous forage legumes to modify quality of milk and Gruyere-type cheese. *Journal of Dairy Science*, 99 (1): 205-220. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-9952

Gispert, M.; Font-i-Furnols, M.; Gil, M.; Velarde, A.; Diestre, A.; Carrion, D.; Sosnicki, A.A.; Plastow, G.S., 2007. Relationships between carcass quality parameters and genetic types. *Meat Science*, 77 (3): 397-404. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.006

Gkarane, V.; Allen, P.; Gravador, R.S.; Diskin, M.G.; Claffey, N.A.; Fahey, A.G.; Brunton, N.P.; Farmer, L.J.; Moloney, A.P.; Monahan, F.J., 2017. Effect of castration and age at slaughter on sensory perception of lamb meat. *Small Ruminant Research*, 157: 65-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrunres.2017.10.011

Gkarane, V.; Brunton, N.P.; Allen, P.; Gravador, R.S.; Claffey, N.A.; Diskin, M.G.; Fahey, A.G.; Farmer, L.J.; Moloney, A.P.; Alcalde, M.J.; Murphy, P.; Monahan, F.J., 2019. Effect of finishing diet and duration on the sensory quality and volatile profile of lamb meat. *Food Research International*, 115: 54-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.063

Glasser, F.; Doreau, M.; Maxin, G.; Baumont, R., 2013. Fat and fatty acid content and composition of forages: A meta-analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 185 (1-2): 19-34. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.06.010

Glasser, F.; Ferlay, A.; Chilliard, Y., 2008. Oilseed Lipid Supplements and Fatty Acid Composition of Cow Milk: A Meta-Analysis. *Journal of Dairy Science*, 91 (12): 4687-4703. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-0987

Gokce, R.; Akgun, A.A.; Ergezer, H.; Akcan, T., 2016. Effects of Different Batter Formulation on Some Quality Characteristics of Deep-Fat Fried Chicken Nuggets. *Tarim Bilimleri Dergisi-Journal of Agricultural Sciences*, 22 (3): 331-338.

Gokoglu, N., 2019. Novel natural food preservatives and applications in seafood preservation: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (5): 2068-2077. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.9416

Golge, O.; Kilincceker, O.; Koluman, A., 2018. Effects of different fibers on the quality of chicken meatballs. *Journal of Food Safety and Food Quality-Archiv Fur Lebensmittelhygiene*, 69 (6): 177-183. http://dx.doi.org/10.2376/0003-925x-69-177

Gomez-Guillen, M.C.; Montero, P.; Hurtado, O.; Borderias, A.J., 2000. Biological characteristics affect the quality of farmed Atlantic salmon and smoked muscle. *Journal of Food Science*, 65 (1): 53-60. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb15955.x

Gong, Y.; Parker, R.S.; Richards, M.P., 2010. Factors affecting lipid oxidation in breast and thigh muscle from chicken, turkey and duck. *Journal of Food Biochemistry*, 34 (4): 869-885. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4514.2010.00341.x

Gonzalez, C.B.; Ockerman, H.W., 2000. Dry-cured Mediterranean hams: Long process, slow changes and high quality: A review. *Journal of Muscle Foods*, 11 (1): 1-17. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4573.2000.tb00411.x

Grace, E.J.; MacFarlane, G.R., 2016. Assessment of the bioaccumulation of metals to chicken eggs from residential backyards. *Science of the Total Environment*, 563: 256-260. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.128

Graulet, B.; Cirie, C.; Martin, B., 2019. Contrasted effects of dietary extruded linseed supplementation on carotenoid and liposoluble vitamin status in lactating Holstein or Montbeliarde cows fed hay or corn silage. *Journal of Dairy Science*, 102 (7): 6210-6225. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2018-16138

Graulet, B.; Martin, B.; Agabriel, C.; Girard, C., 2013. Vitamins in milk. In: Park, Y.W.; Haenlein, G.F.; Ag, D.S., eds. *Milk and dairy products in human nutrition : production, composition and health*. GBR: Wiley-Blackwell, 200-219.

Graulet, B.; Matte, J.J.; Desrochers, A.; Doepel, L.; Palin, M.F.; Girard, C.L., 2007. Effects of dietary supplements of folic acid and vitamin B-12 on metabolism of dairy cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*, 90 (7): 3442-3455. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-718

Graulet, B.; Piquet, M.; Duriot, B.; Pradel, P.; Hulin, S.; Cornu, A.; Portelli, J.; Martin, B.; Farruggia, A., 2012. Variations des teneurs en micronutriments de l'herbe des prairies de moyenne montagne et transfert au lait. *Fourrages*, 209: 59-68.

Gravador, R.S.; Pace, E.; Mooney, B.R.; Jaeger, S.R.; Gkarane, V.; Fahey, A.G.; Brunton, N.P.; Claffey, N.A.; Allen, P.; Diskin, M.G.; Moloney, A.P.; Farmer, L.J.; Monahan, F.J., 2018. A consumer study of the effect of castration and slaughter age of lambs on the sensory quality of meat. *Small Ruminant Research*, 169 (O, 2004, ISO 4120:2004): 148-153. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.09.011

Green-Petersen, D.M.B.; Hyldig, G., 2010. Variation in Sensory Profile of Individual Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) from the Same Production Batch. *Journal of Food Science*, 75 (9): S499-S505. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01830.x

Greene, B.E.; Hsin, I.M.; Zipser, M.W., 1971. Retardation of oxidative color changes in raw ground beef. *Journal of Food Science*, 36 (6): 940-&. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1971.tb15564.x

Greenwood, P.L.; Thompson, A.; Ford, S.P., 2010. Postnatal consequences of the maternal environment and growth during prenatal life for productivity of ruminants. In: Greenwood, P.L.; Bell, A.W.; Vercoe, P.E.; Viljoen, G.J., eds. *Managing the prenatal environment to enhance livestock productivity*. Dordrecht: Springer Science Business Media, 3-36. http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-3135-8_1

Griffin, B.A., 2011. Eggs, dietary cholesterol and disease: facts and folklore. In: Van Immerseel, F.; Nys, Y.; Bain, M., eds. *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products, Vol 2: egg safety and nutritional quality*. Cambridge: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition, 214), 237-253. http://dx.doi.org/10.1533/9780857093929.3.237

Grigorakis, K., 2007. Compositional and organoleptic quality of fanned and wild gilthead sea bream (Sparus aurata) and sea bass (Dicentrarchus labrax) and factors affecting it: A review. *Aquaculture*, 272 (1-4): 55-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.04.062

Grobet, L.; Martin, L.J.R.; Poncelet, D.; Pirottin, D.; Brouwers, B.; Riquet, J.; Schoeberlein, A.; Dunner, S.; Menissier, F.; Massabanda, J.; Fries, R.; Hanset, R.; Georges, M., 1997. A deletion in the bovine myostatin gene causes the double-muscled phenotype in cattle. *Nature Genetics*, 17 (1): 71-74. http://dx.doi.org/10.1038/ng0997-71

Grosclaude, F., 1988. Le polymorphisme génétique des principales lactoprotéines bovines. Relations avec la quantité, la composition et les aptitudes fromagères du lait. *Productions Animales*, 1 (1): 5-17.

Groupe d'étude des marchés de restauration collective et de nutrition (GEMRCN), 2008. *Spécification technique : Préparations de viandes, produits à base de viande de volailles ou de lapin, foies gras de volaille*. Paris: Direction des Affaires Juridiques, 44 p.

Gruffat, D., 2018. Déterminants de la qualité nutritionnelle des lipides. In: Lavoisier, ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris 7, 241-252.

Gruffat, D.; Picard, B.; Bauchart, D.; Micol, D., 2015. Beef meat: the main qualities sought. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 99-103.

Grummer, J.; Karalus, M.; Zhang, K.; Vickers, Z.; Schoenfuss, T.C., 2012. Manufacture of reduced-sodium Cheddar-style cheese with mineral salt replacers. *Journal of Dairy Science*, 95 (6): 2830-2839. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4851

Guardia, S.; Lessire, M.; Corniaux, A.; Metayer-Coustard, S.; Mercerand, F.; Tesseraud, S.; Bouvarel, I.; Berri, C., 2014. Short-term nutritional strategies before slaughter are effective in modulating the final pH and color of broiler breast meat. *Poultry Science*, 93 (7): 1764-1773. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2013-03768

Guéguen, L.; Pointillart, A., 2008. Interactions digestives et métaboliques entre lipides et calcium. *Sciences Des Aliments*, 28 (1): 117-127.

Guerin-Dubiard, C.; Anton, M., 2010. Fractionnement de l'œuf (chapitre 7). In: Nau, F.; Guérin-Dubiard, C.; Baron, F.; Thapon, J.L., eds. *Science et technologie de l'œuf et des ovoproduits, Vol 2, De l'œuf aux ovoproduits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier.

Guerin-Dubiard, C.; Pasco, M.; Hietanen, A.; del Bosque, A.Q.; Nau, F.; Croguennec, T., 2005. Hen egg white fractionation by ion-exchange chromatography. *Journal of Chromatography A*, 1090 (1-2): 58-67. http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2005.06.083

Guillevic, M.; Kouba, M.; Mourot, J., 2009. Effect of a linseed diet on lipid composition, lipid peroxidation and consumer evaluation of French fresh and cooked pork meats. *Meat Science*, 81 (4): 612-618. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.10.019

Guillier, L.; Danan, C.; Bergis, H.; Delignette-Muller, M.L.; Granier, S.; Rudelle, S.; Beaufort, A.; Brisabois, A., 2013. Use of quantitative microbial risk assessment when investigating foodborne illness outbreaks: The example of a monophasic Salmonella Typhimurium 4,5,12:i:- outbreak implicating beef burgers. *International Journal of Food Microbiology*, 166 (3): 471-478. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.08.006

Guillier, L.; Thebault, A.; Gauchard, F.; Pommepuy, M.; Guignard, A.; Malle, P., 2011. A Risk-Based Sampling Plan for Monitoring of Histamine in Fish Products. *Journal of Food Protection*, 74 (2): 302-310. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-10-234

Guinee, T.P.; O'Kennedy, B.T., 2007. Reducing salt in cheese and dairy spreads. In: Kilcast, D.; Angus, F., eds. *Reducing Salt in Foods: Practical Strategies*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing in Food Science Technology and Nutrition), 316-357.

Gutema, F.D.; Agga, G.E.; Abdi, R.D.; De Zutter, L.; Duchateau, L.; Gabriel, S., 2019. Prevalence and Serotype Diversity of Salmonella in Apparently Healthy Cattle: Systematic Review and Meta-Analysis of Published Studies, 2000-2017. *Frontiers in Veterinary Science*, 6. http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2019.00102

Gutierrez-Pina, F.J.; Amaya-Guerra, C.A.; Rodriguez-Muela, C.; Gutierrez-Banuelos, H.; Muro-Reyes, A.; Medina-Flores, C.A.; Baez-Gonzalez, J.G., 2011. Quality and Yield of Chihuahua Cheese Produced from Dairy Cattle Supplemented with Enriched Apple Byproduct. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 10 (7): 818-820.

Guy, F.; Prache, S.; Thomas, A.; Bauchart, D.; Andueza, D., 2011. Prediction of lamb meat fatty acid composition using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Food Chemistry*, 127 (3): 1280-1286. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.01.084

Guyomarc'h, F.; Law, A.J.R.; Dalgleish, D.G., 2003. Formation of soluble and micelle-bound protein aggregates in heated milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51 (16): 4652-4660. http://dx.doi.org/10.1021/jf0211783

Guyot, N.; Rehault-Godbert, S.; Slugocki, C.; Harichaux, G.; Labas, V.; Helloin, E.; Nys, Y., 2016. Characterization of egg white antibacterial properties during the first half of incubation: A comparative study between embryonated and unfertilized eggs. *Poultry Science*, 95 (12): 2956-2970. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew271

Haard, N.F., 1992. Control of chemical-composition and food quality attributes of cultured fish. *Food Research International*, 25 (4): 289-307. http://dx.doi.org/10.1016/0963-9969(92)90126-p

Hachler, H.; Marti, G.; Giannini, P.; Lehner, A.; Jost, M.; Beck, J.; Weiss, F.; Bally, B.; Jermini, M.; Stephan, R.; Baumgartner, A., 2013. Outbreak of listerosis due to imported cooked ham, Switzerland 2011. *Eurosurveillance*, 18 (18): 7-13.

Haffray, P.; Bugeon, J.; Pincent, C.; Chapuis, H.; Mazeiraud, E.; Rossignol, M.N.; Chatain, B.; Vandeputte, M.; Dupont-Nivet, M., 2012. Negative genetic correlations between production traits and head or bony tissues in large all-female rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, 368: 145-152. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.09.023

Haffray, P.; Bugeon, J.; Rivard, Q.; Quittet, B.; Puyo, S.; Allamelou, J.M.; Vandeputte, M.; Dupont-Nivet, M., 2013. Genetic parameters of in-vivo prediction of carcass, head and fillet yields by internal ultrasound and 2D external imagery in large rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, 410: 236-244. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.016

Hafs, A.W.; Mazik, P.M.; Kenney, P.B.; Silverstein, J.T., 2012. Impact of carbon dioxide level, water velocity, strain, and feeding regimen on growth and fillet attributes of cultured rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, 350: 46-53. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.04.020

Hagen, O.; Johnsen, C.A., 2016. Flesh quality and biochemistry of light-manipulated Atlantic cod (Gadus morhua) and the significance of collagen cross-links on fillet firmness and gaping. *Food Chemistry*, 190: 786-792. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.007

Hahn, G.; Piene, A.K.; Janisch, S.; Wicke, M., 2013. Study on the physiological water/protein ratio in breast fillet from chicken reared in 2012. *WSPA 2013 - EggMeat 2013 - XXI European Symposium on the Quality of Poultry Meat, XV European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products : proceedings: World?s Poultry Science Journal, Volume 69, Supplement*. Bergamo: 15-19/09/2013. WPSA, 1-4.

Haile, D.M.; De Smet, S.; Claeys, E.; Vossen, E., 2013. Effect of light, packaging condition and dark storage durations on colour and lipid oxidative stability of cooked ham. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 50 (2): 239-247. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-011-0352-x

Hallier, A.; Noirot, V.; Medina, B.; Leboeuf, L.; Cavret, S., 2013. Development of a method to determine essential oil residues in cow milk. *Journal of Dairy Science*, 96 (3): 1447-1454. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-6152

Halos, L.; Thebault, A.; Aubert, D.; Thomas, M.; Perret, C.; Geers, R.; Alliot, A.; Escotte-Binet, S.; Ajzenberg, D.; Darde, M.L.; Durand, B.; Boireau, P.; Villena, I., 2010. An innovative survey underlining the significant level of contamination by Toxoplasma gondii of ovine meat consumed in France. *International Journal for Parasitology*, 40 (2): 193-200. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpara.2009.06.009

Hammershoj, M.; Johansen, N.F., 2016. Review: The effect of grass and herbs in organic egg production on egg fatty acid composition, egg yolk colour and sensory properties. *Livestock Science*, 194: 37-43. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2016.11.001

Hammershoj, M.; Nording, J.A.; Rasmussen, H.C.; Carstens, J.H.; Pedersen, H., 2006a. Dry-pasteurization of egg albumen powder in a fluidized bed. I. Effect on microbiology, physical and chemical parameters. *International Journal of Food Science and Technology*, 41 (3): 249-261. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01058.x

Hammershoj, M.; Peters, L.V.; Andersen, H.J., 2004. The significance of critical processing steps in the production of dried egg albumen powder on gel textural and foaming properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (9): 1039-1048. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1772

Hammershoj, M.; Qvist, K.B., 2001. Importance of hen age and egg storage time for egg albumen foaming. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology*, 34 (2): 118-120. http://dx.doi.org/10.1006/fstl.2000.0750

Hammershoj, M.; Rasmussen, H.C.; Carstens, J.H.; Pedersen, H., 2006b. Dry-pasteurization of egg albumen powder in a fluidized bed. II. Effect on functional properties: gelation and foaming. *International Journal of Food Science and Technology*, 41 (3): 263-274. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01059.x

Hanlon, K.E.; Miller, M.F.; Guillen, L.M.; Echeverry, A.; Dormedy, E.; Cemo, B.; Branham, L.A.; Sanders, S.; Brashears, M.M., 2018. Presence of Salmonella and Escherichia coli O157 on the hide, and presence of Salmonella, Escherichia coli O157 and Campylobacter in feces from small-ruminant (goat and lamb) samples collected in the United States, Bahamas and Mexico. *Meat Science*, 135: 1-5. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.08.003

Hansen, L.L.; Claudi-Magnussen, C.; Jensen, S.K.; Andersen, H.J., 2006. Effect of organic pig production systems on performance and meat quality. *Meat Science*, 74 (4): 605-615. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.02.014

Hanson, H.; Whitfield, Y.; Lee, C.; Badiani, T.; Minielly, C.; Fenik, J.; Makrostergios, T.; Kopko, C.; Majury, A.; Hillyer, E.; Fortuna, L.; Maki, A.; Murphy, A.; Lombos, M.; Zittermann, S.; Yu, Y.; Hill, K.; Kong, A.; Sharma, D.; Warshawsky, B., 2019. Listeria monocytogenes Associated with Pasteurized Chocolate Milk, Ontario, Canada. *Emerging Infectious Diseases*, 25 (3): 581-584. http://dx.doi.org/10.3201/eid2503.180742

Harnly, M.E.; Petreas, M.X.; Flattery, J.; Goldman, L.R., 2000. Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and polychlorinated dibenzofuran contamination in soil and home-produced chicken eggs near pentachlorophenol sources. *Environmental Science & Technology*, 34 (7): 1143-1149. http://dx.doi.org/10.1021/es9906103

Haskaraca, G.; Demirok, E.; Kolsarici, N.; Oz, F.; Ozsarac, N., 2014. Effect of green tea extract and microwave pre-cooking on the formation of heterocyclic aromatic amines in fried chicken meat products. *Food Research International*, 63: 373-381. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.001

Haskaraca, G.; Soncu, E.D.; Kolsarici, N.; Oz, F.; Juneja, V.K., 2017. Heterocyclic aromatic amines content in chicken burgers and chicken nuggetssold in fast food restaurants and effects of green tea extract and microwave thawing on their formation. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41 (6): 10. http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.13240

Hassenfratz, C., 2018. Les verrats terminaux piétrain toujours premiers. *Tech Porc – Réussir Porc*, 263: 42-43.

Hassoun, P.; Allain, C.; Marnet, P.G.; Gonzalez-Garcia, E.; Larroque, H.; Vanbergue, E.; Dessauge, F.; Dzidic, A.; Autran, P.; Portes, D.; Guitard, J.P.; Lagriffoul, G.; Tesniere, A.; Morin, E.; de Boissieu, C.; Moulin, C.H.; Lurette, A.; Barillet, F., 2016. Once daily milking in Lacaune dairy ewes: Synthesis of a five year study conducted in France. *Inra Productions Animales*, 29 (1): 57-71.

Hatae, K.; Tobimatsu, A.; Takeyama, M.; Matsumoto, J.J., 1986. Contribution of connective tissues on the texture difference of various fish species. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 52 (11): 2001-2007.

Hatta, H.; Hagi, T.; Hirano, K., 1997. Chemical and physicochemical properties of hen eggs and their application in foods. In: Yamamoto, T.; Junea, L.; Hatta, H.; Kim, M., eds. *Hen Eggs: Their Basic and Applied Science*. Boca Raton (US): CRC Press, 117-134.

Hauge, S.J.; Nafstad, O.; Skjerve, E.; Rotterud, O.J.; Nesbakken, T., 2011. Effects of shearing and fleece cleanliness on microbiological contamination of lamb carcasses. *International Journal of Food Microbiology*, 150 (2-3): 178-183. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.07.038

Haugen, J.E.; Lundby, F.; Wold, J.P.; Veberg, A., 2006. Detection of rancidity in freeze stored turkey meat using a commercial gas-sensor array system. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 116 (1-2): 78-84. http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2005.12.060

Hayes, M.; Hurley, M.J.; Larsen, L.B.; Heegaard, C.W.; Magboul, A.A.A.; Oliveira, J.C.; McSweeney, P.L.H.; Kelly, A.L., 2001. Thermal inactivation kinetics of bovine cathepsin D. *Journal of Dairy Research*, 68 (2): 267-276. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029901004757

He, M.L.; Mir, P.S.; Okine, E.K.; Napadajlo, H., 2009. Effect of conjugated linoleic acids from beef or industrial hydrogenation on growth and adipose tissue characteristics of rats. *Nutrition & Metabolism*, 6: 12. http://dx.doi.org/10.1186/1743-7075-6-19

Hegarty, R.S.; Hopkins, D.L.; Farrell, T.C.; Banks, R.; Harden, S., 2006a. Effects of available nutrition and sire breeding values for growth and muscling on the development of crossbred lambs. 2: Composition and commercial yield. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57 (6): 617-626. http://dx.doi.org/10.1071/ar04276

Hegarty, R.S.; Neutze, S.A.; Oddy, V.H., 1999. Effects of protein and energy supply on the growth and carcass composition of lambs from differing nutritional histories. *Journal of Agricultural Science*, 132: 361-375. http://dx.doi.org/10.1017/s0021859698006315

Hegarty, R.S.; Warner, R.D.; Pethick, D.W., 2006b. Genetic and nutritional regulation of lamb growth and muscle characteristics. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57 (6): 721-730. http://dx.doi.org/10.1071/ar06105

Hegde, N.G., 2019. Research on A1 and A2 milk: A1 milk is not a matter of health concern. *Indian Journal of Animal Sciences*, 89 (7): 3-6.

Hemre, G.I.; Karlsen, O.; Eckhoff, K.; Tveit, K.; Mangor-Jensen, A.; Rosenlund, G., 2004. Effect of season, light regime and diet on muscle composition and selected quality parameters in farmed Atlantic cod, Gadus morhua L. *Aquaculture Research*, 35 (7): 683-697. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2004.01069.x

Hermansen, J.E.; Badsberg, J.H.; Kristensen, T.; Gundersen, V., 2005. Major and trace elements in organically or conventionally produced milk. *Journal of Dairy Research*, 72 (3): 362-368. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029905000968

Hernandez-Urcera, J.; Ayala, M.D.; Santaella, M.; Periago, M.J.; Lopez-Albors, O.; Cal, R., 2017. Effect of triploidy on muscle cellularity and flesh quality of turbot (Scophthalmus maximus). *Aquaculture Research*, 48 (7): 3606-3617. http://dx.doi.org/10.1111/are.13186

Hersleth, M.; Lengard, V.; Verbeke, W.; Guerrero, L.; Naes, T., 2011. Consumers' acceptance of innovations in dry-cured ham Impact of reduced salt content, prolonged aging time and new origin. *Food Quality and Preference*, 22 (1): 31-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2010.07.002

Hersleth, M.; Naes, T.; Rodbotten, M.; Lind, V.; Monteleone, E., 2012. Lamb meat - Importance of origin and grazing system for Italian and Norwegian consumers. *Meat Science*, 90 (4): 899-907. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.030

Heuer, O.E.; Pedersen, K.; Andersen, J.S.; Madsen, M., 2001. Prevalence and antimicrobial susceptibility of thermophilic Campylobacter in organic and conventional broiler flocks. *Letters in Applied Microbiology*, 33 (4): 269-274. http://dx.doi.org/10.1046/j.1472-765X.2001.00994.x

Hickey, D.K.; Kilcawley, K.N.; Beresford, T.P.; Wilkinson, M.G., 2007. Lipolysis in cheddar cheese made from raw, thermized, and pasteurized milks. *Journal of Dairy Science*, 90 (1): 47-56. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72607-3

Hidalgo, A.; Rossi, M.; Clerici, F.; Ratti, S., 2008. A market study on the quality characteristics of eggs from different housing systems. *Food Chemistry*, 106 (3): 1031-1038. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.019

Hill, W.M.; Cotteril.Oj; Funk, E.M.; Baldwin, R.E., 1965. Spray-drying egg white at various pH levels. *Poultry Science*, 44 (5): 1155-&. http://dx.doi.org/10.3382/ps.0441155

Hites, R.A.; Foran, J.A.; Carpenter, D.O.; Hamilton, M.C.; Knuth, B.A.; Schwager, S.J., 2004. Global assessment of organic contaminants in farmed salmon. *Science*, 303 (5655): 226-229. http://dx.doi.org/10.1126/science.1091447

Hoang, T.T.; Traag, W.A.; Murk, A.J.; Hoogenboom, R., 2014. Levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans (PCDD/Fs) and dioxin-like PCBs in free range eggs from Vietnam, including potential health risks. *Chemosphere*, 114: 268-274. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.010

Hocquette, J.F.; Botreau, R.; Legrand, I.; Polkinghorne, R.; Pethick, D.W.; Lherm, M.; Picard, B.; Doreau, M.; Terlouw, E.M.C., 2014. Win-win strategies for high beef quality, consumer satisfaction, and farm efficiency, low environmental impacts and improved animal welfare. *Animal Production Science*, 54 (10): 1537-1548. http://dx.doi.org/10.1071/an14210

Hocquette, J.F.; Botreau, R.; Picard, B.; Jacquet, A.; Pethick, D.W.; Scollan, N.D., 2012. Opportunities for predicting and manipulating beef quality. *Meat Science*, 92 (3): 197-209. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.007

Hocquette, J.F.; Gondret, F.; Baeza, E.; Medale, F.; Jurie, C.; Pethick, D.W., 2010. Intramuscular fat content in meat-producing animals: development, genetic and nutritional control, and identification of putative markers. *Animal*, 4 (2): 303-319. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109991091

Hodgkinson, S.M.; Montoya, C.A.; Scholten, P.T.; Rutherfurd, S.M.; Moughan, P.J., 2018. Cooking Conditions Affect the True Ileal Digestible Amino Acid Content and Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) of Bovine Meat as Determined in Pigs. *Journal of Nutrition*, 148 (10): 1564-1569. http://dx.doi.org/10.1093/jn/nxy153

Hong, G.E.; Kim, J.H.; Ahn, S.J.; Lee, C.H., 2015. Changes in Meat Quality Characteristics of the Sous-vide Cooked Chicken Breast during Refrigerated Storage. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 35 (6): 757-764. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.6.757

Hong, H.; Regenstein, J.M.; Luo, Y.K., 2017. The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57 (9): 1787-1798. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2014.1001489

Honikel, K.O., 2008. The use and control of nitrate and nitrite for the processing of meat products. *Meat Science*, 78 (1-2): 68-76. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.030

Honkatukia, M.; Tuiskula-Haavisto, M.; Arango, J.; Tabell, J.; Schmutz, M.; Preisinger, R.; Vilkki, J., 2013. QTL mapping of egg albumen quality in egg layers. *Genetics Selection Evolution*, 45: 8. http://dx.doi.org/10.1186/1297-9686-45-31

Hoogenboom, R.; ten Dam, G.; van Bruggen, M.; Jeurissen, S.M.F.; van Leeuwen, S.P.J.; Theelen, R.M.C.; Zeilmaker, M.J., 2016. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) and biphenyls (PCBs) in home-produced eggs. *Chemosphere*, 150: 311-319. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.034

Hopkins, D.L.; Allingham, P.G.; Colgrave, M.; van de Ven, R.J., 2013. Interrelationship between measures of collagen, compression, shear force and tenderness. *Meat Science*, 95 (2): 219-223. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.054

Hopkins, D.L.; Beattie, A.S.; Pirlot, K.L., 1995. Meat quality, carcass fatness, and growth of short scrotum lambs grazing either forage rape or irrigated perennial pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35 (4): 453-459. http://dx.doi.org/10.1071/ea9950453

Hopkins, D.L.; Hegarty, R.S.; Walker, P.J.; Pethick, D.W., 2006. Relationship between animal age, intramuscular fat, cooking loss, pH, shear force and eating quality of aged meat from sheep. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46 (6-7): 879-884. http://dx.doi.org/10.1071/ea05311

Hopkins, D.L.; Nicholson, A., 1999. Meat quality of wether lambs grazed on either saltbush (Atriplex nummularia) plus supplements or lucerne (Medicago sativa). *Meat Science*, 51 (1): 91-95. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00105-3

Hopkins, D.L.; Stanley, D.F.; Martin, L.C.; Ponnampalam, E.N.; van de Ven, R., 2007. Sire and growth path effects on sheep meat production 1. Growth and carcass characteristics. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 47 (10): 1208-1218. http://dx.doi.org/10.1071/ea06319

Horn, S.S.; Ruyter, B.; Meuwissen, T.H.E.; Hillestad, B.; Sonesson, A.K., 2018. Genetic effects of fatty acid composition in muscle of Atlantic salmon. *Genetics Selection Evolution*, 50. http://dx.doi.org/10.1186/s12711-018-0394-x

Horsted, K.; Hammershoj, M.; Hermansen, J.E., 2006. Short-term effects on productivity and egg quality in nutrient-restricted versus non-restricted organic layers with access to different forage crops. *Acta Agriculturae Scandinavica Section a-Animal Science*, 56 (1): 42-54. http://dx.doi.org/10.1080/09064700600866072

Huan, Y.J.; Zhou, G.H.; Zhao, G.M.; Xu, X.L.; Peng, Z.Q., 2005. Changes in flavor compounds of dry-cured Chinese Jinhua ham during processing. *Meat Science*, 71 (2): 291-299. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.03.025

Huang, C.C.; Zeng, Y.H.; Luo, X.J.; Tang, B.; Liu, Y.E.; Ren, Z.H.; Mai, B.X., 2018a. Level changes and human dietary exposure assessment of halogenated flame retardant levels in free-range chicken eggs: A case study of a former e-waste recycling site, South China. *Science of the Total Environment*, 634: 509-515. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.386

Huang, S.Q.; Wang, L.M.; Sivendiran, T.; Bohrer, B.M., 2018b. Review: Amino acid concentration of high protein food products and an overview of the current methods used to determine protein quality. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58 (15): 2673-2678. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2017.1396202

Huang, Y.; Andueza, D.; de Oliveira, L.; Zawadzki, F.; Prache, S., 2015. Visible spectroscopy on carcass fat combined with chemometrics to distinguish pasture-fed, concentrate-fed and concentrate-finished pasture-fed lambs. *Meat Science*, 101: 5-12. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.10.024

Hue, O.; Le Bouquin, S.; Lalande, F.; Allain, V.; Rouxel, S.; Petetin, I.; Quesne, S.; Laisney, M.J.; Gloaguen, P.Y.; Picherot, M.; Salvat, G.; Bougeard, S.; Chemaly, M., 2011. Prevalence of Salmonella spp. on broiler chicken carcasses and risk factors at the slaughterhouse in France in 2008. *Food Control*, 22 (8): 1158-1164. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.01.009

Hugo, A.; Roodt, E., 2007. Significance of porcine fat quality in meat technology: A review. *Food Reviews International*, 23 (2): 175-198. http://dx.doi.org/10.1080/87559120701225037

Huneau-Salaun, A.; Michel, V.; Huonnic, D.; Balaine, L.; Le Bouquin, S., 2010. Factors influencing bacterial eggshell contamination in conventional cages, furnished cages and free-range systems for laying hens under commercial conditions. *British Poultry Science*, 51 (2): 163-169. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2010.482462

Hurtado-Rodriguez, R.; Fountoulaki, E.; Grigorakis, K.; Alexis, M.; Flos, R., 2010. Season and size effects: changes in the quality of gilthead sea bream (Sparus aurata L.). *Mediterranean Marine Science*, 11 (1): 117-131.

Hurtaud, C.; Faucon, F.; Couvreur, S.; Peyraud, J.L., 2010. Linear relationship between increasing amounts of extruded linseed in dairy cow diet and milk fatty acid composition and butter properties. *Journal of Dairy Science*, 93 (4): 1429-1443. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2839

Hurtaud, C.; Peyraud, J.L.; Michel, G.; Berthelot, D.; Delaby, L., 2009. Winter feeding systems and dairy cow breed have an impact on milk composition and flavour of two Protected Designation of Origin French cheeses. *Animal*, 3 (9): 1327-1338. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109004716

Huss, H.H.; Reilly, A.; Ben Embarek, P.K., 2000. Prevention and control of hazards in seafood. *Food Control*, 11 (2): 149-156. http://dx.doi.org/10.1016/s0956-7135(99)00087-0

Hussain, A.I.; Chatha, S.A.S.; Iqbal, T.; Arshad, M.U.; Zahoor, A.F.; Afzal, S., 2013. Comparative Study of Different Cooking Methods on Nutritional Attributes and Fatty Acid Profile of Chicken Meat. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 35 (3): 678-684.

Iaconisi, V.; Bonelli, A.; Pupino, R.; Gai, F.; Parisi, G., 2018. Mealworm as dietary protein source for rainbow trout: Body and fillet quality traits. *Aquaculture*, 484: 197-204. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.034

Ianni, A.; Bennato, F.; Martino, C.; Innosa, D.; Grotta, L.; Martino, G., 2019. Effects of selenium supplementation on chemical composition and aromatic profiles of cow milk and its derived cheese. *Journal of Dairy Science*, 102 (8): 6853-6862. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2019-16382

Ibanoglu, E.; Ercelebi, E.A., 2007. Thermal denaturation and functional properties of egg proteins in the presence of hydrocolloid gums. *Food Chemistry*, 101 (2): 626-633. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.01.056

Idele, 2017. Dossier Europe, Filière lait bio : Comment les filières lait "bio" se développent en Europe du Nord. *Économie de l'élevage*, n° 482: 29 p.

Idele, 2018a. Dossier annuel ovins, année 2017 : perspectives 2018. *Économie de l'élevage*, n° 488: 39 p.

Idele, 2018b. Production laitière dans les montagnes de l'UE : quelles stratégies après les quotas laitiers ? . *Économie de l'élevage*, n° 494: 48 p.

Idele, 2019. Dossier annuel caprins, année 2018, perspectives 2019. *Économie de l'élevage*, n° 497: 31 p.

IFIP, 2013. *Mémento de l'éleveur de porc, 7è édition*. Paris: IFIP-Institut du porc.

IFIP, 2014. *Mémento viandes et charcuteries*. Paris (FR): Ed. IFIP-Institut du porc, 200 p.

IFIP, 2015. Risque d'odeur des viandes de porcs mâles non castrés en abattoir et salaison. In: IFIP, ed. *Mémento viandes et charcuteries*. Paris: IFIP-Institut du porc.

IFIP, 2016. *Code des Usages de la Charcuterie, de la Salaison et des Conserves de Viandes, Edition 2016*. Paris: IFIP-Institut du Porc.

IFIP, 2017. *Mise à jour du Code des Usages de la Charcuterie, de la Salaison et des Conserves de Viandes* Paris: IFIP-Institut du Porc.

IFIP, 2018a. Oxydation et qualité des viandes et produits carnés. In: IFIP, ed. *Mémento viandes et charcuteries : Cahier Oxydation et qualité des viandes et produits carnés*. Paris: IFIP-Institut du porc, .

IFIP, 2018b. *Porc par les chiffres, édition 2018-2019. La filière porcine en France, dans l'UE et le monde*. Paris: Editions IFIP-Institut du Porc, 39 p.

IFIP, 2019. *Porc par les chiffres, édition 2019-2020. La filière porcine en France, dans l'UE et le monde*. Paris: Editions IFIP-Institut du Porc, 36 p.

Imanari, M.; Kadowaki, M.; Fujimura, S., 2008. Regulation of taste-active components of meat by dietary branched-chain amino acids; effects of branched-chain amino acid antagonism. *British Poultry Science*, 49 (3): 299-307. http://dx.doi.org/10.1080/00071660802155080

INAO, 2019. *Chiffres clés 2018 des produits sous signes de la qualité et de l'origine, Produits laitiers AOP et IGP*, 12 p. https://www.inao.gouv.fr/content/download/3091/28236/version/1/file/INAO_CH_CLE_2019_BD.pdf

INAPORC, 2018. *Plan de la filière porcine française*: INAPORC, 40 p.

Inglingstad, R.A.; Steinshamn, H.; Dagnachew, B.S.; Valenti, B.; Criscione, A.; Rukke, E.O.; Devold, T.G.; Skeie, S.B.; Vegarud, G.E., 2014. Grazing season and forage type influence goat milk composition and rennet coagulation properties. *Journal of Dairy Science*, 97 (6): 3800-3814. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7542

Initiative Bio Bretagne, 2018. Table-ronde régionale volailles bio. Loudéac (France): 10/04/18.

Innocente, N.; Biasutti, M., 2013. Automatic milking systems in the Protected Designation of Origin Montasio cheese production chain: Effects on milk and cheese quality. *Journal of Dairy Science*, 96 (2): 740-751. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5512

Institut de l'élevage; France conseil élevage; Comité national brebis laitières, 2015. *Résultats de contrôle laitier France 2014*. Paris: Institut de l'Élevage (Collections Résultats).

Irish Food Safety Authority, 2004. *Investigation into Levels of Dioxins, Furans, PCBs and some elements in Battery, Free-Range, Barn and Organic Eggs*, p. 25.

Irshad, A.; Kandeepan, G.; Sanjay, K.; Arvind, K.; Ashish, K.; Vishnuraj, M.R.; Vivek, S., 2013. Factors Influencing Carcass Composition of Livestock. *Journal of Animal Production Advances*, 3: 1. http://dx.doi.org/10.5455/japa.20130531093231

Isabel, B.; Lopez-Bote, C.J.; de la Hoz, L.; Timon, M.; Garcia, C.; Ruiz, J., 2003. Effects of feeding elevated concentrations of monounsaturated fatty acids and vitamin E to swine on characteristics of dry cured hams. *Meat Science*, 64 (4): 475-482. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00225-5

Isleroglu, H.; Kemerli, T.; Ozdestan, O.; Uren, A.; Kaymak-Ertekin, F., 2014. Effect of oven cooking method on formation of heterocyclic amines and quality characteristics of chicken patties: Steam-assisted hybrid oven versus convection ovens. *Poultry Science*, 93 (9): 2296-2303. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2013-03552

ITAVI, 2018. *Situation du marché des œufs et ovoproduits*. Paris: ITAVI, Service économie, 11 p.

Ithurralde, J.; Perez-Clariget, R.; Corrales, F.; Fila, D.; Lopez-Perez, A.; Marichal, M.D.; Saadoun, A.; Bielli, A., 2019. Sex-dependent effects of maternal undernutrition on growth performance, carcass characteristics and meat quality of lambs. *Livestock Science*, 221: 105-114. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.024

ITP, 2001. *Le Porc par les chiffres, édition 2001*. Paris: Editions Institut Technique du Porc, 56 p.

Jaborek, J.R.; Zerby, H.N.; Moeller, S.J.; Wick, M.P.; Fluharty, F.L.; Garza, H.; Garcia, L.G.; England, E.M., 2018. Effect of energy source and level, and animal age and sex on meat characteristics of sheep. *Small Ruminant Research*, 166: 53-60. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.07.005

Jacob, R.H.; Hopkins, D.L., 2014. Techniques to reduce the temperature of beef muscle early in the post mortem period - a review. *Animal Production Science*, 54 (4): 482-493. http://dx.doi.org/10.1071/an12338

Jacob, R.H.; Pethick, D.W., 2014. Animal factors affecting the meat quality of Australian lamb meat. *Meat Science*, 96 (2): 1120-1123. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.10.039

Jacobsen, A.; Joensen, H.; Eysturskard, J., 2017. Gaping and loss of fillet firmness in farmed salmon (Salmo salar L.) closely correlated with post-slaughter cleaning of the abdominal cavity. *Aquaculture Research*, 48 (1): 321-331. http://dx.doi.org/10.1111/are.12884

Jaeggi, J.J.; Govindasamy-Lucey, S.; Berger, Y.M.; Johnson, M.E.; McKusick, B.C.; Thomas, D.L.; Wendorff, W.L., 2003. Hard ewe's milk cheese manufactured from milk of three different groups of somatic cell counts. *Journal of Dairy Science*, 86 (10): 3082-3089. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73908-3

Jahan, K.; Paterson, A.; Piggott, J.R., 2005. Sensory quality in retailed organic, free range and corn-fed chicken breast. *Food Research International*, 38 (5): 495-503. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2004.09.013

Jahan, K.; Paterson, A.; Spickett, C.M., 2004. Fatty acid composition, antioxidants and lipid oxidation in chicken breasts from different production regimes. *International Journal of Food Science and Technology*, 39 (4): 443-453. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.00799.x

James, S.J.; James, C., 2002. Effect of refrigeration on texture of meat. In: James, S.J.; James, C., eds. *Meat refrigeration*. Cambridge: Woodhead Publishing in Food Science and Technology, 43-69.

Jamilah, B.; Mohamed, A.; Abbas, K.A.; Rahman, R.A.; Karim, R., 2009. A review on the effect of animal diets and presence of selected natural antioxidants on lipid oxidation of meat. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 7 (2): 76-81.

Janhunen, M.; Vehvilainen, H.; Koskela, J.; Forsman, A.; Kankainen, M., 2019. Added value from an added chromosome: Potential of producing large fillet fish from autumn to spring with triploid rainbow trout, Oncorhynchus mykiss. *Aquaculture Research*, 50 (3): 818-825. http://dx.doi.org/10.1111/are.13952

Jankowski, J.; Zdunczyk, Z.; Mikulski, D.; Juskiewicz, J.; Naczmanski, J.; Pomianowski, J.F.; Zdunczyk, P., 2012. Fatty acid profile, oxidative stability, and sensory properties of breast meat from turkeys fed diets with a different n-6/n-3 PUFA ratio. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114 (9): 1025-1035. http://dx.doi.org/10.1002/ejlt.201200003

Jaramillo, D.P.; Buffa, M.N.; Rodriguez, M.; Perez-Baena, I.; Guamis, B.; Trujillo, A.J., 2010. Effect of the inclusion of artichoke silage in the ration of lactating ewes on the properties of milk and cheese characteristics during ripening. *Journal of Dairy Science*, 93 (4): 1412-1419. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2740

Jaramillo, D.P.; Garcia, T.; Buffa, M.; Rodriguez, M.; Guamis, B.; Trujillo, A., 2009. Effect of the inclusion of whole citrus in the ration of lactating ewes on the properties of milk and cheese characteristics during ripening. *Journal of Dairy Science*, 92 (2): 469-476. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1293

Jaramillo, D.P.; Zamora, A.; Guamis, B.; Rodriguez, M.; Trujillo, A.J., 2008. Cheesemaking aptitude of two Spanish dairy ewe breeds: Changes during lactation and relationship between physico-chemical and technological properties. *Small Ruminant Research*, 78 (1-3): 48-55. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2008.04.005

Jarmolowska, B.; Kostyra, E.; Krawczuk, S.; Kostyra, H., 1999. beta-casomorphin-7 isolated from Brie cheese. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79 (13): 1788-1792. http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1097-0010(199910)79:13<1788::aid-jsfa436>3.0.co;2-t

Jensen, C.; Birk, E.; Jokumsen, A.; Skibsted, L.H.; Bertelsen, G., 1998. Effect of dietary levels of fat, alpha-tocopherol and astaxanthin on colour and lipid oxidation during storage of frozen rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) and during chill storage of smoked trout. *Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung a-Food Research and Technology*, 207 (3): 189-196. http://dx.doi.org/10.1007/s002170050317

Jenvrin, S., 2019. En 2021, l'appellation d'origine protégée camembert de Normandie change ses gammes. *Le Monde*, 13 février 2019. https://www.lemonde.fr/m-styles/article/2019/02/13/en-2021-l-appellation-d-origine-protegee-camembert-de-normandie-change-ses-gammes_5422950_4497319.html

Jeronimo, E.; Alves, S.P.; Prates, J.A.M.; Santos-Silva, J.; Bessa, R.J.B., 2009. Effect of dietary replacement of sunflower oil with linseed oil on intramuscular fatty acids of lamb meat. *Meat Science*, 83 (3): 499-505. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.033

Ji, H.; Om, A.D.; Yoshimatsu, T.; Hayashi, M.; Umino, T.; Nakagawa, H.; Asano, M.; Nakagawa, A., 2003. Effect of dietary vitamins C and E fortification on lipid metabolism in red sea bream Pagrus major and black sea bream Acanthopagrus schlegeli. *Fisheries Science*, 69 (5): 1001-1009. http://dx.doi.org/10.1046/j.1444-2906.2003.00719.x

Jiang, J.; Xiong, Y.L.L., 2016. Natural antioxidants as food and feed additives to promote health benefits and quality of meat products: A review. *Meat Science*, 120: 107-117. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.005

Jimenez-Martin, E.; Perez-Palacios, T.; Carrascal, J.R.; Rojas, T.A., 2016. Enrichment of Chicken Nuggets with Microencapsulated Omega-3 Fish Oil: Effect of Frozen Storage Time on Oxidative Stability and Sensory Quality. *Food and Bioprocess Technology*, 9 (2): 285-297. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-015-1621-x

Jlali, M.; Gigaud, V.; Metayer-Coustard, S.; Sellier, N.; Tesseraud, S.; Le Bihan-Duval, E.; Berri, C., 2012. Modulation of glycogen and breast meat processing ability by nutrition in chickens: Effect of crude protein level in 2 chicken genotypes. *Journal of Animal Science*, 90 (2): 447-455. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2011-4405

Jo, Y.; Benoist, D.M.; Barbano, D.M.; Drake, M.A., 2018. Flavor and flavor chemistry differences among milks processed by high-temperature, short-time pasteurization or ultra-pasteurization. *Journal of Dairy Science*, 101 (5): 3812-3828. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2017-14071

Jobling, M.; Meloy, O.H.; Santos, J.; Christiansen, B., 1994. The compensatory growth response of the Atlantic cod: effects of nutritional history. *Aquaculture International*, 2: 75-90.

Johansson, L.; Kiessling, A.; Kiessling, K.H.; Berglund, L., 2000. Effects of altered ration levels on sensory characteristics, lipid content and fatty acid composition of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Food Quality and Preference*, 11 (3): 247-254. http://dx.doi.org/10.1016/s0950-3293(99)00073-7

Johnsen, C.A.; Hagen, O.; Adler, M.; Jonsson, E.; Kling, P.; Bickerdike, R.; Solberg, C.; Bjornsson, B.T.; Bendiksen, E.A., 2011. Effects of feed, feeding regime and growth rate on flesh quality, connective plasma hormones in farmed Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture*, 318 (3-4): 343-354. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.05.040

Johnsen, C.A.; Hagen, O.; Solberg, C.; Bjornsson, B.T.H.; Jonsson, E.; Johansen, S.J.S.; Bendiksen, E.A., 2013. Seasonal changes in muscle structure and flesh quality of 0+ and 1+ Atlantic salmon (Salmo salar L.): impact of feeding regime and possible roles of ghrelin. *Aquaculture Nutrition*, 19 (1): 15-34. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2095.2011.00927.x

Johnston, I.A.; Alderson, R.; Sandham, C.; Dingwall, A.; Mitchell, D.; Selkirk, C.; Nickell, D.; Baker, R.; Robertson, B.; Whyte, D.; Springate, J., 2000. Muscle fibre density in relation to the colour and texture of smoked Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture*, 189 (3-4): 335-349. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(00)00373-2

Johnston, I.A.; Bickerdike, R.; Li, X.J.; Dingwall, A.; Nickel, D.; Alderson, R.; Campbell, P., 2007. Fast growth was not associated with an increased incidence of soft flesh and gaping in two strains of Atlantic salmon (Salmo salar) grown under different environmental conditions. *Aquaculture*, 265 (1-4): 148-155. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.01.045

Johnston, I.A.; Manthri, S.; Alderson, R.; Campbell, P.; Mitchell, D.; Whyte, D.; Dingwall, A.; Nickell, D.; Selkirk, C.; Robertson, B., 2002. Effects of dietary protein level on muscle cellularity and flesh quality in Atlantic salmon with particular reference to gaping. *Aquaculture*, 210 (1-4): 259-283. http://dx.doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00862-6

Jondreville, C.; Bouveret, C.; Lesueur-Jannoyer, M.; Rychen, G.; Feidt, C., 2013. Relative bioavailability of tropical volcanic soil-bound chlordecone in laying hens (Gallus domesticus). *Environmental Science and Pollution Research*, 20 (1): 292-299. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-012-1010-1

Jondreville, C.; Cariou, R.; Travel, A.; Belhomme, L.J.; Dervilly-Pinel, G.; Le Bizec, B.; Huneau-Salaun, A.; Le Bouquin-Leneveu, S., 2017. Hens can ingest extruded polystyrene in rearing buildings and lay eggs contaminated with hexabromocyclododecane. *Chemosphere*, 186: 62-67. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.117

Jondreville, C.; Fournier, A.; Feidt, C., 2011. Chemical residues and contaminants in eggs. In: Van Immerseel, F.; Nys, Y.; Bain, eds. *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products, Vol 2: egg safety and nutritional quality*. Cambridge: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition, 214), 62-80. http://dx.doi.org/10.1533/9780857093929.1.62

Jones, G.; dela Gandara, M.P.; Herrera-Leon, L.; Herrera-Leon, S.; Martinez, C.V.; Hureaux-Roy, R.; Abdallah, Y.; Nisavanh, A.; Fabre, L.; Renaudat, C.; Mossong, J.; Mattheus, W.; Huard, C.; Le Borgne, C.; de Valk, H.; Weill, F.X.; Jourdan-Da Silva, N., 2019a. Outbreak of Salmonella enterica serotype Poona in infants linked to persistent Salmonella contamination in an infant formula manufacturing facility, France, August 2018 to February 2019. *Eurosurveillance*, 24 (13): 2-8. http://dx.doi.org/10.2807/1560-7917.es.2019.24.13.1900161

Jones, G.; Lefevre, S.; Donguy, M.P.; Nisavanh, A.; Terpant, G.; Fougere, E.; Vaissiere, E.; Guinard, A.; Mantes, A.; de Valk, H.; Fila, M.; Tanne, C.; Le Borgne, C.; Weill, F.X.; Bonacorsi, S.; Jourdan-Da Silva, N.; Mariani-Kurkdjian, P., 2019b. Outbreak of Shiga toxin-producing Escherichia coli (STEC) O26 paediatric haemolytic uraemic syndrome (HUS) cases associated with the

consumption of soft raw cow's milk cheeses, France, March to May 2019. *Eurosurveillance*, 24 (22): 7-10. http://dx.doi.org/10.2807/1560-7917.es.2019.24.22.1900305

Jonsall, A.; Johansson, L.; Lundstrom, K.; Andersson, K.H.; Nilsen, A.N.; Risvik, E., 2002. Effects of genotype and rearing system on sensory characteristics and preference for pork (M-Longissimus dorsi). *Food Quality and Preference*, 13 (2): 73-80. http://dx.doi.org/10.1016/s0950-3293(01)00060-x

Joseph, J.L.; Marmier, D., 2018. Les signes officiels de qualité et d'origine des produits alimentaires. Paris Conseil économique et social. 90 p. http://www.lecese.fr/travaux-publies/les-signes-officiels-de-qualite-et-dorigine-des-produits-alimentaires-siqo

Jourdan-Da Silva, N.; Fabre, L.; Robinson, E.; Fournet, N.; Nisavanh, A.; Bruyand, M.; Mailles, A.; Serre, E.; Ravel, M.; Guibert, V.; Issenhuth-Jeanjean, S.; Renaudat, C.; Tourdjman, M.; Septfons, A.; de Valk, H.; Le Hello, S., 2018. Ongoing nationwide outbreak of Salmonella Agona associated with internationally distributed infant milk products, France, December 2017. *Eurosurveillance*, 23 (2): 4-8. http://dx.doi.org/10.2807/1560-7917.es.2018.23.2.17-00852

Julien, C.; Le Douarin, P., 2015. L'alternatif au standard est un poulet différent dans chaque pays européen. *Réussir Aviculture*, Novembre 2015: 2 p.

Juneja, L.R.; Sugino, H.; Fujiki, M.; Kim, M.; Yamamoto, T., 1994. Preparation of pure phospholipids from egg yolk. In: Sim, J.; Nakaï, S., eds. *Egg Uses and Processing Technologies- New Developments*. Oxon (UK): CAB International, 139-149.

Juniper, D.T.; Phipps, R.H.; Bertin, G., 2011. Effect of dietary supplementation with selenium-enriched yeast or sodium selenite on selenium tissue distribution and meat quality in commercial-line turkeys. *Animal*, 5 (11): 1751-1760. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731111000796

Jurado, A.; Garcia, C.; Timon, M.L.; Carrapiso, A.I., 2007. Effect of ripening time and rearing system on amino acid-related flavour compounds of Iberian ham. *Meat Science*, 75 (4): 585-594. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.09.006

Jurie, C.; Ortigues-Marty, I.; Picard, B.; Micol, D.; Hocquette, J.F., 2006. The separate effects of the nature of diet and grazing mobility on metabolic potential of muscles from Charolais steers. *Livestock Science*, 104 (1-2): 182-192. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2006.04.016

Kadam, P.S.; Jadhav, B.A.; Salve, R.V.; Machewad, G.M., 2012. Review on the high pressure technology (HPT) for food preservation. *Journal of Food Processing & Technology*, 3 (1): 135. http://dx.doi.org/10.4172/2157-7110.1000135

Kalac, P., 2012. Carotenoids, ergosterol and tocopherols in fresh and preserved herbage and their transfer to bovine milk fat and adipose tissues: A review. *Journal of Agrobiology*, 29 (1): 1-13. https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/agro.2012.29.issue-1/v10146-012-0001-7/v10146-012-0001-7.xml

Kalogeropoulos, N.; Chiou, A.; Gavala, E.; Christea, M.; Andrikopoulos, N.K., 2010. Nutritional evaluation and bioactive microconstituents (carotenoids, tocopherols, sterols and squalene) of raw and roasted chicken fed on DHA-rich microalgae. *Food Research International*, 43 (8): 2006-2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.018

Kamalam, B.S.; Medale, F.; Larroquet, L.; Corraze, G.; Panserat, S., 2013. Metabolism and Fatty Acid Profile in Fat and Lean Rainbow Trout Lines Fed with Vegetable Oil: Effect of Carbohydrates. *Plos One*, 8 (10). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0076570

Kamiya, Y.; Kamiya, M.; Tanaka, M., 2010. The effect of high ambient temperature on Ca, P and Mg balance and bone turnover in high-yielding dairy cows. *Animal Science Journal*, 81 (4): 482-486. http://dx.doi.org/10.1111/j.1740-0929.2010.00761.x

Karl, H.; Lahrssen-Wiederholt, M., 2013. Factors influencing the intake of dioxins and dioxin-like PCBs via fish consumption in Germany. *Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit-Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 8 (1-2): 27-35. http://dx.doi.org/10.1007/s00003-013-0805-4

Karwowska, M.; Dolatowski, Z.J., 2013. Comparison of lipid and protein oxidation, total iron content and fatty acid profile of conventional and organic pork. *International Journal of Food Science and Technology*, 48 (10): 2200-2206. http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.12205

Kasapidou, E.; Wood, J.D.; Richardson, R.I.; Sinclair, L.A.; Wilkinson, R.G.; Enser, M., 2012. Effect of vitamin E supplementation and diet on fatty acid composition and on meat colour and lipid oxidation of lamb leg steaks displayed in modified atmosphere packs. *Meat Science*, 90 (4): 908-916. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.031

Katikou, P.; Hughes, S.I.; Robb, D.H.F., 2001. Lipid distribution within Atlantic salmon (Salmo salar) fillets. *Aquaculture*, 202 (1-2): 89-99. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(01)00562-2

Kato, A.; Ibrahim, H.R.; Nakamura, S.; Kobayashi, K., 1994. New methods for improving the functionality of egg white proteins. In: Sim, J.; Nakaï, S., eds. *Egg Uses and Processing Technologies- New Developments*. Oxon (UK): CAB International, 250-268.

Kato, A.; Ibrahim, H.R.; Watanabe, H.; Honma, K.; Kobayashi, K., 1989. New approach to improve the gelling and surface functional-properties of dried egg-white by heating in dry state. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 37 (2): 433-437. http://dx.doi.org/10.1021/jf00086a036

Kato, A.; Minaki, K.; Kobayashi, K., 1993. Improvement of emulsifying properties of egg-white proteins by the attachment of polysaccharide through maillard reaction in a dry state. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 41 (4): 540-543. http://dx.doi.org/10.1021/jf00028a006

Kause, A.; Stien, L.H.; Rungruangsak-Torrissen, K.; Ritola, O.; Ruohonen, K.; Kiessling, A., 2008. Image analysis as a tool to facilitate selective breeding of quality traits in rainbow trout. *Livestock Science*, 114 (2-3): 315-324. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2007.05.016

Kawai, T., 1996. Fish flavor. *Critical reviews in food science and nutrition*, 36 (3): 257-298. http://dx.doi.org/10.1080/10408399609527725

Kawata, Y.; Kubota, S., 2018. Consumers' willingness to pay for reprocessed fried chicken: A way of reducing uneaten food. *Appetite*, 120: 571-577. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2017.09.015

Kayaardi, S.; Kundakci, A.; Kayacier, A.; Gok, V., 2006. Sensory and chemical analysis of doner kebab made from turkey meat. *Journal of Muscle Foods*, 17 (2): 165-173. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4573.2006.00040.x

Kayisoglu, S.; Yilmaz, I.; Demirci, M.; Yetim, H., 2003. Chemical composition and microbiological quality of the doner kebabs sold in Tekirdag market. *Food Control*, 14 (7): 469-474. http://dx.doi.org/10.1016/s0956-7135(02)00103-2

Keeton, J.T., 1994. Low-fat meat-products - technological problems with processing. *Meat Science*, 36 (1-2): 261-276. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(94)90045-0

Kempster, A.J., 1981. Fat partition and distribution in the carcasses of cattle, sheep and pigs - A review. *Meat Science*, 5 (2): 83-98. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(81)90007-3

Kerjean, J.R., 2018. Rendement fromager. In: Gillis, J.-C.; Ayerbe, A., eds. *Le Fromage*. Paris: Tec&Doc Lavoisier (4ème édition), 601-613.

Keskekoglu, H.; Uren, A., 2014. Inhibitory effects of pomegranate seed extract on the formation of heterocyclic aromatic amines in beef and chicken meatballs after cooking by four different methods. *Meat Science*, 96 (4): 1446-1451. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.12.004

Keskekoglu, H.; Uren, A., 2017. Inhibitory effects of grape seed extract on the formation of heterocyclic aromatic amines in beef and chicken meatballs cooked by different techniques. *International Journal of Food Properties*, 20: S722-S734. http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2017.1308956

Khan, M.I.; Jo, C.; Tariq, M.R., 2015. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors-A systematic review. *Meat Science*, 110: 278-284. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.08.002

Kiessling, A.; Espe, M.; Ruohonen, K.; Morkore, T., 2004. Texture, gaping and colour of fresh and frozen Atlantic salmon flesh as affected by pre-slaughter iso-eugenol or CO2 anaesthesia. *Aquaculture*, 236 (1-4): 645-657. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.02.030

Kijlstra, A., 2005. The role of organic and free range poultry production systems on the dioxin levels in eggs. *Proceedings of the 3rd SAFO Workshop 16-18 September 2004*. 83-90. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/30687

Kijlstra, A.; Traag, W.A.; Hoogenboom, L.A.P., 2007. Effect of flock size on dioxin levels in eggs from chickens kept outside. *Poultry Science*, 86 (9): 2042-2048. http://dx.doi.org/10.1093/ps/86.9.2042

Kilic, B., 2003. Effect of microbial transglutammase and sodium caseinate on quality of chicken doner kebab. *Meat Science*, 63 (3): 417-421. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00102-x

Kilic, B.; Richards, M.P., 2003. Lipid oxidation in poultry doner kebab: Pro-oxidative and anti-oxidative factors. *Journal of Food Science*, 68 (2): 686-689. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb05732.x

Kim, H.; Do, H.W.; Chung, H., 2017. A Comparison of the Essential Amino Acid Content and the Retention Rate by Chicken Part according to Different Cooking Methods. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37 (5): 626-634. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.5.626

Kim, H.Y.; Kim, K.J.; Lee, J.W.; Kim, G.W.; Choe, J.H.; Kim, H.W.; Yoon, Y.; Kim, C.J., 2015. Quality Evaluation of Chicken Nugget Formulated with Various Contents of Chicken Skin and Wheat Fiber Mixture. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 35 (1): 19-26. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2015.35.1.19

Kim, S.Y.; Choi, J.H.; Choi, Y.S.; Kim, H.Y.; Ahn, K.I.; Kim, H.W.; Kim, T.H.; Song, D.H.; Kim, C.J., 2012. Effects of Low-temperature Tumbling on the Quality Characteristics of Restructured Chicken Breast Ham. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 32 (3): 268-273. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2012.32.3.268

Kim, T.K.; Shim, J.Y.; Hwang, K.E.; Kim, Y.B.; Sung, J.M.; Paik, H.D.; Choi, Y.S., 2018. Effect of hydrocolloids on the quality of restructured hams with duck skin. *Poultry Science*, 97 (12): 4442-4449. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pey309

Kim, Y.H.; Huff-Lonergan, E.; Sebranek, J.G.; Lonergan, S.M., 2010. High-oxygen modified atmosphere packaging system induces lipid and myoglobin oxidation and protein polymerization. *Meat Science*, 85 (4): 759-767. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.001

Kim, Y.H.B.; Stuart, A.; Rosenvold, K.; Maclennan, G., 2013. Effect of forage and retail packaging types on meat quality of long-term chilled lamb loins. *Journal of Animal Science*, 91 (12): 5998-6007. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2013-6780

Kim, Y.H.B.; Warner, R.D.; Rosenvold, K., 2014. Influence of high pre-rigor temperature and fast pH fall on muscle proteins and meat quality: a review. *Animal Production Science*, 54 (4): 375-395. http://dx.doi.org/10.1071/an13329

King, A.J.; Uijttenboogaart, T.G.; Devries, A.W., 1995. Alpha-Tocopherol, Beta-Carotene and Ascorbic-Acid as Antioxidants in Stored Poultry Muscle. *Journal of Food Science*, 60 (5): 1009-1012. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb06281.x

Kiosseoglou, V.D., 1989. Egg yolk. In: Charalambous, G.; Doxastakis, G., eds. *Food emulsifiers: chemistry, technology, functional properties and applications*. London (UK): Elsevier, 63-85.

Kline, L.; Meehan, J.J.; Sugihara, T.F., 1964. Properties of yolk-containing solids with added carbohydrates. *Journal of Food Science*, 29 (6): 693-&. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1964.tb00434.x

Kline, L.; Sugihara, T.F.; Ijichi, K., 1966. Further studies on heat pasteurization of raw liquid egg white. *Food Technology*, 20 (12): 1604-&.

Knust, U.; Pingel, H.; von Lengerken, G., 1997. Investigations on the effect of deboning time on meat quality of ducks. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 61 (5): 232-237.

Kocak, O.; Ekiz, B.; Yalcintan, H.; Yakan, A.; Yilmaz, A., 2016. Carcass and meat quality of organic lambs compared with lambs reared under traditional and intensive production systems. *Animal Production Science*, 56 (1): 38-47. http://dx.doi.org/10.1071/an13555

Koch, G.; Elbers, A.R.W., 2006. Outdoor ranging of poultry: a major risk factor for the introduction and development of High-Pathogenicity Avian Influenza. *Njas-Wageningen Journal of Life Sciences*, 54 (2): 179-194. http://dx.doi.org/10.1016/s1573-5214(06)80021-7

Koczura, M.; Pervier, S.; Manzocchi, E.; Turille, G.; Bruckmaier, R.M.; Kreuzer, M.; Berard, J., 2019. Previous alpine grazing experience of cows has little medium-term effect on feeding behaviour, milk yield and composition in a traditional alpine system. *Italian Journal of Animal Science*, 18 (1): 410-422. http://dx.doi.org/10.1080/1828051x.2018.1532326

Kojima, E.; Nakamura, R., 1985. Heat gelling properties of hens egg-yolk low-density lipoprotein (LDL) in the presence of other protein. *Journal of Food Science*, 50 (1): 63-66. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13278.x

Kole, A.P.W.; Altintzoglou, T.; Schelvis-Smit, R.; Luten, J.B., 2009. The effects of different types of product information on the consumer product evaluation for fresh cod in real life settings. *Food Quality and Preference*, 20 (3): 187-194. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2008.09.003

Kondyli, E.; Katsiari, M.C.; Voutsinas, L.P., 2007. Variations of vitamin and mineral contents in raw goat milk of the indigenous Greek breed during lactation. *Food Chemistry*, 100 (1): 226-230. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.038

Kralik, G.; Pavic, V.; Galovic, D.; Skrtic, Z.; Kralik, Z.; Has-Schon, E., 2012. Fatty acid composition and lipid and protein oxidation products in muscles of broilers fed with different plant oils. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 76 (4): 259-269.

Krasnov, A.; Moghadam, H.; Larsson, T.; Afanasyev, S.; Morkore, T., 2016. Gene expression profiling in melanised sites of Atlantic salmon fillets. *Fish & Shellfish Immunology*, 55: 56-63. http://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2016.05.012

Krempa, A.; Czerniejewska-Surma, B.; Surma, O.; Plust, D.; Zapletal, P., 2019. Effect of cooking methods on sensory and lipid quality of mallard duck meat. *European Poultry Science*, 83: 12. http://dx.doi.org/10.1399/eps.2019.261

Kristensen, L.; Purslow, P.P., 2001. The effect of ageing on the water-holding capacity of pork: role of cytoskeletal proteins. *Meat Science*, 58 (1): 17-23. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(00)00125-x

Kronberg, S.L.; Scholljegerdes, E.J.; Murphy, E.J.; Ward, R.E.; Maddock, T.D.; Schauer, C.S., 2012. Treatment of flaxseed to reduce biohydrogenation of alpha-linolenic acid by ruminal microbes in sheep and cattle, and increase n-3 fatty acid concentrations in red meat. *Journal of Animal Science*, 90 (12): 4618-4624. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2011-4774

Krystallis, A.; de Barcellos, M.D.; Kuegler, J.O.; Verbeke, W.; Grunert, K.G., 2009. Attitudes of European citizens towards pig production systems. *Livestock Science*, 126 (1-3): 46-56. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2009.05.016

Kucukkoyuncu, E.; Okur, A.A.; Tahtabicen, E.; Korkmaz, F.; Samli, H.E., 2017. Comparing quality of free range and battery cage eggs. *European Poultry Science*, 81: 7. http://dx.doi.org/10.1399/eps.2017.197

Kudryavtseva, A.D.; Shelepchikov, A.A.; Brodsky, E.S.; Feshin, D.B.; Rumak, V.S., 2015. Dioxin contamination of bird eggs from different Vietnam provinces. *Moscow University biological sciences bulletin*, 70 (2): 86-90.

Kumar, D.; Tanwar, V.K., 2011a. Effects of incorporation of ground mustard on quality attributes of chicken nuggets. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 48 (6): 759-762. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-010-0149-3

Kumar, D.; Tanwar, V.K., 2011b. Utilization of clove powder as phytopreservative for chicken nuggets preparation. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 2 (1): 11-14.

Kumcuoglu, S.; Cagdas, E., 2015. Effects of grape seed powder and whey protein on quality characteristics of chicken nuggets. *Journal of Food Quality*, 38 (2): 83-93. http://dx.doi.org/10.1111/jfq.12131

Kusche, D.; Kuhnt, K.; Ruebesam, K.; Rohrer, C.; Nierop, A.F.M.; Jahreis, G.; Baars, T., 2015. Fatty acid profiles and antioxidants of organic and conventional milk from low- and high-input systems during outdoor period. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (3): 529-539. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6768

Kuttappan, V.A.; Brewer, V.B.; Mauromoustakos, A.; McKee, S.R.; Emmert, J.L.; Meullenet, J.F.; Owens, C.M., 2013. Estimation of factors associated with the occurrence of white striping in broiler breast fillets. *Poultry Science*, 92 (3): 811-819. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2012-02506

La Ragione, R.M.; Best, A.; Woodward, M.J.; Wales, A.D., 2009. Escherichia coli O157:H7 colonization in small domestic ruminants. *Fems Microbiology Reviews*, 33 (2): 394-410. http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00138.x

Labbe, L.; Lefevre, F.; Bugeon, J.; Fostier, A.; Jamin, M.; Gaume, M., 2014. Rainbow trout farming in Recirculating Aquaculture System (RAS): An innovative and environmental friendly system. *Inra Productions Animales*, 27 (2): 135-145.

Labroue, F.; Goumy, S.; Gruand, J.; Mourot, J.; Neelz, V.; Legault, C., 2000. Comparaison au Large White de 4 races locales porcines françaises pour les performances de croissance, de carcasse et de qualité de la viande. *32. Journées de la Recherche Porcine en France*. Paris, 403-411.

Labunska, I.; Harrad, S.; Santillo, D.; Johnston, P.; Yun, L., 2013. Domestic Duck Eggs: An Important Pathway of Human Exposure to PBDEs around E-Waste and Scrap Metal Processing Areas in Eastern China. *Environmental Science & Technology*, 47 (16): 9258-9266. http://dx.doi.org/10.1021/es402300m

Lacroix, M.; Bon, C.; Bos, C.; Leonil, J.; Benamouzig, R.; Luengo, C.; Fauquant, J.; Tome, D.; Gaudichon, C., 2008. Ultra High Temperature Treatment, but Not Pasteurization, Affects the Postprandial Kinetics of Milk Proteins in Humans. *Journal of Nutrition*, 138 (12): 2342-2347. http://dx.doi.org/10.3945/jn.108.096990

Ladeira, M.M.; Santarosa, L.C.; Chizzotti, M.L.; Ramos, E.M.; Neto, O.R.M.; Oliveira, D.M.; Carvalho, J.R.R.; Lopes, L.S.; Ribeiro, J.S., 2014. Fatty acid profile, color and lipid oxidation of meat from young bulls fed ground soybean or rumen protected fat with or without monensin. *Meat Science*, 96 (1): 597-605. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.062

Ladeira, M.M.; Schoonmaker, J.P.; Gionbelli, M.P.; Dias, J.C.O.; Gionbelli, T.R.S.; Carvalho, J.R.R.; Teixeira, P.D., 2016. Nutrigenomics and Beef Quality: A Review about Lipogenesis. *International Journal of Molecular Sciences*, 17 (6): 21. http://dx.doi.org/10.3390/ijms17060918

Lai, C.C.; Gilbert, S.G.; Mannheim, C.H., 1985. Effect of composition on the flow properties of egg powders. *Journal of Food Science*, 50 (6): 1618-&. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb10547.x

Laithier C. (coord.), 2011. *Microflore du lait cru, vers une meilleure connaissance des écosystèmes microbiens du lait et de leurs facteurs de variation*. CNAOL, 131 p. http://www.rmtfromagesdeterroirs.com/themes-de-travail/microflores-des-laits-et-des-fromages/

Lall, S.P., 2010. The health benefits of farmed salmon: fish oil decontamination processing removes persistent organic pollutants. *British Journal of Nutrition*, 103 (10): 1391-1392. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114510000140

Lanza, M.; Bella, M.; Priolo, A.; Barbagallo, D.; Galofaro, V.; Landi, C.; Pennisi, P., 2006. Lamb meat quality as affected by a natural or artificial milk feeding regime. *Meat Science*, 73 (2): 313-318. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.12.006

Larsson, T.; Krasnov, A.; Lerfall, J.; Taksdal, T.; Pedersen, M.; Morkore, T., 2012. Fillet quality and gene transcriptome profiling of heart tissue of Atlantic salmon with pancreas disease (PD). *Aquaculture*, 330: 82-91. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.12.016

Larzul, C.; Rousset-Akrim, S.; Le Roy, P.; Gogué, J.M.; Talmant, A.; Vernin, P.; Touraille, C.; Monin, G.; Sellier, P., 1996. Effet du génotype halothane sur la texture de la viande de porc. *28. Journées de la Recherche Porcine en France*. Paris, 39-44.

Latorre, M.A.; Garcia-Belenguer, E.; Arino, L., 2008. The effects of sex and slaughter weight on growth performance and carcass traits of pigs intended for dry-cured ham from Teruel (Spain). *Journal of Animal Science*, 86 (8): 1933-1942. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2007-0764

Latou, E.; Mexis, S.F.; Badeka, A.V.; Kontakos, S.; Kontominas, M.G., 2014. Combined effect of chitosan and modified atmosphere packaging for shelf life extension of chicken breast fillets. *Lwt-Food Science and Technology*, 55 (1): 263-268. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.09.010

Latter-Dubois J., 2000. *Poulets fermiers : leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques et la perception du consommateur*. Université de Laval, Québec, Canada. 85 p.

Laurent, C.; Graulet, B.; Caillat, H.; Girard, C.L.; Jost, J.; Bossis, N.; Lecaro, L.; Ferlay, A., 2019. Characterization of milk goat composition according to feeding systems in Western France. *EAAP 2019 - 70th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*. Ghent, Belgium, 26-30 August 2019.

Laurent, F.; Coomans, D.; Gardeur, J.N.; Vignon, B., 1992. Composition azotée et caractéristiques technologiques du lait de vache en relation avec la nature et le niveau d'apport de l'aliment concentré. *Lait*, 72 (2): 175-183. https://lait.dairy-journal.org/articles/lait/pdf/1992/02/lait_72_1992_2_12.pdf

Lauridsen, C.; Jensen, C.; Jakobsen, K.; Engberg, R.M.; Andersen, J.O.; Jesnen, S.K.; Sorensen, P.; Henckel, P.; Skibsted, L.H.; Bertelsen, G., 1997. The influence of vitamin C on the antioxidative status of chickens in vivo, at slaughter and on the oxidative stability of broiler meat products. *Acta Agriculturae Scandinavica Section a-Animal Science*, 47 (3): 187-196. http://dx.doi.org/10.1080/09064709709362385

Lauzurica, S.; de la Fuente, J.; Diaz, M.T.; Alvarez, I.; Perez, C.; Caneque, V., 2005. Effect of dietary supplementation of vitamin E on characteristics of lamb meat packed under modified atmosphere. *Meat Science*, 70 (4): 639-646. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.02.013

Lavelle, C.L.; Hunt, M.C.; Kropf, D.H., 1995. Display life and internal cooked color of ground beef from vitamin E-supplemented steers. *Journal of Food Science*, 60 (6): 1175-&. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb04549.x

Laverroux, S.; Vallet, J.; Chassaing, C.; Girard, C.; Agabriel, C.; Martin, B.; Graulet, B., 2014. Riboflavin secretion in cow's milk varies according to diet composition and season. *Joint Meeting of FAO-CIHEAM Mountain Pastures and Mediterranean Forages Resources Networks and Mountain Cheese Network,* . Lempdes, FRA, 2014-06-24 - 2014-06-26.

Laville, E.; Sayd, T.; Sante-Lhoutellier, V.; Morzel, M.; Labas, R.; Franck, M.; Chambon, C.; Monin, G., 2005. Characterisation of PSE zones in semimembranosus pig muscle. *Meat Science*, 70 (1): 167-172. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.12.008

Lawless, F.; Stanton, C.; L'Escop, P.; Devery, R.; Dillon, P.; Murphy, J.J., 1999. Influence of breed on bovine milk cis-9, trans-11-conjugated linoleic acid content. *Livestock Production Science*, 62 (1): 43-49. http://dx.doi.org/10.1016/s0301-6226(99)00053-6

Lawrie, R.A., 1991. The Eating Quality of Meat. *Lawrie´s Meat Science (Fifth Edition)*. Oxford: Pergamon Press, 329-356. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100694-8.00011-X

Lawrie, R.A.; Ledward, D.A., 2006. *Lawrie's Meat Science*. Cambridge, England: Woodhead Publishing (Series in Food Science, Technology and Nutrition), 442 p.

Lazo, O.; Guerrero, L.; Alexi, N.; Grigorakis, K.; Claret, A.; Perez, J.A.; Bou, R., 2017. Sensory characterization, physico-chemical properties and somatic yields of five emerging fish species. *Food Research International*, 100: 396-406. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.023

Le Bihan-Duval, E.; Berri, C.; Baeza, E.; Millet, N.; Beaumont, C., 2001. Estimation of the genetic parameters of meat characteristics and of their genetic correlations with growth and body composition in an experimental broiler line. *Poultry Science*, 80 (7): 839-843. http://dx.doi.org/10.1093/ps/80.7.839

Le Bihan-Duval, E.; Debut, M.; Berri, C.M.; Sellier, N.; Sante-Lhoutellier, V.; Jego, Y.; Beaumont, C., 2008. Chicken meat quality: genetic variability and relationship with growth and muscle characteristics. *Bmc Genetics*, 10: 6. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2156-9-53

Le Bihan-Duval, E.; Nadaf, J.; Berri, C.; Pitel, F.; Graulet, B.; Godet, E.; Leroux, S.Y.; Demeure, O.; Lagarrigue, S.; Duby, C.; Cogburn, L.A.; Beaumont, C.M.; Duclos, M.J., 2011. Detection of a Cis eQTL Controlling BMCO1 Gene Expression Leads to the Identification of a QTG for Chicken Breast Meat Color. *Plos One*, 6 (7): 10. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0014825

Le Denmat, M.; Anton, M.; Gandemer, G., 1999. Protein denaturation and emulsifying properties of plasma and granules of egg yolk as related to heat treatment. *Journal of Food Science*, 64 (2): 194-197.

Le Roy, P.; Elsen, J.M.; Caritez, J.C.; Talmant, A.; Juin, H.; Sellier, P.; Monin, G., 2000. Comparison between the three porcine RN genotypes for growth, carcass composition and meat quality traits. *Genetics Selection Evolution*, 32 (2): 165-186. http://dx.doi.org/10.1186/1297-9686-32-2-165

Lebret, B., 2004. Rationalization of pig production: consequences on meat quality. *Inra Productions Animales*, 17 (2): 79-91.

Lebret, B., 2008. Effects of feeding and rearing systems on growth, carcass composition and meat quality in pigs. *Animal*, 2 (10): 1548-1558. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731108002796

Lebret, B.; Batonon-Alavo, D.I.; Perruchot, M.H.; Mercier, Y.; Gondret, F., 2018a. Improving pork quality traits by a short-term dietary hydroxy methionine supplementation at levels above growth requirements in finisher pigs. *Meat Science*, 145: 230-237. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.040

Lebret, B.; Ecolan, P.; Bonhomme, N.; Meteau, K.; Prunier, A., 2015a. Influence of production system in local and conventional pig breeds on stress indicators at slaughter, muscle and meat traits and pork eating quality. *Animal*, 9 (8): 1404-1413. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115000609

Lebret, B.; Ecolan, P.; Bonhomme, N.; Pollet, P.Y.; Dourmad, J.Y., 2013. Quality of fresh pork and dry-cured ham: interactive effects of pig breed (Basque or Large White) and production system (conventional, alternative, extensive. *Acta agriculturae Slovenica*, Suppl. 4 (Proc. 8th International Symposium on the Mediterranean Pig, 10-12 October, Ljubljana, Slovenia.): 77-80. http://aas.bf.uni-lj.si/zootehnika/supl/4-2013/PDF/4-2013-77-80.pdf

Lebret, B.; Faure, J., 2015. Pork and pork products: how to fulfill a variety of quality demands? *Inra Productions Animales*, 28 (2): 111-114.

Lebret, B.; Kallas, Z.; Lenoir, H.; Perruchot, M.H.; Vitale, M.; Oliver, M.A., 2018b. Consumers' study on traditional pork products from local breeds: expectations and hedonic evaluation. *69. Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Book of Abstracts* Dubrovnik, Croatia, 26-31 August, p. 492.

Lebret, B.; Lefaucheur, L.; Mourot, J., 1999. Pig meat quality. Influence of rearing factors on skeletal muscle traits. *Inra Productions Animales*, 12 (1): 11-28.

Lebret, B.; Lenoir, H.; Daré, S.; Fonseca, A.; Mercat, M.J., 2019a. Qualité des produits de porcs gascons élevés en système d'élevage extensif de la filière Noir de Bigorre : effets de la saison et des ressources alimentaires. *51. Journées de la Recherche Porcine*. Paris, 5-6 février 2019, 217-222.

Lebret, B.; Mourot, J., 1998. Characteristics and quality of pig adipose tissues. Influence of rearing factors. *Inra Productions Animales*, 11 (2): 131-143.

Lebret, B.; Picard, B., 2015. The main components of carcasses and meat quality in various animal species. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 93-98.

Lebret, B.; Prache, S.; Berri, C.; Lefevre, F.; Bauchart, D.; Picard, B.; Corraze, G.; Medale, F.; Faure, J.; Alami-Durante, H., 2015b. Meat quality: influence of animals' characteristics and rearing conditions. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 151-168.

Lebret, B.; Prunier, A.; Bonhomme, N.; Foury, A.; Mormede, P.; Dourmad, J.Y., 2011. Physiological traits and meat quality of pigs as affected by genotype and housing system. *Meat Science*, 88 (1): 14-22. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.025

Lebret, B.; Pugliese, C.; Candek-Potokar, M., 2019b. Quality of pork from European local pig breeds: analytical study on the average and variability of sensory, technological and nutritional traits within and between breeds - TREASURE project. Submitted. *10. International Symposium on Mediterranean Pig*. Florence, Italy, 16-19 October 2019.

Lechevalier, V.; Perinel, E.; Jeantet, R.; Lesaffre, C.; Croguennec, T.; Guerin-Dubiard, C.; Nau, F., 2005. Statistical analysis of effects of industrial processing steps on functional properties of pasteurised liquid egg white. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (5): 757-769. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2042

Lecuyer, B.; Legendre, V., 2015. La charcuterie-salaison en Europe: principales caractéristiques de différents pays producteurs. *Les Cahiers de l'IFIP*, 2 (2): 1-16.

Lee, A.P.; Barbano, D.M.; Drake, M.A., 2017. The influence of ultra-pasteurization by indirect heating versus direct steam injection on skim and 2% fat milks. *Journal of Dairy Science*, 100 (3): 1688-1701. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-11899

Lee, S.H.; Joo, S.T.; Ryu, Y.C., 2010. Skeletal muscle fiber type and myofibrillar proteins in relation to meat quality. *Meat Science*, 86 (1): 166-170. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.040

Lefaucheur, L., 2010. A second look into fibre typing - Relation to meat quality. *Meat Science*, 84 (2): 257-270. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.004

Lefevre, F.; Aubin, J.; Louis, W.; Labbe, L.; Bugeon, J., 2007. Moderate hypoxia or hyperoxia affect fillet yield and the proportion of red muscle in rainbow trout. *Cybium*, 31 (2): 237-243.

Lefevre, F.; Bugeon, J.; Auperin, B.; Aubin, J., 2008. Rearing oxygen level and slaughter stress effects on rainbow trout flesh quality. *Aquaculture*, 284 (1-4): 81-89. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.07.017

Lefevre, F.; Cardinal, M.; Bugeon, J.; Labbe, L.; Medale, F.; Quillet, E., 2015. Selection for muscle fat content and triploidy affect flesh quality in pan-size rainbow trout, Oncorhynchus mykiss. *Aquaculture*, 448: 569-577. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.06.029

Lefevre, F.; Cos, I.; Pottinger, T.G.; Bugeon, J., 2016. Selection for stress responsiveness and slaughter stress affect flesh quality in pan-size rainbow trout, Oncorhynchus mykiss. *Aquaculture*, 464: 654-664. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.07.039

Lefrileux, Y.; Pommaret, A.; Raynaud, S., 2008. Impacts de la monotraite dans une exploitation caprine fromagère à haut niveau de production. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 167-170. http://journees3r.fr/IMG/pdf/2008_05_systemes_09_Lefrileux.pdf

Legarto, J.; Gele, M.; Ferlay, A.; Hurtaud, C.; Lagriffoul, G.; Palhiere, I.; Peyraud, J.L.; Rouille, B.; Brunschwig, P., 2014. Effects of farming systems on fatty acid composition of cow, goat and ewe milk evaluated with mid-infrared spectroscopy. *Inra Productions Animales*, 27 (4): 269-282.

Legendre, V.; Sans, P.; Barrey, S.; Boutin, B., 2017. Controversies on meat consumption : lessons from a sociological perspective. *Inra Productions Animales*, 30 (5): 479-786.

Lenoir, J.; Lamberet, G.; Schmidt, J.L., 1983. L'élaboration d'un fromage: l'exemple du camembert. *Pour la Science*, 69: 30-42.

Lerch, S.; Ferlay, A.; Graulet, B.; Cirie, C.; Verdier-Metz, I.; Monte, M.C.; Chilliard, Y.; Martin, B., 2015. Extruded linseeds, vitamin E and plant extracts in corn silage-based diets of dairy cows: Effects on sensory properties of raw milk and uncooked pressed cheese. *International Dairy Journal*, 51: 65-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.07.006

Lerfall, J.; Bendiksen, E.A.; Olsen, J.V.; Morrice, D.; Osterlie, M., 2016. A comparative study of organic- versus conventional farmed Atlantic salmon. I. Pigment and lipid content and composition, and carotenoid stability in ice-stored fillets. *Aquaculture*, 451: 170-177. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.09.013

Lerfall, J.; Hasli, P.R.; Skare, E.F.; Olsen, R.E.; Rotabakk, B.T.; Roth, B.; Slinde, E.; Egelandsdal, B., 2017. A comparative study of diploid versus triploid Atlantic salmon (Salmo solar L.). The effects of rearing temperatures (5, 10 and 15 degrees C) on raw material characteristics and storage quality. *Food Chemistry*, 225: 37-44. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.012

Lerfall, J.; Larsson, T.; Birkeland, S.; Taksdal, T.; Dalgaard, P.; Afanasyev, S.; Bjerke, M.T.; Morkore, T., 2012. Effect of pancreas disease (PD) on quality attributes of raw and smoked fillets of Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture*, 324: 209-217. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.003

Lessire, M., 2001. Dietary fats and poultry fatty acid composition. *Productions Animales*, 14 (5): 365-370.

Lessire, M.; Méda, B.; Dusart, L.; Hallouis, J.M.; Bordeau, T.; Souchet, C.; Mercerand, F.; Hatte, C.; Bouvarel, I.; Berri, C., 2015. Remplacement du tourteau de soja par des matières premières riches en protéines : Evaluation multicritère chez le poulet de chair à croissance intermédiaire. *11. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, 893-898.

Lessire, M.; Primot, Y.; Corrent, E.; Fraysse, P.; Tesseraud, S.; Berri, C., 2013. Lysine supply in finishing broilers: effect on performances and meat quality. *4. EAAP International Symposium on Energy and Protein Metabolism and Nutrition*. Sacramento. Wageningen Academic Publishers, 209-210.

Levsen, A.; Cipriani, P.; Mattiucci, S.; Gay, M.; Hastie, L.C.; MacKenzie, K.; Pierce, G.J.; Svanevik, C.S.; Hojgaard, D.P.; Nascetti, G.; Gonzalez, A.F.; Pascual, S., 2018. Anisakis species composition and infection characteristics in Atlantic mackerel, Scomber scombrus, from major European fishing grounds - reflecting changing fish host distribution and migration pattern. *Fisheries Research*, 202: 112-121. http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2017.07.030

Li, C.T.; Shang, M.; Hu, X.S.; Ge, Y.L.; Jia, Z.Y.; Wang, S.H.; Shi, L.Y., 2018. Evaluation of a new select-breeding carp variety with high fillet quality. *Aquaculture Research*, 49 (8): 2653-2663. http://dx.doi.org/10.1111/are.13723

Li, X.J.; Bickerdike, R.; Lindsay, E.; Campbell, P.; Nickell, D.; Dingwall, A.; Johnston, I.A., 2005. Hydroxylysyl pyridinoline cross-link concentration affects the textural properties of fresh and smoked Atlantic salmon (Salmo salar L.) flesh. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (17): 6844-6850. http://dx.doi.org/10.1021/jf050743+

Li, X.J.; Bickerdike, R.; Nickell, D.; Campbell, P.; Dingwall, A.; Johnston, I.A., 2007. Investigations on the effects of growth rate and dietary vitamin C on skeletal muscle collagen and hydroxylysyl pyridinoline cross-link concentration in farmed Atlantic salmon (Salmo salar). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (2): 510-515. http://dx.doi.org/10.1021/jf062251i

Li, Y.; Zhang, H.; Chen, Y.P.; Ying, Z.X.; Su, W.P.; Zhang, L.L.; Wang, T., 2017. Effects of dietary L-methionine supplementation on the growth performance, carcass characteristics, meat quality, and muscular antioxidant capacity and myogenic gene expression in low birth weight pigs. *Journal of Animal Science*, 95 (9): 3972-3983. http://dx.doi.org/10.2527/jas2017.1652

Lian, T.; Wang, L.J.; Liu, Y.P., 2013. A New Insight into the Role of Calpains in Post-mortem Meat Tenderization in Domestic Animals: A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 26 (3): 443-454. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.2012.12365

Liao, G.Z.; Wang, G.Y.; Xu, X.L.; Zhou, G.H., 2010. Effect of cooking methods on the formation of heterocyclic aromatic amines in chicken and duck breast. *Meat Science*, 85 (1): 149-154. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.12.018

Liao, G.Z.; Wang, G.Y.; Zhang, Y.J.; Xu, X.L.; Zhou, G.H., 2012. Formation of heterocyclic amines during cooking of duck meat. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 29 (11): 1668-1678. http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2012.702928

Lim, K.C.; Yusoff, F.M.; Shariff, M.; Kamarudin, M.S., 2018. Astaxanthin as feed supplement in aquatic animals. *Reviews in Aquaculture*, 10 (3): 738-773. http://dx.doi.org/10.1111/raq.12200

Lindholm-Lehto, P.C.; Vielma, J., 2019. Controlling of geosmin and 2-methylisoborneol induced off-flavours in recirculating aquaculture system farmed fish-A review. *Aquaculture Research*, 50 (1): 9-28. http://dx.doi.org/10.1111/are.13881

Lines, J.A.; Spence, J., 2012. Safeguarding the welfare of farmed fish at harvest. *Fish Physiology and Biochemistry*, 38 (1): 153-162. http://dx.doi.org/10.1007/s10695-011-9561-5

Linhartova, Z.; Lunda, R.; Masilko, J.; Dvorak, P.; Lundova, K.; Stejskal, V.; Matousek, J.; Mraz, J., 2018. Impact of photostimulation for delayed maturity on flesh quality of brook trout (Salvelinus fontinalis) stored under refrigerated conditions. *Aquaculture Research*, 49 (12): 3817-3829. http://dx.doi.org/10.1111/are.13848

Listrat, A.; Lebret, B.; Louveau, I.; Astruc, T.; Bonnet, M.; Lefaucheur, L.; Bugeon, J., 2015. How muscle structure and composition determine meat quality. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 125-136.

Litherland, A.J.; Dynes, R.A.; Moss, R.A., 2010. Factors affecting dressin-out percentage of lambs. *Proceddings of the New Zealand Society of Animal Production*, 70: 121-126.

Liu, Q.; Lanari, M.C.; Schaefer, D.M., 1995. A review of dietary vitamin-e supplementation for improvement of beef quality. *Journal of Animal Science*, 73 (10): 3131-3140.

Lobon, S.; Blanco, M.; Sanz, A.; Ripoll, G.; Joy, M., 2019. Effects of feeding strategies during lactation and the inclusion of quebracho in the fattening on performance and carcass traits in light lambs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99 (1): 457-463. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.9207

Lock, E.R.; Arsiwalla, T.; Waagbo, R., 2016. Insect larvae meal as an alternative source of nutrients in the diet of Atlantic salmon (Salmo salar) postsmolt. *Aquaculture Nutrition*, 22 (6): 1202-1213. http://dx.doi.org/10.1111/anu.12343

Lonergan, E.H.; Zhang, W.A.; Lonergan, S.M., 2010. Biochemistry of postmortem muscle - Lessons on mechanisms of meat tenderization. *Meat Science*, 86 (1): 184-195. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.004

Lonergan, S.M.; Topel, D.G.; Marple, D.N.; Lonergan, S.M.; Topel, D.G.; Marple, D.N., 2019. Intrinsic cues of fresh meat quality. *Science of Animal Growth and Meat Technology, 2nd Edition*. London: Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd, 147-162. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-815277-5.00009-3

Looten, P.H.; Wils, D.; Saniez, M.H.; Nys, Y., 2003. Xanthophyll profile of corn gluten meal throughout the year and transfer yield into egg yolk. *Proceedings of 16th European Symposium on the Quality of Poultry Meat and 10th European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products, WPSA Branche Française, Nouzilly*. Saint-Brieuc (FR), 186-191 et 949-954 (poster).

Lopez-Bote, C.J., 1998. Sustained utilization of the Iberian pig breed. *Meat Science*, 49: S17-S27. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00072-2

Lopez-Ferrer, S.; Baucells, M.D.; Barroeta, A.C.; Galobart, J.; Grashorn, M.A., 2001a. n-3 enrichment of chicken meat. 2. Use of precursors of long-chain polyunsaturated fatty acids: Linseed oil. *Poultry Science*, 80 (6): 753-761. http://dx.doi.org/10.1093/ps/80.6.753

Lopez-Ferrer, S.; Baucells, M.D.; Barroeta, A.C.; Grashorn, M.A., 2001b. n-3 enrichment of chicken meat. 1. Use of very long-chain fatty acids in chicken diets and their influence on meat quality: Fish oil. *Poultry Science*, 80 (6): 741-752. http://dx.doi.org/10.1093/ps/80.6.741

Lopez-Luna, J.; Torrent, F.; Villarroel, M., 2014. Fasting up to 34 degrees C days in rainbow trout, Oncorhynchus mykiss, has little effect on flesh quality. *Aquaculture*, 420: 63-70. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.10.037

Lopez, A.; Vasconi, M.; Moretti, V.M.; Bellagamba, F., 2019. Fatty Acid Profile in Goat Milk from High- and Low-Input Conventional and Organic Systems. *Animals*, 9 (7). http://dx.doi.org/10.3390/ani9070452

Lopez, C., 2005. Focus on the supramolecular structure of milk fat in dairy products. *Reproduction Nutrition Development*, 45 (4): 497-511. http://dx.doi.org/10.1051/rnd:2005034

Lopez, C.; Michalski, M.C., 2018. Lipides. In: Gillis, J.-C.; Ayerbe, A., eds. *Le fromage*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (4ème édition), 843-863.

Loss, G.; Depner, M.; Ulfman, L.H.; van Neerven, R.J.J.; Hose, A.J.; Genuneit, J.; Karvonen, A.M.; Hyvarinen, A.; Kaulek, V.; Roduit, C.; Weber, J.; Lauener, R.; Pfefferle, P.I.; Pekkanen, J.; Vaarala, O.; Dalphin, J.C.; Riedler, J.; Braun-Fahrlander, C.; von Mutius, E.; Ege, M.J.; Grp, P.S., 2015. Consumption of unprocessed cow's milk protects infants from common respiratory infections. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 135 (1): 56-U487. http://dx.doi.org/10.1016/j.jaci.2014.08.044

Lourenco, M.; Van Ranst, G.; De Smet, S.; Raes, K.; Fievez, V., 2007. Effect of grazing pastures with different botanical composition by lambs on rumen fatty acid metabolism and fatty acid pattern of longissimus muscle and subcultaneous fat. *Animal*, 1 (4): 537-545. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731107703531

Lovett, A.A.; Foxall, C.D.; Creaser, C.S.; Chewe, D., 1998. PCB and PCDD/DF concentrations in egg and poultry meat samples from known urban and rural locations in Wales and England. *Chemosphere*, 37 (9-12): 1671-1685. http://dx.doi.org/10.1016/s0045-6535(98)00233-1

Lu, F.; Kuhnle, G.K.; Cheng, Q.F., 2018a. The effect of common spices and meat type on the formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in deep-fried meatballs. *Food Control*, 92: 399-411. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.05.018

Lu, J.; Pickova, J.; Vazquez-Gutierrez, J.L.; Langton, M., 2018b. Influence of seasonal variation and ultra high temperature processing on lipid profile and fat globule structure of Swedish cow milk. *Food Chemistry*, 239: 848-857. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.018

Luber, P., 2009. Cross-contamination versus undercooking of poultry meat or eggs - which risks need to be managed first? *International Journal of Food Microbiology*, 134 (1-2): 21-28. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.02.012

Lucas, A.; Hulin, S.; Michel, V.; Agabriel, C.; Chamba, J.F.; Rock, E.; Coulon, J.B., 2006. Relationships betwwen the conditions of milk production and the contents of nutritional constituents in cheese: study under real conditions of production. *Productions Animales*, 19 (1): 15-28.

Lucey, J., 1996. Cheesemaking from grass based seasonal milk and problems associated with late-lactation milk. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 49 (2): 59-64.

Luciano, G.; Monahan, F.J.; Vasta, V.; Pennisi, P.; Bella, M.; Priolo, A., 2009. Lipid and colour stability of meat from lambs fed fresh herbage or concentrate. *Meat Science*, 82 (2): 193-199. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.01.010

Lund, B.L.W.; Meinert, L.; Borggard, C. 2018. Simultaneous detection of off-note or boar taint related compounds in animal tissue. Brevet n°Brevet US 2018/0045701 A1. https://patents.google.com/patent/US20180045701A1/en?q=indole&q=skatole&q=androstenone&before=publication:20181231&after=publication

Lund, E.K., 2013. Health benefits of seafood; Is it just the fatty acids? *Food Chemistry*, 140 (3): 413-420. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.034

Lundebye, A.K.; Lock, E.J.; Rasinger, J.D.; Nostbakken, O.J.; Hannisdal, R.; Karlsbakk, E.; Wennevik, V.; Madhun, A.S.; Madsen, L.; Graff, I.E.; Ornsrud, R., 2017. Lower levels of Persistent Organic Pollutants, metals and the marine omega 3-fatty acid DHA in farmed compared to wild Atlantic salmon (Salmo salar). *Environmental Research*, 155: 49-59. http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.026

Lundstrom, K.; Andersson, A.; Hansson, I., 1996. Effect of the RN gene on technological and sensory meat quality in crossbred pigs with Hampshire as terminal sire. *Meat Science*, 42 (2): 145-153. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(95)00034-8

Lundstrom, K.; Matthews, K.R.; Haugen, J.E., 2009. Pig meat quality from entire males. *Animal*, 3 (11): 1497-1507. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109990693

Lupo, C.; Le Bouquin, S.; Bougeard, S.; Balaine, L.; Gilli-Dunoyer, P.; Hérau, V.; Michel, V.; Péraste, J.; Petetin, I.; Colin, P., 2010. Une approche épidémiologique de l'inspection sanitaire des volailles à l'abattoir. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation*, 41: 2-5.

Luzardo, O.P.; Rodriguez-Hernandez, A.; Quesada-Tacoronte, Y.; Ruiz-Suarez, N.; Almeida-Gonzalez, M.; Henriquez-Hernandez, L.A.; Zumbado, M.; Boada, L.D., 2013. Influence of the method of production of eggs on the daily intake of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine contaminants: An independent study in the Canary Islands (Spain). *Food and Chemical Toxicology*, 60: 455-462. http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2013.08.003

Lyytikainen, O.; Autio, T.; Maijala, R.; Ruutu, P.; Honkanen-Buzalski, T.; Miettinen, M.; Hatakka, M.; Mikkola, J.; Anttila, V.J.; Johansson, T.; Rantala, L.; Aalto, T.; Korkeala, H.; Siitonen, A., 2000. An outbreak of Listeria monocytogenes serotype 3a infections from butter in Finland. *Journal of Infectious Diseases*, 181 (5): 1838-1841. http://dx.doi.org/10.1086/315453

Maarse, H.; Visscher, C.A., 1989. *Volatile Compounds in Food: Qualitative and Quantitative Data: Alcoholic Beverges*: TNO-CIVO Food Analysis Institute.

Macari, S.; Graulet, B.; Andueza, D.; Prache, S., 2017. Nitrogen stable isotope and carotenoid pigments signatures in the meat as tools to trace back the diet: Comparison between two sheep breeds. *Small Ruminant Research*, 153: 107-113. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.05.013

Mach, D.T.N.; Nortvedt, R., 2013. Comparison of fillet composition and initial estimation of shelf life of cobia (Rachycentron canadum) fed raw fish or fish silage moist diets. *Aquaculture Nutrition*, 19 (3): 333-342. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2095.2012.00969.x

Macheboeuf, D.; Coulon, J.B.; D'hour, P., 1993. Aptitude à la coagulation du lait de vache. Influence de la race, des variants génétiques des lactoprotéines du lait, de l'alimentation et du numéro de lactation. *Inra Productions Animales*, 6: 333-344. https://www6.inrae.fr/productions-animales/layout/set/print/content/download/4662/45093/version/2/file/Prod_Anim_1993_6_5_03.pdf

Macierzanka, A.; Sancho, A.I.; Mills, E.N.C.; Rigby, N.M.; Mackie, A.R., 2009. Emulsification alters simulated gastrointestinal proteolysis of beta-casein and beta-lactoglobulin. *Soft Matter*, 5 (3): 538-550. http://dx.doi.org/10.1039/b811233a

MacLeod, G., 1994. The flavour of beef. In: Shahidi, F., ed. *Flavor of meat and meat products*. London: Chapman and Hall, 4-37.

Maga, J.A., 1982. Egg and egg product flavor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 30 (1): 9-14. http://dx.doi.org/10.1021/jf00109a002

Magdelaine, P., 2017. *Marché de l'œuf et des ovoproduits : Bilan 2016. Note de conjoncture Avril 2017*: Service économie ITAVI, 1-15.

Magdelaine, P.; Roguet, C.; Dockes, A.C.; Delanoue, E., 2018. La controverse sur l'élevage. Principaux enseignements du projet ACCEPT. *Tema*, 47: 9 p. http://accept.ifip.asso.fr/docs/publication/magdelaine_tema_n_47_vf.pdf

Magnin, M.; Le Dain, C.; Mahieu, A.; Jeanmichel, P.; Legrand, G., 2013. Durabilité de la production de poulets de chair : application pratique d'un système d'analyse et de diagnostic. *10. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. La Rochelle, France, 26-28/03/2013, 89-93. https://www.itavi.asso.fr/download/7804

Maharani, D.; Jo, C.; Jeon, J.T.; Lee, J.H., 2011. Quantitative Trait Loci and Candidate Genes Affecting Fatty Acid Composition in Cattle and Pig. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 31 (3): 325-338. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2011.31.3.325

Malissiova, E.; Papadopoulos, T.; Kyriazi, A.; Mparda, M.; Sakorafa, C.; Katsioulis, A.; Katsiaflaka, A.; Kyritsi, M.; Zdragas, A.; Hadjichristodoulou, C., 2017. Differences in sheep and goats milk microbiological profile between conventional and organic farming systems in Greece. *Journal of Dairy Research*, 84 (2): 206-213. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029917000103

Mallet, S.; Huneau-Salaun, A.; Herman, L.; De Reu, K., 2010. Laying hen breeding systems and hygienic status of the eggs. *Productions Animales*, 23 (2): 183-191.

Mancini, R.A.; Hunt, M.C., 2005. Current research in meat color. *Meat Science*, 71 (1): 100-121. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.03.003

Mannen, H., 2011. Identification and utilization of genes associated with beef qualities. *Animal Science Journal*, 82 (1): 1-7. http://dx.doi.org/10.1111/j.1740-0929.2010.00845.x

Mannen, H., 2012. Genes Associated with Fatty Acid Composition of Beef. *Food Science and Technology Research*, 18 (1): 1-6. http://dx.doi.org/10.3136/fstr.18.1

Manni, K.; Rinne, M.; Huuskonen, A.; Huhtanen, P.; G, C.I.V.P., 2018. Effects of contrasting concentrate feeding strategies on meat quality of growing and finishing dairy bulls offered grass silage and barley based diets. *Meat Science*, 143: 184-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.033

Manor, M.L.; Cleveland, B.M.; Kenney, P.B.; Yao, J.B.; Leeds, T., 2015. Differences in growth, fillet quality, and fatty acid metabolism-related gene expression between juvenile male and female rainbow trout. *Fish Physiology and Biochemistry*, 41 (2): 533-547. http://dx.doi.org/10.1007/s10695-015-0027-z

Manso, T.; Gallardo, B.; Guerra-Rivas, C., 2016. Modifying milk and meat fat quality through feed changes. *Small Ruminant Research*, 142: 31-37. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2016.03.003

Marangoni, F.; Corsello, G.; Cricelli, C.; Ferrara, N.; Ghiselli, A.; Lucchin, L.; Poli, A., 2015. Role of poultry meat in a balanced diet aimed at maintaining health and wellbeing: an Italian consensus document. *Food & Nutrition Research*, 59: 11. http://dx.doi.org/10.3402/fnr.v59.27606

Marcinkowska-Lesiak, M.; Zdanowska-Sasiadek, Z.; Stelmasiak, A.; Damaziak, K.; Michalczuk, M.; Polawska, E.; Wyrwisz, J.; Wierzbicka, A., 2016. Effect of packaging method and cold-storage time on chicken meat quality. *Cyta-Journal of Food*, 14 (1): 41-46. http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2015.1042054

Marie, C.; Delacroix-Buchet, A., 1994. Comparaison des variants A et C de la caséine β des laits de vaches tarentaises en modèle fromager de type Beaufort. II. Protéolyse et qualité des fromages. *Lait*, 74 (6): 443-459.

Marion, J.E.l.; Woodroof, J.G., 1963. Fatty acid composition of breast, thigh, and skin tissues of chicken broilers as influenced by dietary fats. *Poultry Science*, 42 (5): 1202-1207. http://dx.doi.org/10.3382/ps.0421202

Martelli, M.R.; Carvalho, R.A.; Sobral, P.J.A.; Santos, J.S., 2008. Reduction of oil uptake in deep fat fried chicken nuggets using edible coatings based on cassava starch and methylcellulose. *Italian Journal of Food Science*, 20 (1): 111-117.

Martelli, R.; Franci, O.; Lupi, P.; Faccenda, F.; Parisi, G., 2014. Physico-chemical traits of raw and cooked fillets of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) from different strains and farms. *Italian Journal of Animal Science*, 13 (3): 10. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2014.3417

Martin, B.; Coulon, J.B.; Chamba, J.F.; Bugaud, C., 1997. Effect of milk urea content on characteristics of matured Reblochon cheeses. *Lait*, 77 (4): 505-514.

Martin, B.; Graulet, B.; Uijttewaal, A.; Ferlay, A.; Coppa, M.; Rémond, D., 2019. Contribution of dairy products to dietary intakes and the influence of dairy cow forage. *Fourrages*, (239): 193-202.

Martin, B.; Lherm, M.; Beranger, C., 2014. Trends and perspectives of ruminant livestock farming in the French mountains. *Inra Productions Animales*, 27 (1): 5-16.

Martin, B.; Pomies, D.; Pradel, P.; Verdier-Metz, I.; Remond, B., 2009. Yield and sensory properties of cheese made with milk from Holstein or Montbeliarde cows milked twice or once daily. *Journal of Dairy Science*, 92 (10): 4730-4737. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1914

Martin, B.; Verdier-Metz, I.; Buchin, S.; Hurtaud, C.; Coulon, J.B., 2005. How do the nature of forages and pasture diversity influence the sensory quality of dairy livestock products? *Animal Science*, 81: 205-212. http://dx.doi.org/10.1079/ASC50800205

Martin, C.R.; Ling, P.R.; Blackburn, G.L., 2016. Review of Infant Feeding: Key Features of Breast Milk and Infant Formula. *Nutrients*, 8 (5). http://dx.doi.org/10.3390/nu8050279

Martin, L.; Cordoba, J.J.; Ventanas, J.; Antequera, T., 1999. Changes in intramuscular lipids during ripening of Iberian dry-cured ham. *Meat Science*, 51 (2): 129-134. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(98)00109-0

Martinez-Cerezo, S.; Sanudo, C.; Panea, B.; Olleta, J.L., 2005. Breed, slaughter weight and ageing time effects on consumer appraisal of three muscles of lamb. *Meat Science*, 69 (4): 797-805. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.11.013

Martinez, I.; Wang, P.A.; Slizyte, R.; Jorge, A.; Dahle, S.W.; Canas, B.; Yamashita, M.; Olsen, R.L.; Erikson, U., 2011. Protein expression and enzymatic activities in normal and soft textured Atlantic salmon (Salmo salar) muscle. *Food Chemistry*, 126 (1): 140-148. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.10.090

Martini, M.; Liponi, G.B.; Salari, F., 2010. Effect of forage : concentrate ratio on the quality of ewe's milk, especially on milk fat globules characteristics and fatty acids composition. *Journal of Dairy Research*, 77 (2): 239-244. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029910000038

Martinie-Cousty, E.; Prévot-Madère, J., 2017. *Les fermes aquacoles marines et continentales : enjeux et conditions d'un développement durable réussi* Les avis du CESE, 97 p.

Martins, N.; Ferreira, I.C.F.R., 2017. Mountain food products: A broad spectrum of market potential to be exploited. *Trends in Food Science & Technology*, 67: 12-18. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.013

Martuscelli, M.; Lupieri, L.; Chaves-Lopez, C.; Mastrocola, D.; Pittia, P., 2015. Technological approach to reduce NaCl content of traditional smoked dry-cured hams: effect on quality properties and stability. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 52 (12): 7771-7782. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-015-1957-2

Marty-Mahe, P.; Loisel, P.; Fauconneau, B.; Haffray, P.; Brossard, D.; Davenel, A., 2004. Quality traits of brown trouts (Salmo trutta) cutlets described by automated color image analysis. *Aquaculture*, 232 (1-4): 225-240. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(03)00458-7

Marx, H.; Brunner, B.; Weinzierl, W.; Hoffmann, R.; Stolle, A., 1997. Methods of stunning freshwater fish: Impact on meat quality and aspects of animal welfare. *Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung a-Food Research and Technology*, 204 (4): 282-286. http://dx.doi.org/10.1007/s002170050078

Masilko, J.; Zajic, T.; Hlavac, D., 2015. The Culture System Affects Organoleptic Properties and Lipid Composition of Common Carp (Cyprinus Carpio L.) Meat. *Journal of Texture Studies*, 46 (5): 345-352. http://dx.doi.org/10.1111/jtxs.12134

Matsudomi, N.; Nakano, K.; Soma, A.; Ochi, A., 2002. Improvement of gel properties of dried egg white by modification with galactomannan through the Maillard reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (14): 4113-4118. http://dx.doi.org/10.1021/jf0114334

Maw, S.J.; Fowler, V.R.; Hamilton, M.; Petchey, A.M., 2001. Effect of husbandry and housing of pigs on the organoleptic properties of bacon. *Livestock Production Science*, 68 (2-3): 119-130. http://dx.doi.org/10.1016/s0301-6226(00)00242-6

Mazzocchi, C.; Sali, G., 2016. Sustainability and Competitiveness of Agriculture in Mountain Areas: A Willingness to Pay (WTP) Approach. *Sustainability*, 8 (4). http://dx.doi.org/10.3390/su8040343

Mazzoni, M.; Petracci, M.; Meluzzi, A.; Cavani, C.; Clavenzani, P.; Sirri, F., 2015. Relationship between pectoralis major muscle histology and quality traits of chicken meat. *Poultry Science*, 94 (1): 123-130. http://dx.doi.org/10.3382/ps/peu043

McAfee, A.J.; McSorley, E.M.; Cuskelly, G.J.; Fearon, A.M.; Moss, B.W.; Beattie, J.A.M.; Wallace, J.M.W.; Bonham, M.P.; Strain, J.J., 2011. Red meat from animals offered a grass diet increases plasma and platelet n-3 PUFA in healthy consumers. *British Journal of Nutrition*, 105 (1): 80-89. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114510003090

McNiven, M.A.; Duynisveld, J.L.; Turner, T.; Mitchell, A.W., 2011. Ratio of n-6/n-3 in the diets of beef cattle: Effect on growth, fatty acid composition, and taste of beef. *Animal Feed Science and Technology*, 170 (3-4): 171-181. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.09.006

McSweeney, P.L.H., 2004. Biochemistry of cheese ripening. *International Journal of Dairy Technology*, 57 (2-3): 127-144. http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2004.00147.x

Méda, B.; Dusart, L.; Lessire, M.; Hallouis, J.M.; Bordeau, T.; Souchet, C.; Mercerand, F.; Hatte, C.; Bouvarel, I.; Berri, C., 2015. Remplacement du tourteau de soja par des matières premières riches en protéines : Evaluation multicritère chez le poulet de chair de type Label Rouge. *11. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, 1082-1087.

Medale, F., 2010. Nutritional quality of fish flesh lipids as affected by farming practices. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 45 (5): 267-273.

Médale, F., 2008. Le poisson : quels enjeux pour sa consommation ? . *Lettre Scientifique de l'IFN*, 130: 2-6.

Medale, F.; Le Boucher, R.; Dupont-Nivet, M.; Quillet, E.; Aubin, J.; Panserat, S., 2013. Plant based diets for farmed fish. *Inra Productions Animales*, 26 (4): 303-315.

Medale, F.; Lefevre, F.; Corraze, G., 2003. Qualité nutritionnelle et diététique des poissons ; constituants de la chair et facteurs de variation. *Cahiers de Nutrition et Diététique*, 38 (1): 37-44.

Mele, M.; Conte, G.; Castiglioni, B.; Chessa, S.; Macciotta, N.P.P.; Serra, A.; Buccioni, A.; Pagnacco, G.; Secchiari, P., 2007. Stearoyl-Coenzyme A desaturase gene polymorphism and milk fatty acid composition in Italian Holsteins. *Journal of Dairy Science*, 90 (9): 4458-4465. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-617

Melia, S.; Losi, G.; Castagnetti, G.B., 2009. The influence of milk kappa-casein and beta-lactoglobulin phenotypes on fatty acid composition of milk from Reggiana cows. *Dairy Science & Technology*, 89 (1): 115-122. http://dx.doi.org/10.1051/dst/2008039

Mercier, Y.; Berri, C.; Baeza, E.; Bordeau, T.; Chartrin, P.; Mercerand, F.; Geraert, P.A., 2009. Improvement of muscle oxidative stability and processing yield in relation with dietary methionine sources. *Poultry Science Association 98th Annual Meeting*. Raleigh, North Carolina (USA): 20-23/07/2009. Poultry Science, 36.

Mercier, Y.; Gatellier, P.; Viau, M.; Remignon, H.; Renerre, M., 1998. Effect of dietary fat and vitamin E on colour stability and on lipid and protein oxidation in turkey meat during storage. *Meat Science*, 48 (3-4): 301-318. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00113-7

Merel, S.; Regueiro, J.; Berntssen, M.H.G.; Hannisdal, R.; Ornsrud, R.; Negreira, N., 2019. Identification of ethoxyquin and its transformation products in salmon after controlled dietary exposure via fish feed. *Food Chemistry*, 289: 259-268. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.054

Merkin, G.V.; Stien, L.H.; Pittman, K.; Nortvedt, R., 2014. The Effect of Stunning Methods and Season on Muscle Texture Hardness in Atlantic Salmon (Salmo salar L.). *Journal of Food Science*, 79 (6): E1137-E1141. http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.12473

Mesias, F.J.; Gaspar, P.; Pulido, A.F.; Escribano, M.; Pulido, F., 2009. Consumers' preferences for Iberian dry-cured ham and the influence of mast feeding: An application of conjoint analysis in Spain. *Meat Science*, 83 (4): 684-690. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.004

Meunier, M.; Guyard-Nicodeme, M.; Dory, D.; Chemaly, M., 2016. Control strategies against Campylobacter at the poultry production level: biosecurity measures, feed additives and vaccination. *Journal of Applied Microbiology*, 120 (5): 1139-1173. http://dx.doi.org/10.1111/jam.12986

Michalczuk, M.; Zdanowska-Sasiadek, Z.; Damaziak, K.; Niemiec, J., 2017. Influence of indoor and outdoor systems on meat quality of slow-growing chickens. *Cyta-Journal of Food*, 15 (1): 15-20. http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2016.1196246

Michalski, C.B.; Brackett, R.E.; Hung, Y.C.; Ezeike, G.O.I., 2000. Use of capillary tubes and plate heat exchanger to validate US Department of Agriculture pasteurization protocols for elimination of Listeria monocytogenes in liquid egg products. *Journal of Food Protection*, 63 (7): 921-925. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-63.7.921

Michalski, M.C.; Gassi, J.Y.; Famelart, M.H.; Leconte, N.; Camier, B.; Michel, F.; Briard, V., 2003. The size of native milk fat globules affects physico-chemical and sensory properties of Camembert cheese. *Lait*, 83 (2): 131-143. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2003003

Michlova, T.; Dragounova, H.; Hornickova, S.; Hejtmankova, A., 2015. Factors Influencing the Content of Vitamins A and E in Sheep and Goat Milk. *Czech Journal of Food Sciences*, 33 (1): 58-65. http://dx.doi.org/10.17221/149/2014-cjfs

Micol, D.; Lherm, M., 2010. Viande bovine en France. *Muscle et viande de ruminant*. Editions Quae, 3-13.

Mietton, B.; Chablain, I., 2018. Pratiques et techniques fromagères des différentes familles de fromages. In: Gillis, J.-C.; Ayerbe, A., eds. *Le Fromage*. Paris: Tec&Doc Lavoisier (4ème édition), Chapitre 8, 321-358.

Milan, D.; Jeon, J.T.; Looft, C.; Amarger, V.; Robic, A.; Thelander, M.; Rogel-Gaillard, C.; Paul, S.; Iannuccelli, N.; Rask, L.; Ronne, H.; Lundstrom, K.; Reinsch, N.; Gellin, J.; Kalm, E.; Le Roy, P.; Chardon, P.; Andersson, L., 2000. A mutation in PRKAG3 associated with excess glycogen content in pig skeletal muscle. *Science*, 288 (5469): 1248-1251. http://dx.doi.org/10.1126/science.288.5469.1248

Milios, K.; Mataragas, M.; Pantouvakis, A.; Drosinos, E.H.; Zoiopoulos, P.E., 2011. Evaluation of control over the microbiological contamination of carcasses in a lamb carcass dressing process operated with or without pasteurizing treatment. *International Journal of Food Microbiology*, 146 (2): 170-175. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.02.023

Miller, M.F.; Andersen, M.K.; Ramsey, C.B.; Reagan, J.O., 1993. Physical and sensory characteristics of low-fat ground-beef patties. *Journal of Food Science*, 58 (3): 461-463. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04299.x

Millet, S.; Moons, C.P.H.; Van Oeckel, M.J.; Janssens, G.P.J., 2005. Welfare, performance and meat quality of fattening pigs in alternative housing and management systems: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85 (5): 709-719. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2033

Mine, Y., 1996. Effect of pH during the dry heating on the gelling properties of egg white proteins. *Food Research International*, 29 (2): 155-161. http://dx.doi.org/10.1016/0963-9969(96)00008-7

Mine, Y., 1997. Effect of dry heat and mild alkaline treatment on functional properties of egg white proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45 (8): 2924-2928. http://dx.doi.org/10.1021/jf970158b

Mine, Y.; Yang, M., 2011. Egg allergy. In: Van Immerseel, F.; Nys, Y.; Bain, M., eds. *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products, Vol 2: egg safety and nutritional quality*. Cambridge: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition, 214), 254-271. http://dx.doi.org/10.1533/9780857093929.3.254

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016. Cahier des charges du label rouge n°LA 31/05 « Saumon atlantique » *JORF n°67 du 19 mars 2016, texte n 35* 53 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a. Arrêté fixant les conditions de production communes relatives à la production en label rouge "porc". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°31 du 27-07-2017 au 03-08-2017*. 27 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017b. Arrêté fixant les conditions de production communes relatives à la production en label rouge "produits de charcuterie / salaison pur porc". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°31 du 27-07-2017 au 03-08-2017*. 35 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017c. Cahier des charges du label rouge n°LA 08/87 "Poulet blanc fermier élevé en plein air, entier et découpes, frais". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 37 du 14-09-2017*. 55 p. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/document_administratif-2894302e-8ffb-4a7f-8bdc-d7bc196fa221/telechargement

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a. Cahier des charges de l'indication géographique protégée « Jambon de Bayonne ». *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 35 du 23-08-2018 au 30-08-2018*. 22 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018b. Cahier des charges du label rouge n°LA 33/90 « Saumon » *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°16 du 12-04-2018 au 19-04-2018*. 23 p.

Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016. Arrêté du 28 juillet 2016 du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt sur la conduite à tenir sur le produit face aux anomalies observées sur les carcasses et les viscères dans le domaine du contrôle de la production de viande dans les abattoirs de volailles et de lagomorphes. *Journal Officiel de la République Française n°0184 du 9 août 2016, texte n° 31*. 13 p.

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2014. Real Decreto 4/2014, de 10 de enero, por el que se aprueba la norma de calidad para la carne, el jamón, la paleta y la caña de lomo ibérico. *Boletin Oficial del Estado núm 10 de 11 de enero de 2014, A-2014-318*. https://www.boe.es/buscar/pdf/2014/BOE-A-2014-318-consolidado.pdf

Ministerio de Agricultura, P.Y.A., 2018. *Datos de las Denominaciones de Origen Protegidas DOPs, Indicaciones Geográficas Protegidas IGPs y Especialidades Tradicionales Garantizadas ETGs de Productos Agroalimentarios. Ano 2017*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca Y Alimentacion, 13 p. .

Minvielle, B.; Le Strat, P.; Lebret, B.; Houix, Y.; Boulard, J.; Clochefert, N., 2001. Viandes déstructurées. Situation dans cinq abattoirs de l'Ouest de la France: facteurs de risque et proposition d'un modèle. Caractérisation colorimétrique, biochimique et histologique. . *Journées Recherche Porcine en France*, 95-101.

Mir, P.S.; Ivan, M.; He, M.L.; Pink, B.; Okine, E.; Goonewardene, L.; McAllister, T.A.; Weselake, R.; Mir, Z., 2003. Dietary manipulation to increase conjugated linoleic acids and other desirable fatty acids in beef: A review. *Canadian Journal of Animal Science*, 83 (4): 673-685. http://dx.doi.org/10.4141/a03-002

Miraglia, D.; Ranucci, D.; Valiani, A.; Marinucci, M.T.; Acuti, G.; Servili, M.; Esposto, S.; Branciari, R., 2014. Influence of ewe milk somatic cell count on the sensory characteristics of Pecorino cheese. *Large Animal Review*, 20 (1): 35-39.

Miranda-de la Lama, G.C.; Salazar-Sotelo, M.I.; Perez-Linares, C.; Figueroa-Saavedra, F.; Villarroel, M.; Sanudo, C.; Maria, G.A., 2012. Effects of two transport systems on lamb welfare and meat quality. *Meat Science*, 92 (4): 554-561. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.05.026

Miranda, J.M.; Anton, X.; Redondo-Valbuena, C.; Roca-Saavedra, P.; Rodriguez, J.A.; Lamas, A.; Franco, C.M.; Cepeda, A., 2015. Egg and Egg-Derived Foods: Effects on Human Health and Use as Functional Foods. *Nutrients*, 7 (1): 706-729. http://dx.doi.org/10.3390/nu7010706

Misimi, E.; Oye, E.R.; Sture, O.; Mathiassen, J.R., 2017. Robust classification approach for segmentation of blood defects in cod fillets based on deep convolutional neural networks and support vector machines and calculation of gripper vectors for robotic processing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139: 138-152. http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.021

Mitsumoto, M.; Ozawa, S.; Mitsuhashi, T.; Koide, K., 1998. Effect of dietary vitamin E supplementation for one week before slaughter on drip, colour and lipid stability during display in Japanese black steer beef. *Meat Science*, 49 (2): 165-174. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00123-x

Modi, V.K.; Sachindra, N.M.; Nagegowda, P.; Mahendrakar, N.S.; Rao, D.N., 2007. Quality changes during the storage of dehydrated chicken kebab mix. *International Journal of Food Science and Technology*, 42 (7): 827-835. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01291.x

Mohamed, A.; Jamilah, B.; Abbas, K.A.; Rahman, R.A., 2008. A review on some factors affecting colour of fresh beef cuts. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 6 (3-4): 181-186.

Mohanty, T.R.; Park, K.M.; Pramod, A.B.; Kim, J.H.; Choe, H.S.; Hwang, I.H., 2010. Molecular and biological factors affecting skeletal muscle cells after slaughtering and their impact on meat quality: A mini-review. *Journal of Muscle Foods*, 21 (1): 51-78. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4573.2009.00167.x

Moioli, B.; Contarini, G.; Avalli, A.; Catillo, G.; Orru, L.; De Matteis, G.; Masoero, G.; Napolitano, F., 2007. Short communication: Effect of stearoyl-coenzyme A desaturase polymorphism on fatty acid composition of milk. *Journal of Dairy Science*, 90 (7): 3553-3558. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-855

Moioli, B.; Contarini, G.; Pariset, L.; Marchitelli, C.; Crisa, A.; Catillo, G.; Napolitano, F., 2012. Genetic variation of C18:1 and C18:2 isomers in sheep milk fat. *Small Ruminant Research*, 103 (2-3): 187-193. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.08.009

Monaco, C.A.; Freire, M.T.A.; Melo, L.; Rosa, A.F.; Carrer, C.D.; Trindade, M.A., 2015. Eating quality of meat from six lamb breed types raised in Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (8): 1747-1752. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6894

Monin, G., 1988. Evolution post mortem du tissu musculaire et consequences sur les qualites de la viande de porc. *20. Journees de la Recherche Porcine en France*. Paris. IFIP - Institut du Porc, 201-214.

Monin, G., 1991. Facteurs biologiques des qualités de la viande bovine. *Productions Animales*, 4 (2): 151-160.

Monin, G., 2003. Pig slaughtering and carcass and meat quality. *Inra Productions Animales*, 16 (4): 251-262.

Monsallier, F.; Couzy, C.; Chatelard-Chauvin, C.; Bouton, Y.; Feutry, F.; Verdier-Metz, I.; Hulin, S.; Montel, M.C., 2016. Accompagner les producteurs laitiers pour orienter les équilibres microbiens des laits en faveur de la qualité des fromages au lait cru. *Innovations Agronomiques*, 49: 267-279.

Montel, M.C.; Buchin, S.; Mallet, A.; Delbes-Paus, C.; Vuitton, D.A.; Desmasures, N.; Berthier, F., 2014. Traditional cheeses: Rich and diverse microbiota with associated benefits. *International Journal of Food Microbiology*, 177: 136-154. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.02.019

Montossi, F.; Font-i-Furnols, M.; del Campo, M.; Julian, R.S.; Brito, G.; Sanudo, C., 2013. Sustainable sheep production and consumer preference trends: Compatibilities, contradictions, and unresolved dilemmas. *Meat Science*, 95 (4): 772-789. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.048

Morais, S.; Pratoomyot, J.; Taggart, J.B.; Bron, J.E.; Guy, D.R.; Bell, J.G.; Tocher, D.R., 2011. Genotype-specific responses in Atlantic salmon (Salmo salar) subject to dietary fish oil replacement by vegetable oil: a liver transcriptomic analysis. *Bmc Genomics*, 12. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2164-12-255

Morales, R.; Guerrero, L.; Aguiar, A.P.S.; Guardia, M.D.; Gou, P., 2013. Factors affecting dry-cured ham consumer acceptability. *Meat Science*, 95 (3): 652-657. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.05.012

Morales, R.; Ungerfeld, E.M., 2015. Use of tannins to improve fatty acids profile of meat and milk quality in ruminants: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75 (2): 239-248. http://dx.doi.org/10.4067/s0718-58392015000200014

Morkore, T.; Austreng, E., 2004. Temporal changes in texture, gaping, composition and copper status of Atlantic salmon (Salmo salar, L) fed moist feed or extruded dry feed. *Aquaculture*, 230 (1-4): 425-437. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(03)00439-3

Morkore, T.; Rodbotten, M.; Vogt, G.; Fjaera, S.O.; Kristiansen, I.O.; Manseth, E., 2010. Relevance of season and nucleotide catabolism on changes in fillet quality during chilled storage of raw Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Food Chemistry*, 119 (4): 1417-1425. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.022

Morkore, T.; Rorvik, K.A., 2001. Seasonal variations in growth, feed utilisation and product quality of farmed Atlantic salmon (Salmo salar) transferred to seawater as 0+smolts or 1+smolts. *Aquaculture*, 199 (1-2): 145-157. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(01)00524-5

Moroney, N.C.; Wan, A.H.L.; Soler-Vila, A.; FitzGerald, R.D.; Johnson, M.P.; Kerry, J.P., 2015. Inclusion of Palmaria palmata (red seaweed) in Atlantic salmon diets: effects on the quality, shelf-life parameters and sensory properties of fresh and cooked salmon fillets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (5): 897-905. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6753

Morris, C.A.; Knight, T.W.; Newman, S.A.N.; Hickey, S.M.; Death, A.F.; O'Neill, K.T.; Ridland, M., 2002. Genetic studies of carotenoid concentration in the plasma and milk of New Zealand dairy cattle. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 45 (1): 27-33. http://dx.doi.org/10.1080/00288233.2002.9513490

Mortensen, L.M.; Frøst, M.B.; Skibsted, L.H.; Risbo, J., 2012. Effect of Time and Temperature on Sensory Properties in Low-Temperature Long-Time Sous-Vide Cooking of Beef. *Journal of Culinary Science & Technology*, 10 (1): 75-90. http://dx.doi.org/10.1080/15428052.2012.651024

Mounchili, A.; Wichtel, J.J.; Dohoo, I.R.; Keefe, G.P.; Halliday, L.J., 2004. Risk factors for milk off-flavours in dairy herds from Prince Edward Island, Canada. *Preventive Veterinary Medicine*, 64 (2-4): 133-145. http://dx.doi.org/10.1016/j.prevetmed.2004.05.008

Moura, A.; Tourdjman, M.; Leclercq, A.; Hamelin, E.; Laurent, E.; Fredriksen, N.; Van Cauteren, D.; Bracq-Dieye, H.; Thouvenot, P.; Vales, G.; Tessaud-Rita, N.; Maury, M.M.; Alexandru, A.; Criscuolo, A.; Quevillon, E.; Donguy, M.P.; Enouf, V.; de Valk, H.; Brisse, S.; Lecuit, M., 2017. Real-Time Whole-Genome Sequencing for Surveillance of Listeria monocytogenes, France. *Emerging Infectious Diseases*, 23 (9): 1462-1470. http://dx.doi.org/10.3201/eid2309.170336

Mourot, J., 2009. Optimising the nutritional and sensorial profile of pork. In: Kerry, J.P.; Ledward, D., eds. *Improving the Sensory and Nutritional Quality of Fresh Meat*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing in Food Science Technology and Nutrition), 342-355. http://dx.doi.org/10.1533/9781845695439.3.342

Mourot, J., 2010. Que peut-on attendre des pratiques d'élevage pour la viande de porcs et autres monogastriques? *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 17 (1): 37-42.

Mourot, J.; de Tonnac, A., 2015. The Bleu Blanc Coeur path: impacts on animal products and human health. *Ocl-Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, 22 (6). http://dx.doi.org/10.1051/ocl/2015051

Mourot, J.; Lebret, B., 2009. Effects of pig diet on the quality of pork and pork products. *Productions Animales*, 22 (1): 33-39.

Mudalal, S.; Babini, E.; Cavani, C.; Petracci, M., 2014. Quantity and functionality of protein fractions in chicken breast fillets affected by white striping. *Poultry Science*, 93 (8): 2108-2116. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2014-03911

Mudalal, S.; Lorenzi, M.; Soglia, F.; Cavani, C.; Petracci, M., 2015. Implications of white striping and wooden breast abnormalities on quality traits of raw and marinated chicken meat. *Animal*, 9 (4): 728-734. http://dx.doi.org/10.1017/s175173111400295x

Mughini-Gras, L.; van Pelt, W.; van der Voort, M.; Heck, M.; Friesema, I.; Franz, E., 2018. Attribution of human infections with Shiga toxin-producing Escherichia coli (STEC) to livestock sources and identification of source-specific risk factors, The Netherlands (2010-2014). *Zoonoses and Public Health*, 65 (1): E8-E22. http://dx.doi.org/10.1111/zph.12403

Muino, I.; Apeleo, E.; de la Fuente, J.; Perez-Santaescolastica, C.; Rivas-Canedo, A.; Perez, C.; Diaz, M.T.; Caneque, V.; Lauzurica, S., 2014. Effect of dietary supplementation with red wine extract or vitamin E, in combination with linseed and fish oil, on lamb meat quality. *Meat Science*, 98 (2): 116-123. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.009

Muller, C.E.; Moller, J.; Jensen, S.K.; Uden, P., 2007. Tocopherol and carotenoid levels in baled silage and haylage in relation to horse requirements. *Animal Feed Science and Technology*, 137 (1-2): 182-197. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.10.007

Musella, M.; Cannata, S.; Rossi, R.; Mourot, J.; Baldini, P.; Corino, C., 2009. Omega-3 polyunsaturated fatty acid from extruded linseed influences the fatty acid composition and sensory characteristics of dry-cured ham from heavy pigs. *Journal of Animal Science*, 87 (11): 3578-3588. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1355

Nacher-Mestre, J.; Ballester-Lozano, G.F.; Garlito, B.; Portoles, T.; Calduch-Giner, J.; Serrano, R.; Hernandez, F.; Berntssen, M.H.G.; Perez-Sanchez, J., 2018. Comprehensive overview of feed-to-fillet transfer of new and traditional contaminants in Atlantic salmon and gilthead sea bream fed plant-based diets. *Aquaculture Nutrition*, 24 (6): 1782-1795. http://dx.doi.org/10.1111/anu.12817

Nakamura, S.; Ogawa, M.; Nakai, S.; Kato, A.; Kitts, D.D., 1998. Antioxidant activity of a Maillard-type phosvitin-galactomannan conjugate with emulsifying properties and heat stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46 (10): 3958-3963. http://dx.doi.org/10.1021/jf980292b

Nakano, T.; Ozimek, L., 2015. A method of production of boneless chicken wings (drumettes and winglets) by separation of periosteum from bone without cutting skin and muscles. *Poultry Science*, 94 (11): 2816-2820. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pev272

Napolitano, F.; Braghieri, A.; Caroprese, M.; Marino, R.; Girolami, A.; Sevi, A., 2007. Effect of information about animal welfare, expressed in terms of rearing conditions, on lamb acceptability. *Meat Science*, 77 (3): 431-436. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.008

Navajas, E.A.; Lambe, N.R.; Fisher, A.V.; Nute, G.R.; Bunger, L.; Simm, G., 2008. Muscularity and eating quality of lambs: Effects of breed, sex and selection of sires using muscularity measurements by computed tomography. *Meat Science*, 79 (1): 105-112. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.08.006

Nayak, N.K.; Pathak, V.; Singh, V.P.; Goswami, M.; Bharti, S.K., 2015. Quality of Carrageenan Incorporated Low Fat Chicken Nuggets during Refrigerated Storage at 4 o C. *Livestock Research International*, 3 (1): 7-13.

Netto, A.S.; Salles, M.S.V.; Roma, L.C.R.; Cozzolino, S.M.F.; Goncalves, M.T.M.; de Freitas, J.E.; Zanetti, M.A., 2019. Increasing Selenium and Vitamin E in Dairy Cow Milk Improves the Quality of the Milk as Food for Children. *Nutrients*, 11 (6). http://dx.doi.org/10.3390/nu11061218

Newton, K.G.; Gill, C.O., 1981. The microbiology of dfd fresh meats - a review. *Meat Science*, 5 (3): 223-232. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(81)90005-x

Neyrinck, E.; De Smet, S.; Vermeulen, L.; Telleir, D.; Lescouhier, S.; Paelinck, H.; Fraeye, I.; Geers, R.; Raes, K., 2015. Application of Near-Infrared Spectroscopy for the Classification of Fresh Pork Quality in Cooked Ham Production. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (12): 2383-2391. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-015-1583-z

Ngadi, M.; Li, Y.S.; Oluka, S., 2007. Quality changes in chicken nuggets fried in oils with different degrees of hydrogenatation. *Lwt-Food Science and Technology*, 40 (10): 1784-1791. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2007.01.004

Ngapo, T.M.; Gariepy, C., 2008. Factors affecting the eating quality of pork. *Critical reviews in food science and nutrition*, 48 (7): 599-633. http://dx.doi.org/10.1080/10408390701558126

Nickell, D.C.; Bromage, N.R., 1998. The effect of dietary lipid level on variation of flesh pigmentation in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Aquaculture*, 161 (1-4): 237-251. http://dx.doi.org:10.1016/s0044-8486(97)00273-1

Niero, G.; Koczura, M.; De Marchi, M.; Curro, S.; Kreuzer, M.; Turille, G.; Berard, J., 2018. Are cheese-making properties of dual purpose cattle impaired by highland grazing? A case study using Aosta Red Pied cows. *Italian Journal of Animal Science*, 17 (4): 827-834. http://dx.doi.org/10.1080/1828051x.2018.1443289

Nieto, G.; Martinez, L.; Castillo, J.; Ros, G., 2017. Hydroxytyrosol extracts, olive oil and walnuts as functional components in chicken sausages. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97 (11): 3761-3771. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.8240

Nilsen, A.; Hagen, O.; Johnsen, C.A.; Prytz, H.; Zhou, B.F.; Nielsen, K.V.; Bjornevik, M., 2019. The importance of exercise: Increased water velocity improves growth of Atlantic salmon in closed cages. *Aquaculture*, 501: 537-546. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.09.057

Niyonzima, E.; Ongol, M.P.; Kimonyo, A.; Sindic, M., 2015. Risk Factors and Control Measures for Bacterial Contamination in the Bovine Meat Chain: A Review on Salmonella and Pathogenic E. coli. *Journal of Food Research*, 4 (5): 98-121. http://dx.doi.org/10.5539/jfr.v4n5p98

Nordgarden, U.; Ornsrud, R.; Hansen, T.; Hemre, G.I., 2003. Seasonal changes in selected muscle quality parameters in Atlantic salmon (Salmo salar L.) reared under natural and continuous light. *Aquaculture Nutrition*, 9 (3): 161-168. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2095.2003.00236.x

Normand, J.; Bas, P.; Gouedard, A.; Pottier, E.; Aurousseau, B.; Matray, M.; Theriez, M.; Sauvant, D., 1997. fermeté et composition des tissus adipeux sous-cutanés chez l'agneau de bergerie : effets du sexe, de l'alimentation et de l'origine paternelle. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*. Paris. 303-306.

Nostbakken, O.J.; Hove, H.T.; Duinker, A.; Lundebye, A.K.; Berntssen, M.H.; Hannisdal, R.; Lunestad, B.T.; Maage, A.; Madsen, L.; Torstensen, B.E.; Julshamn, K., 2015. Contaminant levels in Norwegian farmed Atlantic salmon (Salmo salar) in the 13-year period from 1999 to 2011. *Environment International*, 74: 274-280. http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.008

Novotna, L.; Kuchtik, J.; Sustova, K.; Zapletal, D.; Filipcik, R., 2009. Effects of Lactation Stage and Parity on Milk Yield, Composition and Properties of Organic Sheep Milk. *Journal of Applied Animal Research*, 36 (1): 71-76. http://dx.doi.org/10.1080/09712119.2009.9707034

Nowak-Wegrzyn, A.; Bloom, K.A.; Sicherer, S.H.; Shreffler, W.G.; Noone, S.; Wanich, N.; Sampson, H.A., 2008. Tolerance to extensively heated milk in children with cow's milk allergy. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 122 (2): 342-347. http://dx.doi.org/10.1016/j.jaci.2008.05.043

Noziere, P.; Graulet, B.; Lucas, A.; Martin, B.; Grolier, P.; Doreau, M., 2006a. Carotenoids for ruminants: From forages to dairy products. *Animal Feed Science and Technology*, 131 (3-4): 418-450. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.018

Noziere, P.; Grolier, P.; Durand, D.; Ferlay, A.; Pradel, P.; Martin, B., 2006b. Variations in carotenoids, fat-soluble micronutrients, and color in cows' plasma and milk following changes in forage and feeding level. *Journal of Dairy Science*, 89 (7): 2634-2648. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72340-2

Nudda, A.; Battacone, G.; Bee, G.; Boe, R.; Castanares, N.; Lovicu, M.; Pulina, G., 2015. Effect of linseed supplementation of the gestation and lactation diets of dairy ewes on the growth performance and the intramuscular fatty acid composition of their lambs. *Animal*, 9 (5): 800-809. http://dx.doi.org/10.1017/s175173111400305x

Nudda, A.; Battacone, G.; Neto, O.B.; Cannas, A.; Francesconi, A.H.D.; Atzori, A.S.; Pulina, G., 2014. Feeding strategies to design the fatty acid profile of sheep milk and cheese. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science*, 43 (8): 445-456. http://dx.doi.org/10.1590/s1516-35982014000800008

Nudda, A.; Feligini, M.; Battacone, G.; Macciotta, N.P.P.; Pulina, G., 2003. Effects of lactation stage, parity, beta-lactoglobulin genotype and milk SCC on whey protein composition in Sarda dairy ewes. *Italian Journal of Animal Science*, 2 (1): 29-39. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2003.29

Nunes, T.P.; Trindade, M.A.; Ortega, E.M.M.; Castillo, C.J.C., 2006. Sensory acceptance of nuggets prepared with broiler breeder and spent layer hens breast meat. *Food Science and Technology*, 26 (4): 841-846.

Nurkhuzaiah, K.; Babji, A.S.; Rosli, W.I.W.; Foo, S.P., 2015. Tocopherol and tocotrienol contents of chicken nuggets blended with red palm oils before and after frying. *Journal of Oil Palm Research*, 27 (1): 82-89.

Nurnberg, K.; Wegner, J.; Ender, K., 1998. Factors influencing fat composition in muscle and adipose tissue of farm animals. *Livestock Production Science*, 56 (2): 145-156. http://dx.doi.org/10.1016/s0301-6226(98)00188-2

Nuyts-Petit, V.; Delacroix-Buchet, A.; Vassal, L., 1997. Influence de trois haplotypes des caséines αsl, β et K fréquents en race bovine Normande sur la composition du lait et l'aptitude à la fabrication fromagère. *Lait*, 77 (5): 625-639. https://lait.dairy-journal.org/articles/lait/pdf/1997/05/lait_77_1997_5_45.pdf

Nys, Y., 2000. Dietary carotenoids and egg yolk coloration - a review. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 64 (2): 45-54.

Nys, Y.; Jondreville, C.; Chemaly, M.; Roudaut, B., 2018. Qualités des œufs de consommation. In: Berthelot Valérie (coord.), ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui) Partie 2 - Déterminants alimentaires et non alimentaires en élevage de la qualité des produits (Chapitre 9), 316-333.

Nys, Y.; Sauveur, B., 2004. The nutritional value of eggs. *Productions Animales*, 17 (5): 385-393.

O'Brien, B.; Gleeson, D.; Jordan, K., 2013. Iodine concentrations in milk. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 52 (2): 209-216. www.jstor.org/stable/23631032

O'Grady, M.N.; Kerry, J.P., 2009. Using antioxidants and nutraceuticals as dietary supplements to improve the quality and shelf-life of fresh meat. In: Kerry, J.P.; Ledward, D., eds. *Improving the Sensory and Nutritional Quality of Fresh Meat*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing in Food Science Technology and Nutrition), 356-386. http://dx.doi.org/10.1533/9781845695439.3.356

O'Grady, M.N.; Monahan, F.J.; Burke, R.M.; Allen, P., 2000. The effect of oxygen level and exogenous alpha-tocopherol on the oxidative stability of minced beef in modified atmosphere packs. *Meat Science*, 55 (1): 39-45. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(99)00123-0

O'Kane, S.M.; Pourshahidi, L.K.; Mulhern, M.S.; Weir, R.R.; Hill, S.; O'Reilly, J.; Kmiotek, D.; Deitrich, C.; Mackle, E.M.; Fitzgerald, E.; Lowis, C.; Johnston, M.; Strain, J.J.; Yeates, A.J., 2018. The Effect of Processing and Seasonality on the Iodine and Selenium Concentration of Cow's Milk Produced in Northern Ireland (NI): Implications for Population Dietary Intake. *Nutrients*, 10 (3). http://dx.doi.org/10.3390/nu10030287

O'Neill, L.M.; Galvin, K.; Morrissey, P.A.; Buckley, D.J., 1998. Comparison of effects of dietary olive oil, tallow and vitamin E on the quality of broiler meat and meat products. *British Poultry Science*, 39 (3): 365-371. http://dx.doi.org/10.1080/00071669888917

Oeffner, S.P.; Qu, Y.; Just, J.; Quezada, N.; Ramsing, E.; Keller, M.; Cherian, G.; Goddick, L.; Bobe, G., 2013. Effect of flaxseed supplementation rate and processing on the production, fatty acid profile, and texture of milk, butter, and cheese. *Journal of Dairy Science*, 96 (2): 1177-1188. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5941

Ogola, H.; Shitandi, A.; Nanua, J., 2007. Effect of mastitis on raw milk compositional quality. *Journal of Veterinary Science*, 8 (3): 237-242. http://dx.doi.org/10.4142/jvs.2007.8.3.237

Oksbjerg, N.; Strudsholm, K.; Lindahl, G.; Hermansen, J.E., 2005. Meat quality of fully or partly outdoor reared pigs in organic production. *Acta Agriculturae Scandinavica Section a-Animal Science*, 55 (2-3): 106-112. http://dx.doi.org/10.1080/09064700510009324

Olivan, M.; Martinez, A.; Osoro, K.; Sanudo, C.; Panea, B.; Olleta, J.L.; Campo, M.M.; Oliver, M.A.; Serra, X.; Gil, M.; Piedrafita, J., 2004. Effect of muscular hypertrophy on physico-chemical, biochemical and texture traits of meat from yearling bulls. *Meat Science*, 68 (4): 567-575. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.05.008

Oliveira, E.A.; Sampaio, A.A.M.; Rosa, B.L.; Henrique, W.; Pivaro, T.M.; Carvalho, V.G.; Cirne, L.G.A.; Duckett, S.K., 2018. Quality characteristics of meat from triceps brachii muscle from steers and heifers finished on high-concentrate diets containing increasing concentrations of linseed oil. *Animal Production Science*, 58 (11): 2117-2125. http://dx.doi.org/10.1071/an16147

Oliveira, T.F.B.; Rivera, D.F.R.; Mesquita, F.R.; Braga, H.; Ramos, E.M.; Bertechini, A.G., 2014. Effect of different sources and levels of selenium on performance, meat quality, and tissue characteristics of broilers. *Journal of Applied Poultry Research*, 23 (1): 15-22. http://dx.doi.org/10.3382/japr.2013-00761

Oppedal, F.; Berg, A.; Olsen, R.E.; Taranger, G.L.; Hansen, T., 2006. Photoperiod in seawater influence seasonal growth and chemical composition in autumn sea-transferred Atlantic salmon (Salmo salar L.) given two vaccines. *Aquaculture*, 254 (1-4): 396-410. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.10.026

Orjales, I.; Lopez-Alonso, M.; Miranda, M.; Alaiz-Moreton, H.; Resch, C.; Lopez, S., 2019. Dairy cow nutrition in organic farming systems. Comparison with the conventional system. *Animal*, 13 (5): 1084-1093. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118002392

Ortuno, J.; Serrano, R.; Banon, S., 2016. Use of dietary rosemary diterpenes to inhibit rancid volatiles in lamb meat packed under protective atmosphere. *Animal*, 10 (8): 1391-1401. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731116000392

Osimani, A.; Aquilanti, L.; Pasquini, M.; Clementi, F., 2017. Prevalence and risk factors for thermotolerant species of Campylobacter in poultry meat at retail in Europe. *Poultry Science*, 96 (9): 3382-3391. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex143

Ostli, J.; Esaiassen, M.; Garitta, L.; Nostvold, B.; Hough, G., 2013. How fresh is fresh? Perceptions and experience when buying and consuming fresh cod fillets. *Food Quality and Preference*, 27 (1): 26-34. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.05.008

Ouali, A., 1991. Conséquences des traitements technologiques sur la qualité de la viande. *Inra Productions Animales*, 4 (3): 195-208.

Ouali, A.; Gagaoua, M.; Boudida, Y.; Becila, S.; Boudjellal, A.; Herrera-Mendez, C.H.; Sentandreu, M.A., 2013. Biomarkers of meat tenderness: Present knowledge and perspectives in regards to our current understanding of the mechanisms involved. *Meat Science*, 95 (4): 854-870. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.05.010

Ouali, A.; Herrera-Mendez, C.H.; Coulis, G.; Becila, S.; Boudjellal, A.; Aubry, L.; Sentandreu, M.A., 2006. Revisiting the conversion of muscle into meat and the underlying mechanisms. *Meat Science*, 74 (1): 44-58. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.05.010

Oury, M.P.; Picard, B.; Istasse, L.; Micol, D.; Dumont, R., 2007. Effect of rearing management practices on tenderness of bovine meat. *Productions Animales*, 20 (4): 309-325.

Ovadia, Y.S.; Sabastian, C.C.; Dahl, L.; Troen, A.M.; Mabjeesh, S.J., 2018. The Effect of Iodophor Post-Milking Teat Disinfection on Iodine Content in Goat Milk. *Israel Journal of Veterinary Medicine*, 73 (4): 14-22.

Oz, F.; Yuzer, M.O., 2017. The effects of different cooking methods on the formation of heterocyclic aromatic amines in turkey meat. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41 (5): 9. http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.13196

Paaver, T.; Gross, R.; Ilves, P., 2004. Growth rate, maturation level and flesh quality of three strains of large rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) reared in Estonia. *Aquaculture International*, 12 (1): 33-45. http://dx.doi.org/10.1023/B:AQUI.0000017185.10472.1d

Pagliarini, E.; Laureati, M.; Dinnella, C.; Monteleone, E.; Proserpio, C.; Piasentier, E., 2016. Influence of pig genetic type on sensory properties and consumer acceptance of Parma, San Daniele and Toscano dry-cured hams. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96 (3): 798-806. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7151

Palstra, A.P.; Planas, J.V., 2011. Fish under exercise. *Fish Physiology and Biochemistry*, 37 (2): 259-272. http://dx.doi.org/10.1007/s10695-011-9505-0

Palupi, E.; Jayanegara, A.; Ploeger, A.; Kahl, J., 2012. Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: a meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (14): 2774-2781. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5639

Panea, B.; Olleta, J.L.; Sanudo, C.; Campo, M.D.; Oliver, M.A.; Gispert, M.; Serra, X.; Renand, G.; Olivan, M.D.; Jabet, S.; Garcia, S.; Lopez, M.; Izquierdo, M.; Garcia-Cachan, M.D.; Quintanilla, R.; Piedrafita, J., 2018. Effects of breed-production system on collagen, textural, and sensory traits of 10 European beef cattle breeds. *Journal of Texture Studies*, 49 (5): 528-535. http://dx.doi.org/10.1111/jtxs.12350

Paneru, B.D.; Al-Tobasei, R.; Kenney, B.; Leeds, T.D.; Salem, M., 2017. RNA-Seq reveals MicroRNA expression signature and genetic polymorphism associated with growth and muscle quality traits in rainbow trout. *Scientific Reports*, 7: 15. http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-09515-4

Pannier, L.; Gardner, G.E.; O'Reilly, R.A.; Pethick, D.W., 2018. Factors affecting lamb eating quality and the potential for their integration into an MSA sheepmeat grading model. *Meat Science*, 144: 43-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.035

Pannier, L.; Gardner, G.E.; Pearce, K.L.; McDonagh, M.; Ball, A.J.; Jacob, R.H.; Pethick, D.W., 2014. Associations of sire estimated breeding values and objective meat quality measurements with sensory scores in Australian lamb. *Meat Science*, 96 (2): 1076-1087. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.07.037

Pannier, L.; Zhao, L.; Brown, D.; Geenty, K.; Gardner, G.E.; Pethick, D.W., 2017. Diet has minimal impact on Australian consumer palatability. *Proceedings of the 63rd International Conference on Meat Science and Technology*. Cork, Ireland. 803.

Panozzo, M.; Magro, L.; Erle, I.; Ferrarini, S.; Murari, R.; Novelli, E.; Masaro, S., 2015. Nutritional quality of preparations based on Miner Kebab sold in two towns of Veneto Region, Italy: preliminary results. *Italian Journal of Food Safety*, 4 (2): 92-97. http://dx.doi.org/10.4081/ijfs.2015.4535

Panserat, S.; Hortopan, G.A.; Plagnes-Juan, E.; Kolditz, C.; Lansard, M.; Skiba-Cassy, S.; Esquerre, D.; Geurden, I.; Medale, F.; Kaushik, S.; Corraze, G., 2009. Differential gene expression after total replacement of dietary fish meal and fish oil by plant products in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) liver. *Aquaculture*, 294 (1-2): 123-131. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.05.013

Papademas, P.; Bintsis, T., 2010. Food safety management systems (FSMS) in the dairy industry: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 63 (4): 489-503. http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2010.00620.x

Papinaho, P.A.; Fletcher, D.L., 1996. The influence of temperature on broiler breast muscle shortening and extensibility. *Poultry Science*, 75 (6): 797-802. http://dx.doi.org/10.3382/ps.0750797

Park, K.M.; Pramod, A.B.; Kim, J.H.; Choe, H.S.; Hwang, I.H., 2010. Molecular and biological factors affecting skeletal muscle cells after slaughtering and their impact on meat quality: A mini review. *Journal of Muscle Foods*, 21 (2): 280-307. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4573.2009.00182.x

Parois, S.; Bonneau, M.; Chevillon, P.; Larzul, C.; Quiniou, N.; Robic, A.; Prunier, A., 2018. Boar taint in the meat of entire male pigs: the problems and the potential solutions. *Inra Productions Animales*, 31 (1): 23-35.

Pastorelli, G.; Magni, S.; Rossi, R.; Pagliarini, E.; Baldini, P.; Dirinck, P.; Van Opstaele, F.; Corino, C., 2003. Influence of dietary fat, on fatty acid composition and sensory properties of dry-cured Parma ham. *Meat Science*, 65 (1): 571-580. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00250-4

Pathera, A.K.; Riar, C.S.; Yadav, S.; Sharma, D.P., 2017a. Effect of Dietary Fiber Enrichment and Different Cooking Methods on Quality of Chicken Nuggets. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37 (3): 410-417. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.3.410

Pathera, A.K.; Riar, C.S.; Yadav, S.; Sharma, D.P.; Yadav, Y.S.; Kumar, M., 2017b. Optimization of dietary fiber enriched chicken nuggets for different cooking methods. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11 (3): 1386-1397. http://dx.doi.org/10.1007/s11694-017-9517-2

Paulk, C.B.; Bergstrom, J.R.; Tokach, M.D.; Dritz, S.S.; Burnett, D.D.; Stephenson, E.W.; Vaughn, M.A.; DeRouchey, J.M.; Goodband, R.D.; Nelssen, J.L.; Gonzalez, J.M., 2015. Equations generated to predict iodine value of pork carcass back, belly, and jowl fat. *Journal of Animal Science*, 93 (4): 1666-1678. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2014-8400

Pauly, C.; Luginbuhl, W.; Ampuero, S.; Bee, G., 2012. Expected effects on carcass and pork quality when surgical castration is omitted - Results of a meta-analysis study. *Meat Science*, 92 (4): 858-862. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.06.007

Pauselli, M.; Morbidini, L.; Lasagna, E.; Landi, V.; Giangrande, R., 2009. Consumer acceptance of Italian or New Zealander lamb meat: an Italian case study. *Italian Journal of Animal Science*, 8: 528-530. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2009.s2.528

Pavio, N.; Merbah, T.; Thebault, A., 2014. Frequent Hepatitis E Virus Contamination in Food Containing Raw Pork Liver, France. *Emerging Infectious Diseases*, 20 (11): 1925-1927. http://dx.doi.org/10.3201/eid2011.140891

Pearson, A.M.; Gray, J.I.; Brennand, C.P., 1994. Species-specific flavors and odors. In: Pearson, A.M.; Dutson, T.R., eds. *Quality Attributes and their Measurement in Meat, Poultry and Fish Products*. Boston, MA: Springer (Advances in Meat Research, vol 9), 222-249. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-2167-9_9

Pellattiero, E.; Cecchinato, A.; Tagliapietra, F.; Schiavon, S.; Bittante, G., 2015. The use of 2-dimensional gas chromatography to investigate the effect of rumen-protected conjugated linoleic acid, breed, and lactation stage on the fatty acid profile of sheep milk. *Journal of Dairy Science*, 98 (4): 2088-2102. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8395

Pereira, D.; Sperat-Czar, A., 2019. L'AOP Camembert dans le vif du sujet,. *Profession fromager*, 88: 28-35.

Pereira de Abreu, D.A.; Maroto, J.; Rodriguez, K.V.; Cruz, J.M., 2012. Antioxidants from barley husks impregnated in films of low-density polyethylene and their effect over lipid deterioration of frozen cod (Gadus morhua). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (2): 427-432. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.4595

Perez, T.I.; Zuidhof, M.J.; Renema, R.A.; Curtis, J.M.; Ren, Y.; Betti, M., 2010. Effects of Vitamin E and Organic Selenium on Oxidative Stability of omega-3 Enriched Dark Chicken Meat during Cooking. *Journal of Food Science*, 75 (2): T25-T34. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01478.x

Perlo, F.; Bonato, P.; Teira, G.; Fabre, R.; Kueider, S., 2006. Physicochemical and sensory properties of chicken nuggets with washed mechanically deboned chicken meat: Research note. *Meat Science*, 72 (4): 785-788. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.09.007

Perna, A.; Simonetti, A.; Intaglietta, I.; Gambacorta, E., 2014. Effects of genetic type, stage of lactation, and ripening time on Caciocavallo cheese proteolysis. *Journal of Dairy Science*, 97 (4): 1909-1917. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7288

Perry, N., 2012. Dry aging beef. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1 (1): 78-80. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijgfs.2011.11.005

Perugini, M.; Manera, M.; Tavoloni, T.; Lestingi, C.; Pecorelli, I.; Piersanti, A., 2013. Temporal trends of PCBs in feed and dietary influence in farmed rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Food Chemistry*, 141 (3): 2321-2327. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.062

Petersen, M.A.; Hyldig, G.; Strobel, B.W.; Henriksen, N.H.; Jorgensen, N.O.G., 2011. Chemical and Sensory Quantification of Geosmin and 2-Methylisoborneol in Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) from Recirculated Aquacultures in Relation to Concentrations in Basin Water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (23): 12561-12568. http://dx.doi.org/10.1021/jf2033494

Pethick, D.W.; Harper, G.S.; Oddy, V.H., 2004. Growth, development and nutritional manipulation of marbling in cattle: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44 (7): 705-715. http://dx.doi.org/10.1071/ea02165

Pethick, D.W.; Hopkins, D.L.; D'Souza, D.N.; Thompson, J.M.; Walker, P.J., 2005. Effects of animal age on the eating quality of sheep meat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 45 (5): 491-498. http://dx.doi.org/10.1071/ea03256

Petit, G.; Jury, V.; de Lamballerie, M.; Duranton, F.; Pottier, L.; Martin, J.L., 2019. Salt Intake from Processed Meat Products: Benefits, Risks and Evolving Practices. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18 (5): 1453-1473. http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12478

Petracci, M.; Mudalal, S.; Bonfiglio, A.; Cavani, C., 2013a. Occurrence of white striping under commercial conditions and its impact on breast meat quality in broiler chickens. *Poultry Science*, 92 (6): 1670-1675. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2012-03001

Petracci, M.; Mudalal, S.; Soglia, F.; Cavani, C., 2015. Meat quality in fast-growing broiler chickens. *Worlds Poultry Science Journal*, 71 (2): 363-373. http://dx.doi.org/10.1017/s0043933915000367

Petracci, M.; Sirri, F.; Mazzoni, M.; Meluzzi, A., 2013b. Comparison of breast muscle traits and meat quality characteristics in 2 commercial chicken hybrids. *Poultry Science*, 92 (9): 2438-2447. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2013-03087

Petracci, M.; Soglia, F.; Berri, C., 2017. Muscle metabolism and meat quality abnormalities. In: Petracci, M.; Berri, C., eds. *Poultry Quality Evaluation: Qualitu attributes and consumer values*. Woodhead Publishing Elsevier (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition), 51-75. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100763-1.00003-9

Petrova, I.; Aasen, I.M.; Rustad, T.; Eikevik, T.M., 2015. Manufacture of dry-cured ham: a review. Part 1. Biochemical changes during the technological process. *European Food Research and Technology*, 241 (5): 587-599. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-015-2490-2

Pettersen, M.K.; Nissen, H.; Eie, T.; Nilsson, A., 2004. Effect of packaging materials and storage conditions on bacterial growth, off-odour, pH and colour in chicken breast fillets. *Packaging Technology and Science*, 17 (3): 165-174. http://dx.doi.org/10.1002/pts.652

Piaggio, L.; Quintans, G.; San Julian, R.; Ferreira, G.; Ithurralde, J.; Fierro, S.; Pereira, A.S.C.; Baldi, F.; Banchero, G.E., 2018. Growth, meat and feed efficiency traits of lambs born to ewes submitted to energy restriction during mid-gestation. *Animal*, 12 (2): 256-264. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731117001550

Piasentier, E.; Morgante, M.; Sacca, E.; Valusso, R.; Parente, J., 2007. Effect of animal feeding system information on consumer expectation and acceptability of lamb meat. *Options Mediterrannéennes*, Series A (74): 197-202.

Pierre, F.H.; Martin, O.C.; Santarelli, R.L.; Tache, S.; Naud, N.; Gueraud, F.; Audebert, M.; Dupuy, J.; Meunier, N.; Attaix, D.; Vendeuvre, J.L.; Mirvish, S.S.; Kuhnle, G.C.; Cano, N.; Corpet, D.E., 2013. Calcium and alpha-tocopherol suppress cured-meat promotion of chemically induced colon carcinogenesis in rats and reduce associated biomarkers in human volunteers. *American Journal of Clinical Nutrition*, 98 (5): 1255-1262. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.113.061069

Pirard, C.; Eppe, G.; Massart, A.C.; Fierens, S.; De Pauw, E.; Focant, J.F., 2005. Environmental and human impact of an old-timer incinerator in terms of dioxin and PCB level: A case study. *Environmental Science & Technology*, 39 (13): 4721-4728. http://dx.doi.org/10.1021/es0481981

Pires, J.A.A.; Chilliard, Y.; Delavaud, C.; Rouel, J.; Pomies, D.; Blanc, F., 2015. Physiological adaptations and ovarian cyclicity of Holstein and Montbeliarde cows under two low-input production systems. *Animal*, 9 (12): 1986-1995. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115001317

Pires, S.M.; Enemark, H.; Rosendal, T.; Lundén, A.; Jokelainen, P.; Alban, L., 2017. Toxoplasma gondii and the role of pork. *12. International Symposium on the Epidemiology and Control of Biological,Chemical and Physical Hazards in Pigs and Pork - Proceedings Book,* . Foz doIguaçu (BRA), august 21-24 2015, 25-28. http://dx.doi.org/10.31274/safepork-180809-396

Pirisi, A.; Piredda, G.; Papoff, C.M.; Di Salvo, R.; Pintus, S.; Garro, G.; Ferranti, P.; Chianese, L., 1999. Effects of sheep alpha(s1)-casein CC, CD and DD genotypes on milk composition and cheesemaking properties. *Journal of Dairy Research*, 66 (3): 409-419. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029999003635

Piskorska-Pliszczynska, J.; Mikolajczyk, S.; Warenik-Bany, M.; Maszewski, S.; Strucinski, P., 2014. Soil as a source of dioxin contamination in eggs from free-range hens on a Polish farm. *Science of the Total Environment*, 466: 447-454. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.061

Piskorska-Pliszczynska, J.; Strucinski, P.; Mikolajczyk, S.; Maszewski, S.; Rachubik, J.; Pajurek, M., 2016. Pentachlorophenol from an old henhouse as a dioxin source in eggs and related human exposure. *Environmental Pollution*, 208: 404-412. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.10.007

Pizzillo, M.; Claps, S.; Cifuni, G.F.; Fedele, V.; Rubino, R., 2005. Effect of goat breed on the sensory, chemical and nutritional characteristics of ricotta cheese. *Livestock Production Science*, 94 (1-2): 33-40. http://dx.doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.11.024

Plastow, G.S.; Carrion, D.; Gil, M.; Garcia-Regueiro, J.A.; Font-i-Furnols, M.; Gispert, M.; Oliver, M.A.; Velarde, A.; Guardia, M.D.; Hortos, M.; Rius, M.A.; Sarraga, C.; Diaz, I.; Valero, A.; Sosnicki, A.; Klont, R.; Dornan, S.; Wilkinson, J.M.; Evans, G.; Sargent, C.; Davey, G.; Connolly, D.; Houeix, B.; Maltin, C.M.; Hayes, H.E.; Anandavijayan, V.; Foury, A.; Geverink, N.; Cairns, M.; Tilley, R.E.; Mormede, P.; Blott, S.C., 2005. Quality pork genes and meat production. *Meat Science*, 70 (3): 409-421. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.06.025

Pointereau, P., 2019. *Le revers de notre assiette : Changer d'alimentation pour préserver notre santé et notre environnement* Paris: Solagro, 63 p. https://inra-dam-front-resources-cdn.wedia-group.com/ressources/afile/488399-52932-resource-le-revers-de-notre-assiette.pdf

Pointillard, A.; Gueguen, L., 2004. Intérêts nutritionnels du calcium et du phosphore des produits laitiers. In: Gaucheron, F., ed. *Minéraux et produits laitiers,*. Paris: Tec&Doc Lavoisier, 703-738.

Politis, I.; Lachance, E.; Block, E.; Turner, J.D., 1989. Plasmin and plasminogen in bovine-milk - A relationship with involution. *Journal of Dairy Science*, 72 (4): 900-906. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79183-9

Polkinghorne, R.J.; Thompson, J.M., 2010. Meat standards and grading A world view. *Meat Science*, 86 (1): 227-235. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.010

Pomies, D.; Lagriffoul, G.; Lefrileux, Y., 2010. *Quelles solutions pour réduire l'astreinte de la traite ? Quelles conséquences sur la production et la qualité du lait ?* , 8 p.

Pomiès, D.; Martin, B.; Rémond, B.; Brunschwig, G.; Pradel, P.; Lavigne, R.; Hulin, S., 2003. La traite une fois par jour pendant 7 semaines de vaches laitières prim'holstein et montbéliardes en milieu de lactation: performances zootechniques, qualité du lait et des fromages. *Rencontres autour des recherches sur les ruminants*, 81-84. http://www.journees3r.fr/IMG/pdf/systemes_03_Pomies.pdf

Ponnampalam, E.N.; Butler, K.L.; Hopkins, D.L.; Kerr, M.G.; Dunshea, F.R.; Warner, R.D., 2008. Genotype and age effects on sheep meat production. 5. Lean meat and fat content in the carcasses of Australian sheep genotypes at 20-, 30- and 40-kg carcass weights. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48 (6-7): 893-897. http://dx.doi.org/10.1071/ea08054

Ponnampalam, E.N.; Dixon, R.M.; Hosking, B.J.; Egan, A.R., 2004. Intake, growth and carcass characteristics of lambs consuming low digestible hay and cereal grain. *Animal Feed Science and Technology*, 114 (1-4): 31-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2003.12.005

Ponnampalam, E.N.; Hopkins, D.L.; Bruce, H.; Li, D.; Baldi, G.; Bekhit, A.E.D.A., 2017. Causes and Contributing Factors to "Dark Cutting" Meat: Current Trends and Future Directions: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16 (3): 400-430. http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12258

Ponnampalam, E.N.; Hopkins, D.L.; Butler, K.L.; Dunshea, F.R.; Warner, R.D., 2007. Genotype and age effects on sheep meat production 2. Carcass quality traits. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 47 (10): 1147-1154. http://dx.doi.org/10.1071/ea07001

Poontawee, K.; Werner, C.; Muller-Belecke, A.; Horstgen-Schwark, G.; Wicke, M., 2007. Flesh qualities and muscle fiber characteristics in triploid and diploid rainbow trout. *Journal of Applied Ichthyology*, 23 (3): 273-275. http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0426.2007.00843.x

Pottiez, E.; Cresson, C.; Dennery, G.; Lescoat, P.; Bouvarel, I., 2013. Avibio : une méthode et un outil pour évaluer la durabilité des filières avicoles biologiques. *10. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. La Rochelle, France, 26-28/03/2013, 84-88. https://www.itavi.asso.fr/download/7807

Pouillot, R.; Garin, B.; Ravaonindrina, N.; Diop, K.; Ratsitorahina, M.; Ramanantsoa, D.; Rocourt, J., 2012. A Risk Assessment of Campylobacteriosis and Salmonellosis Linked to Chicken Meals Prepared in Households in Dakar, Senegal. *Risk Analysis*, 32 (10): 1798-1819. http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01796.x

Poulsen, N.A.; Rybicka, I.; Poulsen, H.D.; Larsen, L.B.; Andersen, K.K.; Larsen, M.K., 2015. Seasonal variation in content of riboflavin and major minerals in bulk milk from three Danish dairies. *International Dairy Journal*, 42: 6-11. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2014.10.010

Powell, J.; White, I.; Guy, D.; Brotherstone, S., 2008. Genetic parameters of production traits in Atlantic salmon (Salmo salar). *Aquaculture*, 274 (2-4): 225-231. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.11.036

Prache, S.; Ballet, J.; Jailler, R.; Meteau, K.; Picard, B.; Renerre, M.; Bauchart, D., 2009. Comparaison des qualités de la viande et de la carcasse d'agneaux produits en élevage biologique ou conventionnel. *Innovations Agronomiques*, 4: 289-296.

Prache, S.; Bauchart, D., 2015. Lamb meat and carcass quality: main criteria of interest. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 105-109.

Prache, S.; Caillat, H.; Lagriffoul, G., 2018. Diversité dans la filière petits ruminants : une source de résilience? *Innovations Agronomiques*, 68: 171-191.

Prache, S.; Galtier, P., 1990. Evolution de la bilirubinémie et de l'activité plasmatique de la gamma-glutamyl transférase chez des agneaux infestés expérimentalement par Fasciola hepatica. *Reproduction Nutrition Development*: 233-234.

Prache, S.; Gatellier, P.; Thomas, A.; Picard, B.; Bauchart, D., 2011. Comparison of meat and carcass quality in organically reared and conventionally reared pasture-fed lambs. *Animal*, 5 (12): 2001-2009. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731111001030

Prache, S.; Priolo, A.; Grolier, P., 2003a. Effect of concentrate finishing on the carotenoid content of perirenal fat in grazing sheep: its significance for discriminating grass-fed, concentrate-fed and concentrate-finished grazing lambs. *Animal Science*, 77: 225-233. http://dx.doi.org/10.1017/S1357729800058963

Prache, S.; Priolo, A.; Grolier, P., 2003b. Persistence of carotenoid pigments in the blood of concentrate-finished grazing sheep: Its significance for the traceability of grass-feeding. *Journal of Animal Science*, 81 (2): 360-367. http://dx.doi.org/10.2527/2003.812360x

Prchal, M.; Bugeon, J.; Vandeputte, M.; Kause, A.; Vergnet, A.; Zhao, J.F.; Gela, D.; Genestout, L.; Bestin, A.; Haffray, P.; Kocour, M., 2018a. Potential for Genetic Improvement of the Main Slaughter Yields in Common Carp With in vivo Morphological Predictors. *Frontiers in Genetics*, 9. http://dx.doi.org/10.3389/fgene.2018.00283

Prchal, M.; Vandeputte, M.; Gela, D.; Dolezal, M.; Blichtova, H.; Rodina, M.; Flaishans, M.; Kocour, M., 2018b. Estimation of Genetic Parameters of Fatty Acids Composition in Flesh of Market Size Common Carp (Cyprinus carpio L.) and Their Relation to Performance Traits Revealed that Selective Breeding Can Indirectly Affect Flesh Quality. *Czech Journal of Animal Science*, 63 (7): 280-291. http://dx.doi.org/10.17221/30/2018-cjas

Préfecture de la région Rhône-Alpes, 2012. *Information réglementaire sur la production et la commercialisation des produits fermiers d'origine animale. Fiche n°3. Producteurs d'Œufs de Consommation*, 13 p.

Prescott, J.; Young, O.; O'Neill, L., 2001. The impact of variations in flavour compounds on meat acceptability: a comparison of Japanese and New Zealand consumers. *Food Quality and Preference*, 12 (4): 257-264. http://dx.doi.org/10.1016/s0950-3293(01)00021-0

Prinyawiwatkul, W.; McWatters, K.H.; Beuchat, L.R.; Phillips, R.D., 1997. Physicochemical and sensory properties of chicken nuggets extended with fermented cowpea and peanut flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45 (5): 1891-1899. http://dx.doi.org/10.1021/jf9606520

Priolo, A.; Micol, D.; Agabriel, J.; Prache, S.; Dransfield, E., 2002. Effect of grass or concentrate feeding systems on lamb carcass and meat quality. *Meat Science*, 62 (2): 179-185. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00244-3

Priolo, A.; Vasta, V.; Fasone, V.; Lanza, C.M.; Scerra, M.; Biondi, L.; Bella, M.; Whittington, F.M., 2009. Meat odour and flavour and indoles concentration in ruminal fluid and adipose tissue of lambs fed green herbage or concentrates with or without tannins. *Animal*, 3 (3): 454-460. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731108003662

Protino, J.; Jacquinot, M.; Bouvarel, I.; Berri, C.; Magdelaine, P., 2013. Place du développement durable en aviculture dans les attentes des consommateurs. *10. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. La Rochelle, France, 26-28/03/2013, 40-44. https://www.itavi.asso.fr/download/10427

Protino, J.; Magdelaine, P.; Berri, C.; Méda, B.; Ponchant, P.; Dusart, L.; Chevalier, D.; Dezat, E.; Lescoat, P.; Bouvarel, I., 2015. OVALI : une méthode d'évaluation de la durabilité des filières avicoles 1 – Utilisation pour évaluer l'existant et identifier des marges

de progrès. *11. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, France, 25-26/03/2015, 1047-1054. https://www.itavi.asso.fr/download/8825

Prunier, A.; Bonneau, M., 2006. Alternatives to piglet castration. *Inra Productions Animales*, 19 (5): 347-356.

Prunier, A.; Bonneau, M.; von Borell, E.H.; Cinotti, S.; Gunn, M.; Fredriksen, B.; Giersing, M.; Morton, D.B.; Tuyttens, F.A.M.; Velarde, A., 2006. A review of the welfare consequences of surgical castration in piglets and the evaluation of non-surgical methods. *Animal Welfare*, 15 (3): 277-289.

Prunier, A.; Lebret, B., 2009. Organic pig production in France: characteristics of farms, impacts on health and welfare of animals and on product quality. *Inra Productions Animales*, 22 (3): 179-188.

Pugliese, C.; Sirtori, F., 2012. Quality of meat and meat products produced from southern European pig breeds. *Meat Science*, 90 (3): 511-518. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.09.019

Pugliese, C.; Sirtori, F.; Franci, O., 2013. Feeding strategies for local breeds in view of product quality. *Acta agriculturae Slovenica*, 4: 69-75. https://flore.unifi.it/bitstream/2158/822198/1/2013-%20slovenia2.pdf

Pugliese, C.; Sirtori, F.; Ruiz, J.; Martin, D.; Parenti, S.; Franci, O., 2009. Effect of pasture on chestnut or acorn on fatty acid composition and aromatic profile of fat of Cinta Senese dry-cured ham. *Grasas Y Aceites*, 60 (3): 271-276. http://dx.doi.org/10.3989/gya.130208

Pujol, L.; Albert, I.; Johnson, N.B.; Membre, J.M., 2013. Potential application of quantitative microbiological risk assessment techniques to an aseptic-UHT process in the food industry. *International Journal of Food Microbiology*, 162 (3): 283-296. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.01.021

Pujol, L.; Albert, I.; Magras, C.; Johnson, N.B.; Membre, J.M., 2015. Probabilistic exposure assessment model to estimate aseptic-UHT product failure rate. *International Journal of Food Microbiology*, 192: 124-141. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2014.09.023

Pulido, E.; Fernandez, M.; Prieto, N.; Baldwin, R.L.; Andres, S.; Lopez, S.; Giraldez, F.J., 2019. Effect of milking frequency and alpha-tocopherol plus selenium supplementation on sheep milk lipid composition and oxidative stability. *Journal of Dairy Science*, 102 (4): 3097-3109. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2018-15456

Purchas, R.W., 2012. Carcass evaluation. In: Hui, Y.H., ed. *Handbook of meat and meat processing*. Second Edition ed.: Boca Raton: CRC Press, 333-356.

Pustjens, A.M.; Boerrigter-Eenling, R.; Koot, A.H.; Rozijn, M.; van Ruth, S.M., 2017. Characterization of Retail Conventional, Organic, and Grass Full-Fat Butters by Their Fat Contents, Free Fatty Acid Contents, and Triglyceride and Fatty Acid Profiling. *Foods*, 6 (4). http://dx.doi.org/10.3390/foods6040026

Rabot, C., 1998. *Vitesse de croissance et caractéristiques lipidiques et sensorielles des muscles de poulet*. Paris. 156 p.

Raikos, V.; Campbell, L.; Euston, S.R., 2007. Effects of sucrose and sodium chloride on foaming properties of egg white proteins. *Food Research International*, 40 (3): 347-355. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2006.10.008

Raj, A.B.M., 1994. Effect of stunning method, carcass chilling temperature and filleting time on the texture of turkey breast meat. *British Poultry Science*, 35 (1): 77-89. http://dx.doi.org/10.1080/00071669408417672

Rajput, N.; Naeem, M.; Ali, S.; Rui, Y.; Tian, W., 2012. Effect of Dietary Supplementation of Marigold Pigment on Immunity, Skin and Meat Color, and Growth Performance of Broiler Chickens. *Brazilian Journal of Poultry Science*, 14 (4): 291-295.

Rakonjac, S.; Bogosavljević-Bošković, S.; Škrbić, Z.; Perić, L.; Dosković, V.; Petrović, M.D.; Petričević, V., 2017. The effect of the rearing system, genotype and laying hens age on the egg weight and share of main parts of eggs. *Acta Agriculturae Serbica*, 22 (44): 185-192. http://dx.doi.org/10.5937/AASer1744185R

Ran-Ressler, R.R.; Bae, S.; Lawrence, P.; Wang, D.H.; Brenna, J.T., 2014. Branched-chain fatty acid content of foods and estimated intake in the USA. *British Journal of Nutrition*, 112 (4): 565-572. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114514001081

Ranucci, D.; Branciari, R.; Miraglia, D.; Stocchi, R.; Rea, S.; Loschi, A.R., 2014. Evaluation of Carcass Hygiene in Sheep Subjected to Gas De-Pelting With Different Skinning Procedures. *Italian Journal of Food Safety*, 3 (3): 4143-4143. http://dx.doi.org/10.4081/ijfs.2014.4143

Rao, M.V.S.; Gupta, M.N.; Roy, I. 2004. Process for the isolation of a glycoprotein avidin. Brevet.

Rasmussen, R.S., 2001. Quality of farmed salmonids with emphasis on proximate composition, yield and sensory characteristics. *Aquaculture Research*, 32 (10): 767-786. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.2001.00617.x

Rasmussen, R.S.; Heinrich, M.T.; Hyldig, G.; Jacobsen, C.; Jokumsen, A., 2011. Moderate exercise of rainbow trout induces only minor differences in fatty acid profile, texture, white muscle fibres and proximate chemical composition of fillets. *Aquaculture*, 314 (1-4): 159-164. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.02.003

Rawn, D.F.K.; Sadler, A.R.; Quade, S.C.; Sun, W.F.; Kosarac, I.; Hayward, S.; Ryan, J.J., 2012. The impact of production type and region on polychlorinated biphenyl (PCB), polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran (PCDD/F) concentrations in Canadian chicken egg yolks. *Chemosphere*, 89 (8): 929-935. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.111

Raza, A.; Shabbir, M.A.; Khan, M.I.; Suleria, H.A.R.; Sultan, S., 2015. Effect of Thermal Treatments on the Formation of Heterocyclic Aromatic Amines in Various Meats. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39 (4): 376-383. http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.12242

Redondo-Solano, M.; Valenzuela-Martinez, C.; Cassada, D.A.; Snow, D.D.; Juneja, V.K.; Burson, D.E.; Thippareddi, H., 2013. Effect of meat ingredients (sodium nitrite and erythorbate) and processing (vacuum storage and packaging atmosphere) on germination and outgrowth of Clostridium perfringens spores in ham during abusive cooling. *Food Microbiology*, 35 (2): 108-115. http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2013.02.008

Regost, C.; Arzel, J.; Cardinal, M.; Robin, J.; Laroche, M.; Kaushik, S.J., 2001. Dietary lipid level, hepatic lipogenesis and flesh quality in turbot (Psetta maxima). *Aquaculture*, 193 (3-4): 291-309. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(00)00493-2

Rehault-Godbert, S., 2017. *L'œuf de poule: un produit de qualité au cœur de notre alimentation. Cours*. Tours, FRA: Université François Rabelais.

Rehault-Godbert, S.; Baron, F.; Mignon-Grasteau, S.; Labas, V.; Gautier, M.; Hincke, M.T.; Nys, Y., 2010. Effect of Temperature and Time of Storage on Protein Stability and Anti-Salmonella Activity of Egg White. *Journal of Food Protection*, 73 (9): 1604-1612. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-73.9.1604

Rehault-Godbert, S.; Guyot, N.; Nys, Y., 2019. The Golden Egg: Nutritional Value, Bioactivities, and Emerging Benefits for Human Health. *Nutrients*, 11 (3). http://dx.doi.org/10.3390/nu11030684

Ren, D.X.; Chen, B.; Chen, Y.L.; Miao, S.Y.; Liu, J.X., 2013. The effects of kappa-casein polymorphism on the texture and functional properties of mozzarella cheese. *International Dairy Journal*, 31 (2): 65-69. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.01.005

Renerre, M., 1990. Factors involved in the discoloration of beef meat. *International Journal of Food Science and Technology*, 25 (6): 613-630.

Renerre, M.; Labas, R., 1987. Biochemical factors influencing metmyoglobin formation in beef muscles. *Meat Science*, 19 (2): 151-165. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(87)90020-9

Rentfrow, G.; Chaplin, R.; Suman, S.P., 2012. Technology of dry-cured ham production: Science enhancing art. *Animal Frontiers*, 2 (4): 26-31. http://dx.doi.org/10.2527/af.2012-0059

République Française, 2003. Arrêté du 16 janvier 2003 établissant les normes minimales relatives à la protection des porcs. *JORF n°18 du 22 Janvier 2003, pp. 1309-1311.* . https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000005633899

République Française, 2007a. Arrêté du 2 février 2007 portant homologation d'avenants au cahier des charges concernant le mode de production et de préparation biologique des animaux et des produits animaux définissant les modalités d'application du règlement (CEE) n° 2092/91 modifié du Conseil et/ou complétant les dispositions du règlement (CEE) n° 2092/91 modifié du Conseil. *JORF n°37 du 13 février 2007, p. 2688*.

République Française, 2007b. Décret n°2007-628 du 27 avril 2007 relatif aux fromages et spécialités fromagères. *JORF n°101 du 29 avril 2007 page 7628* https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000644875&categorieLien=id

République Française, 2013. Décret n° 2013-1059 du 22 novembre 2013 relatif à l'appellation d'origine contrôlée Camembert de Normandie. *JORF n°0273 du 24 novembre 2013 page 19103 texte n°25* http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=?cidTexte=JORFTEXT000028225105&dateTexte=&oldAction=dernierJO&categorieLien=id

République Française, 2014. Arrêté du 10 juillet 2014 modifiant l'arrêté du 18 mars 1993 relatif à la publicité des prix des viandes de boucherie et de charcuterie. *JORF n°0174 du 30 juillet 2014 page 12525*. http://jsessionid=5184B10BCC6C96DA2EFAAAC9099316CB.tpdila10v_3?cidTexte=JORFTEXT000029307950&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id&idJO=JORFCONT000029307739

Resano, H.; Perez-Cueto, F.J.A.; Sanjuan, A.I.; de Barcellos, M.D.; Grunert, K.G.; Verbeke, W., 2011. Consumer satisfaction with dry-cured ham in five European countries. *Meat Science*, 87 (4): 336-343. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.008

Resano, H.; Sanjuan, A.I.; Cilla, I.; Roncales, P.; Albisu, L.M., 2010. Sensory attributes that drive consumer acceptability of dry-cured ham and convergence with trained sensory data. *Meat Science*, 84 (3): 344-351. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.052

Resconi, V.C.; Campo, M.M.; Font-i-Furnols, M.; Montossi, F.; Sanudo, C., 2009. Sensory evaluation of castrated lambs finished on different proportions of pasture and concentrate feeding systems. *Meat Science*, 83 (1): 31-37. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.03.004

Resconi, V.C.; Escudero, A.; Campo, M.M., 2013. The Development of Aromas in Ruminant Meat. *Molecules*, 18 (6): 6748-6781. http://dx.doi.org/10.3390/molecules18066748

Resurreccion, A.V.A., 2004. Sensory aspects of consumer choices for meat and meat products. *Meat Science*, 66 (1): 11-20. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00021-4

Ribeiro, A.R.; Altintzoglou, T.; Mendes, J.; Nunes, M.L.; Dinis, M.T.; Dias, J., 2019. Farmed fish as a functional food: Perception of fish fortification and the influence of origin - Insights from Portugal. *Aquaculture*, 501: 22-31. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.11.002

Ricci, A.; Allende, A.; Bolton, D.; Chemaly, M.; Davies, R.; Escamez, P.S.F.; Girones, R.; Herman, L.; Koutsoumanis, K.; Norrung, B.; Robertson, L.; Ru, G.; Sanaa, M.; Simmons, M.; Skandamis, P.; Snary, E.; Speybroeck, N.; Ter Kuile, B.; Threlfall, J.; Wahlstrom, H.; Takkinen, J.; Wagner, M.; Arcella, D.; Felicio, M.T.D.; Georgiadis, M.; Messens, W.; Lindqvist, R.; Hazards, E.P.B., 2018. Listeria monocytogenes contamination of ready-to-eat foods and the risk for human health in the EU. *Efsa Journal*, 16 (1). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5134

Richoux, R.; Mietton, B., 2018. Gestion et optimisation du salage. In: Gillis, J.-C.; Ayerbe, A., eds. *Le Fromage*. Paris: Tec&Doc Lavoisier (4ème édition), Chapitre 8, 406-417.

Ripoll, G.; Alberti, P.; Panea, B.; Failla, S.; Hocquette, J.F.; Dunner, S.; Sanudo, C.; Olleta, J.L.; Christensen, M.; Ertbjerg, P.; Richardson, I.; Concetti, S.; Williams, J.L., 2018. Colour variability of beef in young bulls from fifteen European breeds. *International Journal of Food Science and Technology*, 53 (12): 2777-2785. http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.13890

Rivaroli, D.; Prunier, A.; Meteau, K.; do Prado, I.N.; Prache, S., 2019. Tannin-rich sainfoin pellet supplementation reduces fat volatile indoles content and delays digestive parasitism in lambs grazing alfalfa. *Animal*, 13 (9): 1883-1890. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118003543

Robb, D.H.F.; Kestin, S.C., 2002. Methods used to kill fish: Field observations and literature reviewed. *Animal Welfare*, 11 (3): 269-282.

Robb, D.H.F.; Kestin, S.C.; Warriss, P.D.; Nute, G.R., 2002. Muscle lipid content determines the eating quality of smoked and cooked Atlantic salmon (Salmo solar). *Aquaculture*, 205 (3-4): 345-358. http://dx.doi.org/10.1016/s0044-8486(01)00710-4

Robin, J.; Cravedi, J.P.; Hillenweck, A.; Deshayes, C.; Vallod, D., 2006. Off flavor characterization and origin in French trout farming. *Aquaculture*, 260 (1-4): 128-138. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.05.058

Rocchi, L.; Paolotti, L.; Rosati, A.; Boggia, A.; Castellini, C., 2019. Assessing the sustainability of different poultry production systems: A multicriteria approach. *Journal of Cleaner Production*, 211 (O, 2006, 14044: Environmental Management- Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines): 103-114. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.013

Rodriguez, A.; Maier, L.; Paseiro-Losada, P.; Aubourg, S.P., 2016. Changes in Sensory and Physical Parameters in Chill-Stored Farmed Coho Salmon (Oncorhynchus kisutch). *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 25 (5): 633-643. http://dx.doi.org/10.1080/10498850.2014.913753

Roguet, C.; Marion, C.; Magdelaine, P.; Dockes, A.C., 2018. Les démarches mises en oeuvre par les filières animales en France en réponse aux attentes sociétales en termes de bien-être animal : typologie et perspectives. *Notes et études socio-économiques*, n° 44 (- décembre 2018): 7-35.

Roguet, C.; Perrot, C.; Gallot, S.; Rieu, M., 2014. Les types d'exploitations agricoles ayant des porcs en France en 2010 : identification, caractéristiques et évolution. *46. Journées de la Recherche Porcine*. Paris, 229-234.

Roinsart, A.; Alibert, L., 2018. Contexte de la production porcine biologique. . *Journée technique « Porc Bio », ITAB – IFIP, 15 Novembre 2018*. Paris.

Roncarati, A.; Sirri, F.; Felici, A.; Stocchi, L.; Melotti, P.; Meluzzi, A., 2011. Effects of dietary supplementation with krill meal on pigmentation and quality of flesh of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). *Italian Journal of Animal Science*, 10 (2): 139-145. http://dx.doi.org/10.4081/ijas.2011.e27

Rosenvold, K.; Andersen, H.J., 2003. Factors of significance, for pork quality - a review. *Meat Science*, 64 (3): 219-237. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00186-9

Rossi, G.; Schiavon, S.; Lomolino, G.; Cipolat-Gotet, C.; Simonetto, A.; Bittante, G.; Tagliapietra, F., 2018. Garlic (Allium sativum L.) fed to dairy cows does not modify the cheese-making properties of milk but affects the color, texture, and flavor of ripened cheese. *Journal of Dairy Science*, 101 (3): 2005-2015. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2017-13884

Rossi, M.; Casiraghi, E.; Primavesi, L.; Pompei, C.; Hidalgo, A., 2010. Functional properties of pasteurised liquid whole egg products as affected by the hygienic quality of the raw eggs. *Lwt-Food Science and Technology*, 43 (3): 436-441. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2009.09.008

Rossvoll, E.; Rotterud, O.J.; Hauge, S.J.; Alvseike, O., 2018. A comparison of two evisceration methods on hygienic quality in the pelvic area of sheep carcasses. *Meat Science*, 137: 134-138. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.11.025

Roszko, M.; Szymczyk, K.; Jedrzejczak, R., 2014. Influence of hen breeding type on PCDD/F, PCB & PBDE levels in eggs. *Science of the Total Environment*, 487: 279-289. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.033

Rotabakk, B.T.; Birkeland, S.; Jeksrud, W.K.; Sivertsvik, M., 2006. Effect of modified atmosphere packaging and soluble gas stabilization on the shelf life of skinless chicken breast fillets. *Journal of Food Science*, 71 (2): S124-S131. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb08915.x

Roth, B.; Jenssen, M.D.; Jonassen, T.M.; Foss, A.; Imsland, A., 2007. Change in flesh quality associated with early maturation of Atlantic halibut (Hippoglossus hippoglossus). *Aquaculture Research*, 38 (7): 757-763. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2109.2007.01729.x

Roth, B.; Johansen, S.J.S.; Suontama, J.; Kiessling, A.; Leknes, O.; Guldberg, B.; Handeland, S., 2005. Seasonal variation in flesh quality, comparison between large and small Atlantic salmon (Salmo salar) transferred into seawater as 0+or 1+smolts. *Aquaculture*, 250 (3-4): 830-840. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.05.009

Roth, B.; Moeller, D.; Veland, J.O.; Imsland, A.; Slinde, E., 2002. The effect of stunning methods on rigor mortis and texture properties of Atlantic salmon (Salmo salar). *Journal of Food Science*, 67 (4): 1462-1466. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10306.x

Roth, B.; Slinde, E.; Arildsen, J., 2006. Pre or post mortem muscle activity in Atlantic salmon (Salmo salar). The effect on rigor mortis and the physical properties of flesh. *Aquaculture*, 257 (1-4): 504-510. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.10.021

Rouel, J.; Gaborit, P.; Chabosseau, J.M.; Raynal, K.; Ferlay, A.; Lauret, A.; Chilliard, Y., 2002. Effects of forage type and lipid supplementation on milk fatty acid composition and sensorial quality of goat dairy products. *Rencontres Recherches Ruminants*. Paris. Inst Natl Recherche Agronomique, 359-362.

Roussel, S.; Felix, B.; Vingadassalon, N.; Grout, J.; Hennekinne, J.A.; Guillier, L.; Brisabois, A.; Auvray, F., 2015. Staphylococcus aureus strains associated with food poisoning outbreaks in France: comparison of different molecular typing methods, including MLVA. *Frontiers in Microbiology*, 6. http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2015.00882

Rousset-Akrim, S.; Young, O.A.; Berdague, J.L., 1997. Diet and growth effects in panel assessment of sheepmeat odour and flavour. *Meat Science*, 45 (2): 169-181. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(96)00099-x

Royan, M.; Meng, G.Y.; Othman, F.; Sazili, A.O.; Hanachi, P., 2013. Effects of dietary combination of conjugated linoleic acid with fish oil or soybean oil on fatty acid composition of broiler meat. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 77 (3): 189-198.

Russell, E.A.; Lynch, P.B.; O'Sullivan, K.; Kerry, J.P., 2004. Dietary supplementation of alpha-tocopheryl acetate on alpha-tocopherol levels in duck tissues and its influence on meat storage stability. *International Journal of Food Science and Technology*, 39 (3): 331-340. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.00790.x

Rutten, M.J.M.; Bovenhuis, H.; Komen, H., 2004. Modeling fillet traits based on body measurements in three Nile tilapia strains (Oreochromis niloticus L.). *Aquaculture*, 231 (1-4): 113-122. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.11.002

Rymer, C.; Gibbs, R.A.; Givens, D.I., 2010. Comparison of algal and fish sources on the oxidative stability of poultry meat and its enrichment with omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Poultry Science*, 89 (1): 150-159. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2009-00232

Sabikhi, L.; Mathur, B.N., 2001. Qualitative and quantitative analysis of beta-casomorphins in Edam cheese. *Milchwissenschaft-Milk Science International*, 56 (4): 198-200.

Salem, M.; Al-Tobasei, R.; Ali, A.; Lourenco, D.; Gao, G.T.; Palti, Y.; Kenney, B.; Leeds, T.D., 2018. Genome-Wide Association Analysis With a 50K Transcribed Gene SNP-Chip Identifies QTL Affecting Muscle Yield in Rainbow Trout. *Frontiers in Genetics*, 9. http://dx.doi.org/10.3389/fgene.2018.00387

Sales, J., 2014. Quantification of the effects of castration on carcass and meat quality of sheep by meta-analysis. *Meat Science*, 98 (4): 858-868. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.001

Saliba, L.; Gervais, R.; Lebeuf, Y.; Chouinard, P.Y., 2014. Effect of feeding linseed oil in diets differing in forage to concentrate ratio: 1. Production performance and milk fat content of biohydrogenation intermediates of a- linolenic acid. *Journal of Dairy Research*, 81 (1): 82-90. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029913000691

Salim, H.M.; Lee, H.R.; Jo, C.; Lee, S.K.; Lee, B.D., 2011. Influence of Various Levels of Organic Zinc on the Live Performance, Meat Quality Attributes, and Sensory Properties of Broiler Chickens. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 31 (2): 207-214. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2011.31.2.207

Salines, M.; Allain, V.; Roul, H.; Magras, C.; Le Bouquin, S., 2017. Rates of and reasons for condemnation of poultry carcases: harmonised methodology at the slaughterhouse. *Veterinary Record*, 180 (21): 516-+. http://dx.doi.org/10.1136/vr.104000

Salines, M.; Andraud, M.; Rose, N., 2018. Combining network analysis with epidemiological data to inform risk-based surveillance: Application to hepatitis E virus (HEV) in pigs. *Preventive Veterinary Medicine*, 149: 125-131. http://dx.doi.org/10.1016/j.prevetmed.2017.11.015

Salman, S.; Khol-Parisini, A.; Schafft, H.; Lahrssen-Wiederholt, M.; Hulan, H.; Dinse, D.; Zentek, J., 2009. The role of dietary selenium in bovine mammary gland health and immune function. *Animal Health Research Reviews*, 10 (1): 21-34.

Salmi, B.; Trefan, L.; Bloom-Hansen, J.; Bidanel, J.P.; Doeschl-Wilson, A.B.; Larzul, C., 2010. Meta-analysis of the effect of the halothane gene on 6 variables of pig meat quality and on carcass leanness. *Journal of Animal Science*, 88 (9): 2841-2855. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2009-2508

Salmon, R.E.; Stevens, V.I., 1989. Yield and composition of raw and cooked meat of small white turkeys as influenced by dietary nutrient density and energy to protein ratio. *British Poultry Science*, 30 (2): 283-288. http://dx.doi.org/10.1080/00071668908417149

Salvador, A.; Igual, M.; Contreras, C.; Martiez-Navarrete, N.; Camacho, M.D., 2014. Effect of the inclusion of citrus pulp in the diet of goats on cheeses characteristics. *Small Ruminant Research*, 121 (2-3): 361-367. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.06.012

Salvat, G.; Guyot, M.; Protino, J., 2017. Monitoring Salmonella, Campylobacter, Escherichia coli and Staphylococcus aureus in traditional free-range 'Label Rouge' broiler production: a 23-year survey programme. *Journal of Applied Microbiology*, 122 (1): 248-256. http://dx.doi.org/10.1111/jam.13313

Samant, S.S.; Crandall, P.G.; O'Bryan, C.A.; Lingbeck, J.M.; Martin, E.M.; Tokar, T.; Seo, H.S., 2016. Effects of smoking and marination on the sensory characteristics of cold-cut chicken breast filets: A pilot study. *Food Science and Biotechnology*, 25 (6): 1619-1625. http://dx.doi.org/10.1007/s10068-016-0249-6

Samant, S.S.; Seo, H.S., 2016. Quality perception and acceptability of chicken breast meat labeled with sustainability claims vary as a function of consumers' label-understanding level. *Food Quality and Preference*, 49: 151-160. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.12.004

Samiullah; Roberts, J.R.; Chousalkar, K.K., 2014. Effect of production system and flock age on egg quality and total bacterial load in commercial laying hens. *Journal of Applied Poultry Research*, 23 (1): 59-70. http://dx.doi.org/10.3382/japr.2013-00805

Sampels, S., 2015. The effects of storage and preservation technologies on the quality of fish products: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39 (6): 1206-1215. http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.12337

Sampson, H.A., 2004. Update on food allergy. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 113 (5): 805-819. http://dx.doi.org/10.1016/j.jaci.2004.03.014

Sams, A., 2002. Post-mortem electrical stimulation of broilers. *Worlds Poultry Science Journal*, 58 (2): 147-157. http://dx.doi.org/10.1079/wps20020014

Sanchez-Rivera, L.; Menard, O.; Recio, I.; Dupont, D., 2015. Peptide mapping during dynamic gastric digestion of heated and unheated skimmed milk powder. *Food Research International*, 77: 132-139. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.001

Sanchez, M.P.; Wolf, V.; Laithier, C.; El Jabri, M.; Beuvier, E.; Rolet-Repecaud, O.; Gaudilliere, N.; Minery, S.; Ramayo-Caldas, Y.; Tribout, T.; Michenet, A.; Boussaha, M.; Taussat, S.; Fritz, S.; Delacroix-Buchet, A.; Grosperrin, P.; Brochard, M.; Boichard, D., 2019. Genetic analysis of milk cheese-making traits predicted from mid-infrared spectra in Montbeliarde cows. *Inra Productions Animales*, 32 (3): 379-398

Sanchez, R.C.; Obregon, E.B.; Rauco, M.R., 2011. Hypoxia is like an ethiological factor in vertebral column deformity of salmon (Salmo salar). *Aquaculture*, 316 (1-4): 13-19. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.03.012

Sandercock, D.A.; Hunter, R.R.; Nute, G.R.; Hocking, P.M.; Mitchell, M.A., 1999. Physiological responses to acute heat stress in broilers: implications for meat quality. *Proceedings of the 14th European Symposium on the Quality of Poultry Meat,*. Bolonga (Italy): 19-23/09/99, 271-276.

Sanders, P.; Bousquet-Melou, A.; Chauvin, C.; Toutain, P.L., 2011. Use of antibiotics in farming and stakes in public health. *Inra Productions Animales*, 24 (2): 199-204.

Sans, P., 2003. La qualité différenciée de la viande bovine: la nécessaire stratégie d'innovation. *Biotechnologie, Agronomie Société et Environnement*, 7 (3-4): 151-160.

Sans, P.; Legrand, I., 2018. Tendance d'évolution des caractéristiques des marchés. In: Ellies-Oury, M.P.; Hocquette, J.F., eds. *La chaîne de la viande bovine – Production, transformation, valorisation et consommation*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (*Sciences & Techniques Agroalimentaires*), 125-142.

Sans, P.; Olivier-Salvagnac, V.; Montian, G.; Pichon, F.; Moncé, T., 2017. Perception par les consommateurs des qualités de l'oeuf de poule produit dans un élevage en agroforesterie. *12. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, np.

Santana, M.C.A.; Fiorentini, G.; Dian, P.H.M.; Canesin, R.C.; Messana, J.D.; Oliveira, R.V.; Reis, R.A.; Berchielli, T.T., 2014. Growth performance and meat quality of heifers receiving different forms of soybean oil in the rumen. *Animal Feed Science and Technology*, 194: 35-43. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.05.001

Santarelli, R.L.; Pierre, F.; Corpet, D.E., 2008. Processed meat and colorectal cancer: A review of epidemiologic and experimental evidence. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 60 (2): 131-144. http://dx.doi.org/10.1080/01635580701684872

Sante-Lhoutellier, V.; Engel, E.; Gatellier, P., 2008. Assessment of the influence of diet on lamb meat oxidation. *Food Chemistry*, 109 (3): 573-579. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.11.081

Santos, C.; Hoz, L.; Cambero, M.I.; Cabeza, M.C.; Ordonez, J.A., 2008. Enrichment of dry-cured ham with alpha-linolenic acid and alpha-tocopherol by the use of linseed oil and alpha-tocopheryl acetate in pig diets. *Meat Science*, 80 (3): 668-674. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.03.004

Santschi, D.E.; Berthiaume, R.; Matte, J.J.; Mustafa, A.F.; Girard, C.L., 2005. Fate of supplementary B-vitamins in the gastrointestinal tract of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 88 (6): 2043-2054. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72881-2

Sanudo, C.; Alfonso, M.; San Julian, R.; Thorkelsson, G.; Valdimarsdottir, T.; Zygoyiannis, D.; Stamataris, C.; Piasentier, E.; Mills, C.; Berge, P.; Dransfield, E.; Nute, G.R.; Enser, A.; Fisher, A.V., 2007. Regional variation in the hedonic evaluation of lamb meat from diverse production systems by consumers in six European countries. *Meat Science*, 75 (4): 610-621. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.09.009

Sanudo, C.; Nute, G.R.; Campo, M.M.; Maria, G.; Baker, A.; Sierra, I.; Enser, M.E.; Wood, J.D., 1998. Assessment of commercial lamb meat quality by British and Spanish taste panels. *Meat Science*, 48 (1-2): 91-100. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00080-6

Sarker, P.; Pilote, A.; Auffret, M.; Proulx, E.; Villemur, R.; Deschamps, M.H.; Vandenberg, G., 2014. Reducing geosmin off-flavor compounds and waste outputs through dietary phosphorus management in rainbow trout aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions*, 6 (1): 105-117. http://dx.doi.org/10.3354/aei00119

Sato, K.; Hegarty, G.R., 1971. Warmed-over flavor in cooked meats. *Journal of Food Science*, 36 (7): 1098-1102.

Sato, S.; Uegaki, R.; Kawamura, J.; Kimura, T., 2018. Enhancement of -tocopherol by ensiling in barley (Hordeum vulgare) and wheat (Triticum aestivum). *Grassland Science*, 64 (4): 245-251. http://dx.doi.org/10.1111/grs.12204

Sauvant, D.; Giger-Reverdin, S.; Meschy, F.; Puillet, L.; Schmidely, P., 2012. Updating nutritional recommendations for dairy goats. *Inra Productions Animales*, 25 (3): 259-276.

Scerra, M.; Luciano, G.; Caparra, P.; Foti, F.; Cilione, C.; Giorgi, A.; Scerra, V., 2011. Influence of stall finishing duration of Italian Merino lambs raised on pasture on intramuscular fatty acid composition. *Meat Science*, 89 (2): 238-242. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.012

Schaafsma, G., 2000. The protein digestibility-corrected amino acid score. *Journal of Nutrition*, 130 (7): 1865S-1867S.

Schaefer, D.M.; Liu, Q.; Faustman, C.; Yin, M.C., 1995. Supranutritional Administration of Vitamin-E and VItamin-C Improves Oxidative Stability of Beef. *Journal of Nutrition*, 125 (suppl_6): S1792S-S1798S. http://dx.doi.org/10.1093/jn/125.suppl_6.1792S

Schafer, A.; Rosenvold, K.; Purslow, P.P.; Andersen, H.J.; Henckel, P., 2002. Physiological and structural events postmortem of importance for drip loss in pork. *Meat Science*, 61 (4): 355-366. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00205-4

Schafer, D.F.; Steffens, J.; Barbosa, J.; Zeni, J.; Paroul, N.; Valduga, E.; Lunges, A.; Backes, G.T.; Cansian, R.L., 2017. Monitoring of contamination sources of Listeria monocytogenes in a poultry slaughterhouse. *Lwt-Food Science and Technology*, 86: 393-398. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.024

Schennink, A.; Heck, J.M.L.; Bovenhuis, H.; Visker, M.; van Valenberg, H.J.F.; van Arendonk, J.A.M., 2008. Milk fatty acid unsaturation: Genetic parameters and effects of stearoyl-CoA desaturase (SCD1) and acyl CoA : diacylglycerol acyltransferase 1 (DGAT1). *Journal of Dairy Science*, 91 (5): 2135-2143. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0825

Schennink, A.; Stoop, W.M.; Visker, M.; Heck, J.M.L.; Bovenhuis, H.; van der Poel, J.J.; van Valenberg, H.J.F.; van Arendonk, J.A.M., 2007. DGAT1 underlies large genetic variation in milk-fat composition of dairy cows. *Animal Genetics*, 38 (5): 467-473. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2052.2007.01635.x

Schleenbecker, R.; Hamm, U., 2013. Consumers' perception of organic product characteristics. A review. *Appetite*, 71: 420-429. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2013.08.020

Schmidely, P.; Ferlay, A.; Maxin, G.; Hurtaud, C.; Peyraud, J.L., 2017. The animal's requirements and responses to diets: Milk fat content and composition. In: Sauvant, D.; Delaby, L.; Noziere, P., eds. *Feed Unit Systems for Ruminants*. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.

Schmidely, P.; Sauvant, D., 2001. Fat content yield and composition of milk in small ruminants: effects of concentrate level and addition of fat. *Inra Productions Animales*, 14 (5): 337-354.

Schmidely, R.; Glasser, F.; Doreau, M.; Sauvant, D., 2008. Digestion of fatty acids in ruminants: a meta-analysis of flows and variation factors. 1. Total fatty acids. *Animal*, 2 (5): 677-690. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731108001717

Schmidt, M.M.; Dornelles, R.C.P.; Vidal, A.R.; Fontoura, A.; Kubota, E.H.; Mello, R.O.; Kempka, A.P.; Demiate, I.M., 2017. Development of cooked and smoked chicken sausage with reduced sodium and fat. *Journal of Applied Poultry Research*, 26 (1): 130-144. http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfw054

Schneider, B.L.; Renema, R.A.; Betti, M.; Carney, V.L.; Zuidhof, M.J., 2012. Effect of holding temperature, shackling, sex, and age on broiler breast meat quality. *Poultry Science*, 91 (2): 468-477. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2010-00952

Schoeters, G.; Hoogenboom, R., 2006. Contamination of free-range chicken eggs with dioxins and dioxin-like polychlorinated biphenyls. *Molecular Nutrition & Food Research*, 50 (10): 908-914. http://dx.doi.org/10.1002/mnfr.200500201

Schone, F.; Leiterer, M.; Lebzien, P.; Bemmann, D.; Spolders, M.; Flachowsky, G., 2009. Iodine concentration of milk in a dose-response study with dairy cows and implications for consumer iodine intake. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 23 (2): 84-92. http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2009.02.004

Schone, F.; Sporl, K.; Leiterer, M., 2017. Iodine in the feed of cows and in the milk with a view to the consumer's iodine supply. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 39: 202-209. http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.10.004

Schreurs, N.M., 2013. Comparison of castrate and entire ram-lambs for meat quality and skatole in the fat. *New Zealand Society of Animal Production*, 73: 68-70.

Schreurs, N.M.; Kenyon, P.R., 2017a. Animal and on-farm factors affecting sheep and lamb meat quality. In: Greyling, J., ed. *Achieving sustainable production of sheep*. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 29-52. http://dx.doi.org/10.19103/AS.2016.0019.24

Schreurs, N.M.; Kenyon, P.R., 2017b. Factors affecting sheep carcass characteristics. In: Greyling, J., ed. *Achieving sustainable production of sheep*. Cambridge: Burleigh Dodds Publishing Limited, 3-28. http://dx.doi.org/10.19103/AS.2016.0019.01

Schreurs, N.M.; Lane, G.A.; Tavendale, M.H.; Barry, T.N.; McNabb, W.C., 2008. Pastoral flavour in meat products from ruminants fed fresh forages and its amelioration by forage condensed tannins. *Animal Feed Science and Technology*, 146 (3-4): 193-221. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.03.002

Schreurs, N.M.; Marotti, D.M.; Tavendale, M.H.; Lane, G.A.; Barry, T.N.; Lopez-Villalobos, N.; McNabb, W.C., 2007a. Concentration of indoles and other rumen metabolites in sheep after a meal of fresh white clover, perennial ryegrass or Lotus corniculatus and the appearance of indoles in the blood. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87 (6): 1042-1051. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2804

Schreurs, N.M.; McNabb, W.C.; Tavendale, M.H.; Lane, G.A.; Barry, T.N.; Cummings, T.; Fraser, K.; Lopez-Villalobos, N.; Ramirez-Restrepo, C.A., 2007b. Skatole and indole concentration and the odour of fat from lambs that had grazed perennial ryegrass/white clover pasture or Lotus corniculatus. *Animal Feed Science and Technology*, 138 (3-4): 254-271. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.11.020

Schreurs, N.M.; Tavendale, M.H.; Lane, G.A.; Barry, T.N.; McNabb, W.C.; Cummings, T.; Fraser, K.; Lopez-Villalobos, N., 2007c. The effect of supplementation of a white clover or perennial ryegrass diet with grape seed extract on indole and skatole metabolism and the sensory characteristics of lamb. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87 (6): 1030-1041. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2802

Schroeder, S.; Grigor, J.M.; Stathopoulos, C.E.; Savage, A.; Cassidy, P.; Toepfl, S.; Wilkin, J.D., 2018. The effect of collagenase, water and calcium chloride on the removal of Salmo salar (salmon) and Oncorhynchus mykiss (trout) pin bones. *Aquaculture International*, 26 (6): 1353-1363. http://dx.doi.org/10.1007/s10499-018-0288-5

Schuck, P.; Dolivet, A.; Jeantet, R., 2012. *Les poudres laitières et alimentaires: Techniques d'analyse*. Paris (FR): Lavoisier, 224 p.

Schultz, J.R.; Snyder, H.E.; Forsythe, R.H., 1968. Co-dried carbohydrates effect on performance of egg yolk solids. *Journal of Food Science*, 33 (5): 507-&. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1968.tb03665.x

Schwab, E.C.; Schwab, C.G.; Shaver, R.D.; Girard, C.L.; Putnam, D.E.; Whitehouse, N.L., 2006. Dietary forage and nonfiber carbohydrate contents influence B-vitamin intake, duodenal flow, and apparent ruminal synthesis in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 89 (1): 174-187. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72082-3

Schwendel, B.H.; Wester, T.J.; Morel, P.C.H.; Fong, B.; Tavendale, M.H.; Deadman, C.; Shadbolt, N.M.; Otter, D.E., 2017. Pasture feeding conventional cows removes differences between organic and conventionally produced milk. *Food Chemistry*, 229: 805-813. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.104

Schwendel, B.H.; Wester, T.J.; Morel, P.C.H.; Tavendale, M.H.; Deadman, C.; Shadbolt, N.M.; Otter, D.E., 2015. Invited review: Organic and conventionally produced milk-An evaluation of factors influencing milk composition. *Journal of Dairy Science*, 98 (2): 721-746. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8389

Schwob, S.; Lebret, B.; Louveau, I., 2020. Adiposité et génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits. *INRAE Productions Animales*, sous presse.

Schwob, S.; Vautier, A.; Lhommeau, T., 2018. Etude génétique du défaut « jambon déstructuré ». *Les Cahiers de l'IFIP*, 5 (2): 9-20.

Scollan, N.D.; Dannenberger, D.; Nuernberg, K.; Richardson, I.; MacKintosh, S.; Hocquette, J.F.; Moloney, A.P., 2014. Enhancing the nutritional and health value of beef lipids and their relationship with meat quality. *Meat Science*, 97 (3): 384-394. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.02.015

Sebranek, J.G.; Bacus, J.N., 2007. Cured meat products without direct addition of nitrate or nitrite: what are the issues? *Meat Science*, 77 (1): 136-147. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.025

Secci, G.; Parisi, G.; Dasilva, G.; Medina, I., 2016a. Stress during slaughter increases lipid metabolites and decreases oxidative stability of farmed rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) during frozen storage. *Food Chemistry*, 190: 5-11. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.051

Secci, G.; Serra, A.; Concollato, A.; Conte, G.; Mele, M.; Olsen, R.E.; Parisi, G., 2016b. Carbon monoxide as stunning/killing method on farmed Atlantic salmon (Salmo salar): effects on lipid and cholesterol oxidation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96 (7): 2426-2432. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7362

Seck, M.; Linton, J.A.V.; Allen, M.S.; Castagnino, D.S.; Chouinard, P.Y.; Girard, C.L., 2017. Apparent ruminal synthesis of B vitamins in lactating dairy cows fed diets with different forage-to-concentrate ratios. *Journal of Dairy Science*, 100 (3): 1914-1922. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-12111

Segato, S.; Galaverna, G.; Contiero, B.; Berzaghi, P.; Caligiani, A.; Marseglia, A.; Cozzi, G., 2017. Identification of Lipid Biomarkers To Discriminate between the Different Production Systems for Asiago PDO Cheese. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (45): 9888-9893. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03629

Seguin, F.; Bouvarel, I.; Pottiez, E.; Van der Werf, H., 2013. Analyse du cycle de vie des produits avicoles biologiques en France. *10. Journées de la Recherche Avicole et des Palmipèdes à Foie Gras*. La Rochelle, France, 26-28/03/2013, 104-108. https://www.itavi.asso.fr/download/7802

Seguin, F.; Bouvarel, I.; Tusek, J.L.; Debiard, A.; Quentin, M.; Van der Werf, H., 2011. Impacts environnementaux liés à la production d'aliments pour poulets biologiques. *9. Journées de la Recherche Avicole*. Tours, France, 29 et 30 mars 2011, 86-90. https://www.itavi.asso.fr/download/7736

Sellier, P., 1988. Aspects génétiques des qualités technologiques et organoleptiques de la viande chez le porc. *20. Journées de la Recherche Porcine en France*. Paris. ITP, 227-242.

Sellier, P., 1998. Genetics of meat and carcass traits. In: Rothschild, M.F.; Ruvinsky, A., eds. *The Genetics of the Pig*. 1ere Edition ed. Wallingford (UK): CAB International, 463-510.

Sen, U.; Sirin, E.; Ensoy, U.; Aksoy, Y.; Ulutas, Z.; Kuran, M., 2016. The effect of maternal nutrition level during mid-gestation on postnatal muscle fibre composition and meat quality in lambs. *Animal Production Science*, 56 (5): 834-843. http://dx.doi.org/10.1071/an14663

Sentandreu, M.A.; Armenteros, M.; Calvete, J.J.; Ouali, A.; Aristoy, M.C.; Toldra, F., 2007. Proteomic identification of actin-derived oligopeptides in dry-cured ham. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (9): 3613-3619. http://dx.doi.org/10.1021/jf061911g

Sepulveda, W.S.; Maza, M.T.; Pardos, L., 2011. Aspects of quality related to the consumption and production of lamb meat. Consumers versus producers. *Meat Science*, 87 (4): 366-372. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.013

Serment, A.; Schmidely, P.; Giger-Reverdin, S.; Chapoutot, P.; Sauvant, D., 2011. Effects of the percentage of concentrate on rumen fermentation, nutrient digestibility, plasma metabolites, and milk composition in mid-lactation goats. *Journal of Dairy Science*, 94 (8): 3960-3972. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-4041

Seuss-Baum, I.; Nau, F.; Guerin-Dubiard, C., 2011. The nutritional quality of eggs. In: VanImmerseel, F.; Nys, Y.; Bain, M., eds. *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products, Vol 2: Egg Safety and Nutritional Quality*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition, 214), 201-236.

Sevi, A.; Taibi, L.; Albenzio, M.; Muscio, A.; Annicchiarico, G., 2000. Effect of parity on milk yield, composition, somatic cell count, renneting parameters and bacteria counts of Comisana ewes. *Small Ruminant Research*, 37 (1-2): 99-107. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-4488(99)00133-9

Sforza, S.; Pigazzani, A.; Motti, M.; Porta, C.; Virgili, R.; Galaverna, G.; Dossena, A.; Marchelli, R., 2001. Oligopeptides and free amino acids in Parma hams of known cathepsin B activity. *Food Chemistry*, 75 (3): 267-273. http://dx.doi.org/10.1016/s0308-8146(01)00224-2

Sheath, G.W.; Coulon, J.B.; Young, O.A., 2001. Grassland management and animal product quality. *19. International Grassland Congress*. Piracicaba, SP, Brasil. 1019-1026.

Sheehy, P.J.A.; Morrissey, P.A.; Flynn, A., 1991. Influence of dietary alpha-tocopherol on tocopherol concentrations in chick-tissues. *British Poultry Science*, 32 (2): 391-397. http://dx.doi.org/10.1080/00071669108417364

Sheldon, B.W.; Curtis, P.A.; Dawson, P.L.; Ferket, P.R., 1997. Effect of dietary vitamin E on the oxidative stability, flavor, color, and volatile profiles of refrigerated and frozen turkey breast meat. *Poultry Science*, 76 (4): 634-641. http://dx.doi.org/10.1093/ps/76.4.634

Shi, C.; Wang, J.; Yang, Z.; Gao, X.; Liu, Y.; Wang, C., 2019. Sustained Swimming Training Is Associated With Reversible Filet Texture Changes of European Sea Bass (*Dicentrarchus labrax* L.). *Frontiers in Physiology*, 10. http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2019.00725

Shingfield, K.J.; Bonnet, M.; Scollan, N.D., 2013. Recent developments in altering the fatty acid composition of ruminant-derived foods. *Animal*, 7: 132-162. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731112001681

Shingfield, K.J.; Salo-Vaananen, P.; Pahkala, E.; Toivonen, V.; Jaakkola, S.; Piironen, V.; Huhtanen, P., 2005. Effect of forage conservation method, concentrate level and propylene glycol on the fatty acid composition and vitamin content of cows' milk. *Journal of Dairy Research*, 72 (3): 349-361. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029905000919

Sibra, C.; Schmidely, P.; Martin, B., 2018. Qualité nutritionnelle, sensorielle et technologique de la viande de volailles. In: Berthelot Valérie (coord.), ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui) Partie 2 - Déterminants alimentaires et non alimentaires en élevage de la qualité des produits (Chapitre 4), 93-153.

Sibut, V.; Le Bihan-Duval, E.; Tesseraud, S.; Godet, E.; Bordeau, T.; Cailleau-Audouin, E.; Chartrin, P.; Duclos, M.J.; Berri, C., 2008. Adenosine monophosphate-activated protein kinase involved in variations of muscle glycogen and breast meat quality between lean and fat chickens. *Journal of Animal Science*, 86 (11): 2888-2896. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1062

Sickel, H.; Bilger, W.; Ohlson, M., 2012. High Levels of alpha-Tocopherol in Norwegian Alpine Grazing Plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (31): 7573-7580. http://dx.doi.org/10.1021/jf301756j

Sigholt, T.; Erikson, U.; Rustad, T.; Johansen, S.; Nordtvedt, T.S.; Seland, A., 1997. Handling stress and storage temperature affect meat quality of farmed-raised Atlantic salmon (Salmo salar). *Journal of Food Science*, 62 (4): 898-905. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb15482.x

Sigurgisladottir, S.; Ingvarsdottir, H.; Torrissen, O.J.; Cardinal, M.; Hafsteinsson, H., 2000. Effects of freezing/thawing on the microstructure and the texture of smoked Atlantic salmon (Salmo salar). *Food Research International*, 33 (10): 857-865. http://dx.doi.org/10.1016/s0963-9969(00)00105-8

Sigurgisladottir, S.; Parrish, C.C.; Ackman, R.G.; Lall, S.P., 1994. Tocopherol deposition in the muscle of atlantic salmon (Salmo-salar). *Journal of Food Science*, 59 (2): 256-259. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1994.tb06942.x

Silva, F.A.P.; Ferreira, V.C.S.; Madruga, M.S.; Estevez, M., 2017. Aroma profile and consumer liking of salted and dried chicken meat: Effects of desalting and cooking methods. *International Journal of Food Properties*, 20 (12): 2954-2965. http://dx.doi.org/10.1080/10942912.2016.1263653

Silva, F.V.E.; Sarmento, N.; Vieira, J.S.; Tessitore, A.J.D.; Oliveira, L.L.D.; Saraiva, E.P., 2009. Morphometric characteristics, carcass, filet, viscera and residues in different weight categories of the Nile tilapia. *Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science*, 38 (8): 1407-1412. http://dx.doi.org/10.1590/s1516-35982009000800003

Simitzis, P.E.; Tsopelakos, A.; Charismiadou, M.A.; Batzina, A.; Deligeorgis, S.G.; Miliou, H., 2014. Comparison of the effects of six stunning/killing procedures on flesh quality of sea bass (Dicentrarchus labrax, Linnaeus 1758) and evaluation of clove oil anaesthesia followed by chilling on ice/water slurry for potential implementation in aquaculture. *Aquaculture Research*, 45 (11): 1759-1770. http://dx.doi.org/10.1111/are.12120

Simon, M.N.; Jacquin, M.P.; Liardou, M.H.; Daridan, D.; Legault, C., 1997. Recherche de références sur les possibilités de valoriser les porcs Gascons et Limousins par des produits de qualité - 3. Qualités sensorielles des jambons sel secs. *29. Journées Recherche Porcine en France*, 397-404. http://journees-recherche-porcine.com/texte/1997/97txtQualite/Q9703.pdf

Sinanoglou, V.J.; Koutsouli, P.; Fotakis, C.; Sotiropoulou, G.; Cavouras, D.; Bizelis, I., 2015. Assessment of lactation stage and breed effect on sheep milk fatty acid profile and lipid quality indices. *Dairy Science & Technology*, 95 (4): 509-531. http://dx.doi.org/10.1007/s13594-015-0234-5

Sindelar, J.J.; Milkowski, A.L., 2011. Sodium nitrite in processed meat and poultry meats: A review of curin and examining the risk and benefit of its use. *American Meat Science Association White Paper Series*, 3: 1-14.

Singh, P.; Wani, A.A.; Saengerlaub, S.; Langowski, H.C., 2011. Understanding Critical Factors for the Quality and Shelf-life of MAP Fresh Meat: A Review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 51 (2): 146-177. http://dx.doi.org/10.1080/10408390903531384

Singh, V.P.; Pathak, V.; Bharti, S.K.; Sharma, S.; Ojha, S., 2016. Effect of chicken breeds on quality characteristics of meat nuggets. *Nutrition & Food Science*, 46 (3): 432-440. http://dx.doi.org/10.1108/nfs-12-2015-0154

Sirri, F.; Meluzzi, A., 2011. Modifying egg lipids for human health. In: Van Immerseel, F.; Nys, Y.; Bain, M., eds. *Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products, Vol 2: egg safety and nutritional quality*. Cambridge: Woodhead Publishing (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition, 214), 272-288. http://dx.doi.org/10.1533/9780857093929.3.272

Sirri, F.; Tallarico, N.; Meluzzi, A.; Franchini, A., 2003. Fatty acid composition and productive traits of broiler fed diets containing conjugated linoleic acid. *Poultry Science*, 82 (8): 1356-1361. http://dx.doi.org/10.1093/ps/82.8.1356

Sirvente, H., 2007. *Fonctionnalités des fractions du jaune d'œuf dans les émulsions alimentaires huile-dans-eau allégées en matière grasse : impact des différents niveaux de structuration*. Université de Nantes, 206 p.

Skalli, A.; Robin, J.H.; Le Bayon, N.; Le Delliou, H.; Person-Le Ruyet, J., 2006. Impact of essential fatty acid deficiency and temperature on tissues' fatty acid composition of European sea bass (Dicentrarchus labrax). *Aquaculture*, 255 (1-4): 223-232. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.12.006

Skarp, C.P.A.; Hanninen, M.L.; Rautelini, H.I.K., 2016. Campylobacteriosis: the role of poultry meat. *Clinical Microbiology and Infection*, 22 (2): 103-109. http://dx.doi.org/10.1016/j.cmi.2015.11.019

Skeie, S.B., 2014. Quality aspects of goat milk for cheese production in Norway: A review. *Small Ruminant Research*, 122 (1-3): 10-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.07,012

Skjelvareid, M.H.; Heia, K.; Olsen, S.H.; Stormo, S.K., 2017a. Detection of blood in fish muscle by constrained spectral unmixing of hyperspectral images. *Journal of Food Engineering*, 212: 252-261. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.029

Skjelvareid, M.H.; Stormo, S.K.; Porarinsdottir, K.A.; Heia, K., 2017b. Weakening Pin Bone Attachment in Fish Fillets Using High-Intensity Focused Ultrasound. *Foods*, 6 (9). http://dx.doi.org/10.3390/foods6090082

Skrivan, M.; Marounek, M.; Englmaierova, M.; Skrivanova, E., 2012. Influence of dietary vitamin C and selenium, alone and in combination, on the composition and oxidative stability of meat of broilers. *Food Chemistry*, 130 (3): 660-664. http://dx.doi.org/10.1016/goodchem.2011.07.103

Skuland, S.E., 2015. Healthy Eating and Barriers Related to Social Class. The case of vegetable and fish consumption in Norway. *Appetite*, 92: 217-226. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2015.05.008

Smigic, N.; Djekic, I.; Tomasevic, I.; Stanisic, N.; Nedeljkovic, A.; Lukovic, V.; Miocinovic, J., 2017. Organic and conventional milk - insight on potential differences. *British Food Journal*, 119 (2): 366-376. http://dx.doi.org/10.1108/bfj-06-2016-0237

Smith, D.P.; Fletcher, D.L.; Papa, C.M., 1992. Duckling and chicken processing yields and breast meat tenderness. *Poultry Science*, 71 (1): 197-202. http://dx.doi.org/10.3382/ps.0710197

Soerensen, K.V.; Thorning, T.K.; Astrup, A.; Kristensen, M.; Lorenzen, J.K., 2014. Effect of dairy calcium from cheese and milk on fecal fat excretion, blood lipids, and appetite in young men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 99 (5): 984-991. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.113.077735

Sogut, E.; Seydim, A.C., 2018. The effects of Chitosan and grape seed extract-based edible films on the quality of vacuum packaged chicken breast fillets. *Food Packaging and Shelf Life*, 18: 13-20. http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.07.006

Sojak, L.; Blasko, J.; Kubinec, R.; Gorova, R.; Addova, G.; Ostrovsky, I.; Margetin, M., 2013. Variation among individuals, breeds, parities and milk fatty acid profile and milk yield of ewes grazed on pasture. *Small Ruminant Research*, 109 (2-3): 173-181. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2012.07.017

Sokolowicz, Z.; Krawczyk, J.; Dykiel, M., 2018. The effect of the type of alternative housing system, genotype and age of laying hens on egg quality. *Annals of Animal Science*, 18 (2): 541-555. http://dx.doi.org/10.2478/aoas-2018-0004

Solgaard, H.S.; Yang, Y.K., 2011. Consumers' perception of farmed fish and willingness to pay for fish welfare. *British Food Journal*, 113 (8-9): 997-1010. http://dx.doi.org/10.1108/00070701111153751

Somasiri, S.C.; Kenyon, P.R.; Kemp, P.D.; Morel, P.C.H.; Morris, S.T., 2015. Growth performance and carcass characteristics of lambs grazing forage mixes inclusive of plantain (Plantago lanceolata L.) and chicory (Cichorium intybus L.). *Small Ruminant Research*, 127: 20-27. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.04.005

Soncu, E.D.; Kolsarici, N., 2017. Microwave thawing and green tea extract efficiency for the formation of acrylamide throughout the production process of chicken burgers and chicken nuggets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97 (6): 1790-1797. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7976

Sonntag, W.I.; Spiller, A.; von Meyer-Höfer, M., 2019. Discussing modern poultry farming systems–insights into citizen's lay theories. *Poultry Science*, 98 (1): 209-216. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pey292

Sorensen, S.; Krüger, L.; Bossi, R.; Cederberg, T.L.; Lund, K.H., 2014. Dioxins and PCBs in hen eggs from conventional and free range farms from the danish control program in 2012-13. *34th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants (Dioxin 2014).* https://orbit.dtu.dk/files/103601203/Dioxins_and_PCBs_in_hen_eggs_from_conventional_and_free_range_farms_from_the_danish_control_program_in_2012_13_S_rensen_et_al.pdf

Soryal, K.; Beyene, F.A.; Zeng, S.; Bah, B.; Tesfai, K., 2005. Effect of goat breed and milk composition on yield, sensory quality, fatty acid concentration of soft cheese during lactation. *Small Ruminant Research*, 58 (3): 275-281. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2004.11.003

Soryal, K.A.; Zeng, S.S.; Min, B.R.; Hart, S.P.; Beyene, F.A., 2004. Effect of feeding systems on composition of goat milk and yield of Domiati cheese. *Small Ruminant Research*, 54 (1-2): 121-129. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2003.10.010

Soulat, J.; Picard, B.; Leger, S.; Ellies-Oury, M.P.; Monteils, V., 2018. Preliminary Study to Determinate the Effect of the Rearing Managements Applied during Heifers' Whole Life on Carcass and Flank Steak Quality. *Foods*, 7 (10): 160. http://dx.doi.org/10.3390/foods7100160

Soulat, J.; Picard, B.; Leger, S.; Monteils, V., 2016. Prediction of beef carcass and meat traits from rearing factors in young bulls and cull cows. *Journal of Animal Science*, 94 (4): 1712-1726. http://dx.doi.org/10.2527/jas2015-0164

Soyeurt, H.; Dardenne, P.; Dehareng, F.; Bastin, C.; Gengler, N., 2008. Genetic parameters of saturated and monounsaturated fatty acid content and the ratio of saturated to unsaturated fatty acids in bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 91 (9): 3611-3626. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0971

Spliethoff, H.M.; Mitchell, R.G.; Ribaudo, L.N.; Taylor, O.; Shayler, H.A.; Greene, V.; Oglesby, D., 2014. Lead in New York City community garden chicken eggs: influential factors and health implications. *Environmental Geochemistry and Health*, 36 (4): 633-649. http://dx.doi.org/10.1007/s10653-013-9586-z

Sprague, M.; Bendiksen, E.A.; Dick, J.R.; Strachan, F.; Pratoomyot, J.; Berntssen, M.H.G.; Tocher, D.R.; Bell, J.G., 2010. Effects of decontaminated fish oil or a fish and vegetable oil blend on persistent organic pollutant and fatty acid compositions in diet and flesh of Atlantic salmon (Salmo solar). *British Journal of Nutrition*, 103 (10): 1442-1451. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114510000139

Sprague, M.; Dick, J.R.; Tocher, D.R., 2016. Impact of sustainable feeds on omega-3 long-chain fatty acid levels in farmed Atlantic salmon, 2006-2015. *Scientific Reports*, 6. http://dx.doi.org/10.1038/srep21892

Sprague, M.; Walton, J.; Campbell, P.J.; Strachan, F.; Dick, J.R.; Bell, J.G., 2015. Replacement of fish oil with a DHA-rich algal meal derived from Schizochytrium sp on the fatty acid and persistent organic pollutant levels in diets and flesh of Atlantic salmon (Salmo salar, L.) post-smolts. *Food Chemistry*, 185: 413-421. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.150

Squadrone, S.; Brizio, P.; Nespoli, R.; Stella, C.; Abete, M.C., 2015. Human dietary exposure and levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs), polychlorinated dibenzofurans (PCDFs), dioxin-like polychlorinated biphenyls (DL-PCBs) and non-dioxin-like polychlorinated biphenyls (NDL-PCBs) in free-range eggs close to a secondary aluminum smelter, Northern Italy. *Environmental Pollution*, 206: 429-436. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.048

Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Seal, C.; Sanderson, R.; Benbrook, C.; Steinshamn, H.; Gromadzka-Ostrowska, J.; Rembialkowska, E.; Skwarlo-Sonta, K.; Eyre, M.; Cozzi, G.; Larsen, M.K.; Jordon, T.; Niggli, U.; Sakowski, T.; Calder, P.C.; Burdge, G.C.; Sotiraki, S.; Stefanakis, A.; Yolcu, H.; Stergiadis, S.; Chatzidimitriou, E.; Butler, G.; Stewart, G.; Leifert, C., 2016a. Composition differences between organic and conventional meat: a systematic literature review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition*, 115 (6): 994-1011. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114515005073

Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Seal, C.J.; Sanderson, R.; Benbrook, C.; Steinshamn, H.; Gromadzka-Ostrowska, J.; Rembialkowska, E.; Skwarlo-Sonta, K.; Eyre, M.; Cozzi, G.; Larsen, M.K.; Jordon, T.; Niggli, U.; Sakowski, T.; Calder, P.C.; Burdge, G.C.; Sotiraki, S.; Stefanakis, A.; Stergiadis, S.; Yolcu, H.; Chatzidimitriou, E.; Butler, G.; Stewart, G.; Leifert, C., 2016b. Higher PUFA and n-3 PUFA, conjugated linoleic acid, alpha-tocopherol and iron, but lower iodine and selenium concentrations in organic milk: a systematic literature review and meta- and redundancy analyses. *British Journal of Nutrition*, 115 (6): 1043-1060. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114516000349

Stadelman, W.J.; Pratt, D.E., 1989. Factors influencing composition of the hens egg. *Worlds Poultry Science Journal*, 45 (3): 247-266. http://dx.doi.org/10.1079/wps19890016

Stajic, S.; Stanisic, N.; Tomasevic, I.; Djekic, I.; Ivanovic, N.; Zivkovic, D., 2018. Use of linseed oil in improving the quality of chicken frankfurters. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42 (2). http://dx.doi.org/10.1111/jfpp.13529

Stark, K.D.C.; Alonso, S.; Dadios, N.; Dupuy, C.; Ellerbroek, L.; Georgiev, M.; Hardstaff, J.; Huneau-Salaun, A.; Laugier, C.; Mateus, A.; Nigsch, A.; Afonso, A.; Lindberg, A., 2014. Strengths and weaknesses of meat inspection as a contribution to animal health and welfare surveillance. *Food Control*, 39: 154-162. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.009

Stejskal, V.; Vejsada, P.; Cepak, M.; Spicka, J.; Vacha, F.; Kouril, J.; Policar, T., 2011. Sensory and textural attributes and fatty acid profiles of fillets of extensively and intensively farmed Eurasian perch (Perca fluviatilis L.). *Food Chemistry*, 129 (3): 1054-1059. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.073

Sterk, A.; Johansson, B.E.O.; Taweel, H.Z.H.; Murphy, M.; van Vuuren, A.M.; Hendriks, W.H.; Dijkstra, J., 2011. Effects of forage type, forage to concentrate ratio, and crushed linseed supplementation on milk fatty acid profile in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 94 (12): 6078-6091. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4617

Strakova, E.; Suchy, P.; Vitula, F.; Vecerek, V., 2006. Differences in the amino acid composition of muscles from pheasant and broiler chickens. *Archiv Fur Tierzucht-Archives of Animal Breeding*, 49 (5): 508-514.

Suarez, M.D.; Garcia-Gallego, M.; Trenzado, C.E.; Guil-Guerrero, J.L.; Furne, M.; Domezaine, A.; Alba, I.; Sanz, A., 2014. Influence of dietary lipids and culture density on rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) flesh composition and quality parameter. *Aquacultural Engineering*, 63: 16-24. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2014.09.001

Sun, G.X.; Liu, Y.; Li, Y.; Li, X.; Wang, S.K., 2015. Evaluation of feed and feeding regime on growth performance, flesh quality and fecal viscosity of Atlantic salmon (Salmo salar L.) in recirculating aquaculture systems. *Journal of Ocean University of China*, 14 (5): 849-857. http://dx.doi.org/10.1007/s11802-015-2565-5

Sundrum, A.; Aragon, A.; Schulze-Langenhorst, C.; Butfering, L.; Henning, M.; Stalljohann, G., 2011. Effects of feeding strategies, genotypes, sex, and birth weight on carcass and meat quality traits under organic pig production conditions. *Njas-Wageningen Journal of Life Sciences*, 58 (3-4): 163-172. http://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2011.09.006

Sundrum, A.; Butfering, L.; Henning, M.; Hoppenbrock, K.H., 2000. Effects of on-farm diets for organic pig production on performance and carcass quality. *Journal of Animal Science*, 78 (5): 1199-1205.

Surya, R.; Helies-Toussaint, C.; Martin, O.C.; Gauthier, T.; Gueraud, F.; Tache, S.; Naud, N.; Jouanin, I.; Chantelauze, C.; Durand, D.; Joly, C.; Pujos-Guillot, E.; Pierre, F.H.; Huc, L., 2016. Red meat and colorectal cancer: Nrf2-dependent antioxidant response contributes to the resistance of preneoplastic colon cells to fecal water of hemoglobin- and beef-fed rats. *Carcinogenesis*, 37 (6): 635-645. http://dx.doi.org/10.1093/carcin/bgw035

Sveinsdottir, K.; Martinsdottir, E.; Hyldig, G.; Jorgensen, B.; Kristbergsson, K., 2002. Application of Quality Index Method (QIM) scheme in shelf-life study of farmed Atlantic salmon (Salmo salar). *Journal of Food Science*, 67 (4): 1570-1579. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10324.x

Swart, A.N.; van Leusden, F.; Nauta, M.J., 2016. A QMRA Model for Salmonella in Pork Products During Preparation and Consumption. *Risk Analysis*, 36 (3): 516-530. http://dx.doi.org/10.1111/risa.12522

Tacon, A.G.J.; Metian, M., 2013. Fish Matters: Importance of Aquatic Foods in Human Nutrition and Global Food Supply. *Reviews in Fisheries Science*, 21 (1): 22-38. http://dx.doi.org/10.1080/10641262.2012.753405

Taki, G.H., 1991. Functional ingredient blend produces low-fat meat-products to meet consumer expectations. *Food Technology*, 45 (11): 70-&.

Taksdal, T.; Wiik-Nielsen, J.; Birkeland, S.; Dalgaard, P.; Morkore, T., 2012. Quality of raw and smoked fillets from clinically healthy Atlantic salmon, Salmo salar L., following an outbreak of pancreas disease (PD). *Journal of Fish Diseases*, 35 (12): 897-906. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2761.2012.01428.x

Talansier, E.; Loisel, C.; Dellavalle, D.; Desrumaux, A.; Lechevalier, V.; Legrand, J., 2009. Optimization of dry heat treatment of egg white in relation to foam and interfacial properties. *Lwt-Food Science and Technology*, 42 (2): 496-503. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2008.09.013

Talpur, F.N.; Bhanger, M.I.; Memon, N.N., 2009. Milk fatty acid composition of indigenous goat and ewe breeds from Sindh, Pakistan. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22 (1): 59-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2008.09.005

Tang, H.; Gong, Y.Z.; Wu, C.X.; Jiang, J.; Wang, Y.; Li, K., 2009. Variation of meat quality traits among five genotypes of chicken. *Poultry Science*, 88 (10): 2212-2218. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2008-00036

Tasbas, H.; Osanmaz, E.; Ozer, C.O.; Kilic, B., 2016. Quality characteristics and storage stability of gluten-free coated chicken nuggets. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 8 (4): 91-102.

Tavendale, M.H.; Lane, G.A.; Schreurs, N.M.; Fraser, K.; Meagher, L.P., 2005. The effects of condensed tannins from Dorycnium rectum on skatole and indole ruminal biogenesis for grazing sheep. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56 (12): 1331-1337. http://dx.doi.org/10.1071/ar04232

Tedeschi, L.O.; Fox, D.G.; Guiroy, P.J., 2004. A decision support system to improve individual cattle management. 1. A mechanistic, dynamic model for animal growth. *Agricultural Systems*, 79 (2): 171-204. http://dx.doi.org/10.1016/s0308-521x(03)00070-2

Teixeira, A.; Batista, S.; Delfa, R.; Cadavez, V., 2005. Lamb meat quality of two breeds with protected origin designation. Influence of breed, sex and live weight. *Meat Science*, 71 (3): 530-536. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.036

Tejeda, J.F.; Pena, R.E.; Andres, A.I., 2008. Effect of live weight and sex on physico-chemical and sensorial characteristics of Merino lamb meat. *Meat Science*, 80 (4): 1061-1067. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.04.026

Telis, V.R.N.; Kieckbusch, T.G., 1998. Viscoelasticity of frozen/thawed egg yolk as affected by salts, sucrose and glycerol. *Journal of Food Science*, 63 (1): 20-24. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15666.x

Tellam, R.L.; Cockett, N.E.; Vuocolo, T.; Bidwell, C.A., 2012. Genes contributing to genetic variation of muscling in sheep. *Frontiers in Genetics*, 3: 164.

Tenenhaus-Aziza, F.; Daudin, J.J.; Maffre, A.; Sanaa, M., 2014. Risk-Based Approach for Microbiological Food Safety Management in the Dairy Industry: The Case of Listeria monocytogenes in Soft Cheese Made from Pasteurized Milk. *Risk Analysis*, 34 (1): 56-74. http://dx.doi.org/10.1111/risa.12074

Tengilimoglu-Metin, M.M.; Hamzalioglu, A.; Gokmen, V.; Kizil, M., 2017. Inhibitory effect of hawthorn extract on heterocyclic aromatic amine formation in beef and chicken breast meat. *Food Research International*, 99: 586-595. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.044

Tengilimoglu-Metin, M.M.; Kizil, M., 2017. Reducing effect of artichoke extract on heterocyclic aromatic amine formation in beef and chicken breast meat. *Meat Science*, 134: 68-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.07.018

Terlouw, C., 2005. Stress reactions at slaughter and meat quality in pigs: genetic background and prior experience - A brief review of recent. *Livestock Production Science*, 94 (1-2): 125-135. http://dx.doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.11.032

Terlouw, C.; Berne, A.; Astruc, T., 2009. Effect of rearing and slaughter conditions on behaviour, physiology and meat quality of Large White and Duroc-sired pigs. *Livestock Science*, 122 (2-3): 199-213. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2008.08.016

Terlouw, E.M.C.; Cassar-Malek, I.; Picard, B.; Bourguet, C.; Deiss, V.; Arnould, C.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Lefevre, F.; Lebret, B., 2015. Stress during rearing and at slaughter: influence on meat quality. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 169-182.

Tesseraud, S.; Bouvarel, I.; Fraysse, P.; Metayer-Coustard, S.; Collin, A.; Lessire, M.; Berri, C., 2014. Adapting protein-energy metabolism to optimize poultry carcass and meat quality. *Inra Productions Animales*, 27 (5): 337-346.

Thepault, A.; Rose, V.; Quesne, S.; Poezevara, T.; Beven, V.; Hirchaud, E.; Touzain, F.; Lucas, P.W.; Meric, G.; Mageiros, L., 2018. Ruminant and chicken: important sources of campylobacteriosis in France despite a variation of source attribution in 2009 and 2015. *Scientific Reports*, 8 (1): 9305. https://www.nature.com/articles/s41598-018-27558-z.pdf?origin=ppub

Thériez, M., 1985. Engraissement et qualité des carcasses. *Pâtre*, 329: 13-15.

Theriez, M.; Aurousseau, B.; Prache, S.; Mendizabal, J., 1997. Les défauts de couleur des gras d'agneaux. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*. Paris. 295-301.

Theron, L.; Chevarin, L.; Robert, N.; Dutertre, C.; Sante-Lhoutellier, V., 2009. Time course of peptide fingerprints in semimembranosus and biceps femoris muscles during Bayonne ham processing. *Meat Science*, 82 (2): 272-277. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.01.021

Theron, L.; Sayd, T.; Chambon, C.; Vautier, A.; Ferreira, C.; Aubry, L.; Ferraro, V.; Sante-Lhoutellier, V., 2020. Toward the prediction of PSE-like muscle defect in hams: Using chemometrics for the spectral fingerprinting of plasma. *Food Control*, 109: 8. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106929

Theron, L.; Sayd, T.; Chambon, C.; Venien, A.; Viala, D.; Astruc, T.; Vautier, A.; Sante-Lhoutellier, V., 2019. Deciphering PSE-like muscle defect in cooked hams: A signature from the tissue to the molecular scale. *Food Chemistry*, 270: 359-366. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.081

Thomas, C.; Mercier, F.; Tournayre, P.; Martin, J.L.; Berdague, J.L., 2013. Effect of nitrite on the odourant volatile fraction of cooked ham. *Food Chemistry*, 139 (1-4): 432-438. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.033

Thompson, J., 2002. Managing meat tenderness. *Meat Science*, 62 (3): 295-308. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00126-2

Tilami, S.K.; Sampels, S., 2018. Nutritional Value of Fish: Lipids, Proteins, Vitamins, and Minerals. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 26 (2): 243-253. http://dx.doi.org/10.1080/23308249.2017.1399104

Tingbo, M.G.; Kolset, S.O.; Ofstad, R.; Enersen, G.; Hannesson, K.O., 2005. Sulfated glycosaminoglycans in the extracellular matrix of muscle tissue in Atlantic cod (*Gadus morhua*) and Spotted wolffish (*Anarhichas minor*). *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular Biology*, 140 (3): 349-357. http://dx.doi.org/10.1016/j.cbpc.2004.09.032

Toffanin, V.; Penasa, M.; McParland, S.; Berry, D.P.; Cassandro, M.; De Marchi, M., 2015. Genetic parameters for milk mineral content and acidity predicted by mid-infrared spectroscopy in Holstein-Friesian cows. *Animal*, 9 (5): 775-780. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731114003255

Toldra, F., 1998. Proteolysis and lipolysis in flavour development of dry-cured meat products. *Meat Science*, 49: S101-S110. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(98)90041-9

Tomazin, U.; Batorek-Lukac, N.; Skrlep, M.; Prevolnik-Povse, M.; Candek-Potokar, M., 2019. Meat and fat quality of Krkopolje pigs reared in conventional and organic production systems. *Animal*, 13 (5): 1103-1110. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118002409

Tome, D., 2008. Qualité nutritionnelle des protéines de la viande. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 43 (hors série 1): 1S40-1S45.

Tomovic, V.; Jokanovic, M.; Sojic, B.; Skaljac, S.; Ivic, M.; Iop, 2017. Plants as natural antioxidants for meat products. *59. International Meat Industry Conference Meatcon2017*. Bristol: Iop Publishing Ltd (IOP Conference Series-Earth and Environmental Science), Unsp 012030. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012030

Torgersen, J.S.; Koppang, E.O.; Stien, L.H.; Kohler, A.; Pedersen, M.E.; Morkore, T., 2014. Soft Texture of Atlantic Salmon Fillets Is Associated with Glycogen Accumulation. *Plos One*, 9 (1). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0085551

Tormo, H.; Lekhal, D.A.H.; Rogues, C., 2015. Phenotypic and genotypic characterization of lactic acid bacteria isolated from raw goat milk and effect of farming practices on the dominant species of lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 210: 9-15. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.02.002

Tornambe, G.; Cornu, A.; Verdier-Metz, I.; Pradel, P.; Kondjoyan, N.; Figueredo, G.; Hulin, S.; Martin, B., 2008. Addition of pasture plant essential oil in milk: Influence on chemical and sensory properties of milk and cheese. *Journal of Dairy Science*, 91 (1): 58-69. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0154

Torrissen, J.K.; Onozaka, Y., 2017. Comparing fish to meat: Perceived qualities by food lifestyle segments. *Aquaculture Economics & Management*, 21 (1): 44-70. http://dx.doi.org/10.1080/13657305.2017.1265022

Torstensen, B.E.; Espe, M.; Stubhaug, I.; Lie, O., 2011. Dietary plant proteins and vegetable oil blends increase adiposity and plasma lipids in Atlantic salmon (Salmo salar L.). *British Journal of Nutrition*, 106 (5): 633-647. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114511000729

Touraille, C.; Ricard, F.H.; Kopp, J.; Valin, C.; Leclercq, B., 1981. Chicken meat quality. 2. Changes with age of some physicochemical and sensory characteristics of the meat. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 45 (3): 97-104.

Tournour, H.H.; Cunha, L.M.; Magalhaes, L.M.; Lima, R.C.; Segundo, M.A., 2017. Evaluation of the joint effect of the incorporation of mechanically deboned meat and grape extract on the formulation of chicken nuggets. *Food Science and Technology International*, 23 (4): 328-337. http://dx.doi.org/10.1177/1082013216661860

Toyomizu, M.; Sato, K.; Taroda, H.; Kato, T.; Akiba, Y., 2001. Effects of dietary Spirulina on meat colour in muscle of broiler chickens. *British Poultry Science*, 42 (2): 197-202. http://dx.doi.org/10.1080/00071660120048447

Trefan, L.; Bunger, L.; Bloom-Hansen, J.; Rooke, J.A.; Salmi, B.; Larzul, C.; Terlouw, C.; Doeschl-Wilson, A., 2011. Meta-analysis of the effects of dietary vitamin E supplementation on alpha-tocopherol concentration and lipid oxidation in pork. *Meat Science*, 87 (4): 305-314. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.002

Trefan, L.; Doeschl-Wilson, A.; Rooke, J.A.; Terlouw, C.; Bunger, L., 2013. Meta-analysis of effects of gender in combination with carcass weight and breed on pork quality. *Journal of Animal Science*, 91 (3): 1480-1492. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5200

Trocino, A.; Xiccato, G.; Majolini, D.; Tazzoli, M.; Bertotto, D.; Pascoli, F.; Palazzi, R., 2012. Assessing the quality of organic and conventionally-farmed European sea bass (Dicentrarchus labrax). *Food Chemistry*, 131 (2): 427-433. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.082

Troutt, E.S.; Hunt, M.C.; Johnson, D.E.; Claus, J.R.; Kastner, C.L.; Kropf, D.H.; Stroda, S., 1992. Chemical, physical, and sensory characterization of ground-beef containing 5-percent to 30-percent fat. *Journal of Food Science*, 57 (1): 25-29. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1992.tb05416.x

Troy, D.J.; Tiwari, B.K.; Joo, S.T., 2016. Health Implications of Beef Intramuscular Fat Consumption. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 36 (5): 577-582. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2016.36.5.577

Tsutsui, T., 1988. Functional-properties of heat-treated egg-yolk low-density lipoprotein. *Journal of Food Science*, 53 (4): 1103-1106. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13539.x

Tunick, M.H.; Van Hekken, D.L.; Call, J.; Molina-Corral, F.J.; Gardea, A.A., 2007. Queso Chihuahua: effects of seasonality of cheesemilk on rheology. *International Journal of Dairy Technology*, 60 (1): 13-21. http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2007.00295.x

Tuominen, P.; Ranta, J.; Maijala, R., 2007. Studying the effects of POs and MCs on the Salmonella ALOP with a quantitative risk assessment model for beef production. *International Journal of Food Microbiology*, 118 (1): 35-51. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.05.013

Turchini, G.M.; Torstensen, B.E.; Ng, W.K., 2009. Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 1 (1): 10-57. http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01001.x

Turgeon, S.; Dupont, D., 2018. Impact des technologies sur les caractéristique nutrition santé des fromages. 3. Protéines. In: Gillis, J.-C.; Ayerbe, A., eds. *Le Fromage*. Paris: Tec&Doc Lavoisier (4ème édition), 863-879.

Tyagi, A.; Saluja, M.; Kathirvelan, C.; Singhal, K.K., 2009. Enhancement of the conjugated linoleic acid and vitamin A and E contents in goat milk through green fodder feeding. *International Journal of Dairy Technology*, 62 (1): 7-14. http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2008.00437.x

Tygesen, M.P.; Harrison, A.P.; Therkildsen, M., 2007. The effect of maternal nutrient restriction during late gestation on muscle, bone and meat parameters in five month old lambs. *Livestock Science*, 110 (3): 230-241. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2006.11.003

Ulbricht, T.L.V.; Southgate, D.A.T., 1991. Coronary heart-disease - 7 dietary factors. *Lancet*, 338 (8773): 985-992. http://dx.doi.org/10.1016/0140-6736(91)91846-m

Ung, A.; Baidjoe, A.Y.; Van Cauteren, D.; Fawal, N.; Fabre, L.; Guerrisi, C.; Danis, K.; Morand, A.; Donguy, M.P.; Lucas, E.; Rossignol, L.; Lefevre, S.; Vignaud, M.L.; Cadel-Six, S.; Lailler, R.; Jourdan-Da Silva, N.; Le Hello, S., 2019. Disentangling a complex nationwide Salmonella Dublin outbreak associated with raw-milk cheese consumption, France, 2015 to 2016. *Eurosurveillance*, 24 (3): 32-41. http://dx.doi.org/10.2807/1560-7917.es.2019.24.3.1700703

Union Européenne, 1999. Directive 1999/74/CE du Conseil du 19 juillet 1999 établissant les normes minimales relatives à la protection des poules pondeuses *JOUE L203 du 3 août 1999 page 53* https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000881867&categorieLien=id

Union Européenne, 2011. Règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, modifiant les règlements (CE) n°1924/2006 et (CE) n°1925/2006 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 87/250/CEE de la Commission, la directive 90/496/CEE du Conseil, la directive 1999/10/CE de la Commission, la directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/67/CE et 2008/5/CE de la Commission et le règlement (CE) n°608/2004 de la Commission Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *JOUE L 304 du 22/11/2011 p. 0018–0063*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32011R1169&qid=1469527903985

Union Européenne, 2017. Règlement d'exécution (UE) 2017/962 de la Commission du 7 juin 2017 suspendant l'autorisation de l'éthoxyquine en tant qu'additif destiné à l'alimentation de toutes les espèces et catégories d'animaux (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.). *JOUE L 145 du 08.06.2017, p.13-17*.

Urdahl, A.M.; Alvseike, O.; Skjerve, E.; Wasteson, Y., 2001. Shiga toxin genes (stx) in Norwegian sheep herds. *Epidemiology and Infection*, 127 (1): 129-134.

Urkek, B.; Sengul, M.; Erkaya, T.; Aksakal, V., 2017. Prevalence and Comparing of Some Microbiological Properties, Somatic Cell Count and Antibiotic Residue of Organic and Conventional Raw Milk Produced in Turkey. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37 (2): 264-273. http://dx.doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.2.264

Uytterhaegen, L.; Claeys, E.; Demeyer, D.; Lippens, M.; Fiems, L.O.; Boucque, C.Y.; Vandevoorde, G.; Bastiaens, A., 1994. Effects of double-muscling on carcass quality, beef tenderness and myofibrillar protein degradation in Belgian Blue White bulls. *Meat Science*, 38 (2): 255-267. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(94)90115-5

Vacha, F.; Stejskal, V.; Vejsada, P.; Kouril, J.; Hlavac, D., 2013. Texture profile analyses in tench (Tinca tinca L., 1758) from extensive and intensive culture. *Acta Veterinaria Brno*, 82 (4): 421-425. http://dx.doi.org/10.2754/avb201382040421

Vage, D.I.; Boman, I.A., 2010. A nonsense mutation in the beta-carotene oxygenase 2 (BCO2) gene is tightly associated with accumulation of carotenoids in adipose tissue in sheep (Ovis aries). *Bmc Genetics*, 11: 6. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2156-11-10

Valente, L.M.P.; Cornet, J.; Donnay-Moreno, C.; Gouygou, J.P.; Berge, J.P.; Bacelar, M.; Escorcio, C.; Rocha, E.; Malhao, F.; Cardinal, M., 2011. Quality differences of gilthead sea bream from distinct production systems in Southern Europe: Intensive, integrated, semi-intensive or extensive systems. *Food Control*, 22 (5): 708-717. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.11.001

Valenti, B.; Pagano, R.I.; Pennisi, P.; Lanza, M.; Avondo, M., 2010. Polymorphism at alpha(s1)-casein locus. Effect of genotype x diet interaction on milk fatty acid composition in Girgentana goat. *Small Ruminant Research*, 94 (1-3): 210-213. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2010.07.023

van Asselt, E.D.; van der Fels-Klerx, H.J.; Marvin, H.J.P.; van Bokhorst-van de Veen, H.; Groot, M.N., 2017. Overview of Food Safety Hazards in the European Dairy Supply Chain. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16 (1): 59-75. http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12245

Van Cauteren, D.; Le Strat, Y.; Sommen, C.; Bruyand, M.; Tourdjman, M.; Jourdan-Da Silva, N.; Couturier, E.; Fournet, N.; De Valk, H.; Desenclos, J.C., 2018. Estimation de la morbidité et de la mortalité liées aux infections d'origine alimentaire en France métropolitaine, 2008–2013. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 1: 2-10. http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2018/1/pdf/2018_1_1.pdf

Van Damme, I.; Berkvens, D.; Vanantwerpen, G.; Bare, J.; Houf, K.; Wauters, G.; De Zutter, L., 2015. Contamination of freshly slaughtered pig carcasses with enteropathogenic Yersinia spp.: Distribution, quantification and identification of risk factors. *International Journal of Food Microbiology*, 204: 33-40. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.03.016

van de Kamp, M.E.; Saridakis, I.; Verkaik-Kloosterman, J., 2019. Iodine content of semi-skimmed milk available in the Netherlands depending on farming (organic versus conventional) and heat treatment (pasteurized versus UHT) and implications for the consumer. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 56: 178-183. http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.08.008

van de Vis, H.; Kestin, S.; Robb, D.; Oehlenschlager, J.; Lambooij, B.; Munkner, W.; Kuhlmann, H.; Kloosterboer, K.; Tejada, M.; Huidobro, A.; Ottera, H.; Roth, B.; Sorensen, N.K.; Akse, L.; Byrne, H.; Nesvadba, P., 2003. Is humane slaughter of fish possible for industry? *Aquaculture Research*, 34 (3): 211-220. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2109.2003.00804.x

van der Giessen, J.; Fonville, M.; Bouwknegt, M.; Langelaar, M.; Vollema, A., 2007. Seroprevalence of Trichinella spiralis and Toxoplasma gondii in pigs from different housing systems in The Netherlands. *Veterinary Parasitology*, 148 (3-4): 371-374. http://dx.doi.org/10.1016/j.vetpar.2007.06.009

Van der Plancken, I.; Van Loey, A.; Hendrickx, M., 2007. Effect of moisture content during dry-heating on selected physicochemical and functional properties of dried egg white. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (1): 127-135. http://dx.doi.org/10.1021/jf062370

van der Reijden, O.L.; Galetti, V.; Hulmann, M.; Krzystek, A.; Haldimann, M.; Schlegel, P.; Manzocchi, E.; Berard, J.; Kreuzer, M.; Zimmermann, M.B.; Herter-Aeberli, I., 2018. The main determinants of iodine in cows' milk in Switzerland are farm type, season and teat dipping. *British Journal of Nutrition*, 119 (5): 559-569. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114517003798

van Hulzen, K.J.E.; Sprong, R.C.; van der Meer, R.; van Arendonk, J.A.M., 2009. Genetic and nongenetic variation in concentration of selenium, calcium, potassium, zinc, magnesium, and phosphorus in milk of Dutch Holstein-Friesian cows. *Journal of Dairy Science*, 92 (11): 5754-5759. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2406

Van Overbeke, I.; Duchateau, L.; De Zutter, L.; Albers, G.; Ducatelle, R., 2006. A comparison survey of organic and conventional broiler chickens for infectious agents affecting health and food safety. *Avian Diseases*, 50 (2): 196-200.

Van Overmeire, I.; Pussemier, L.; Waegeneers, N.; Hanot, V.; Windal, I.; Boxus, L.; Covaci, A.; Eppe, G.; Scippo, M.L.; Sioen, I.; Bilau, M.; Gellynck, X.; De Steur, H.; Tangni, E.K.; Goeyens, L., 2009. Assessment of the chemical contamination in home-produced eggs in Belgium: General overview of the CONTEGG study. *Science of the Total Environment*, 407 (15): 4403-4410. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.066

Van Tilbeurgh, V., 2017. Enjeux sociétaux et adaptation des filières aux controverses sur l'élevage *12. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, 11-19. https://www.itavi.asso.fr/download/9224

Vanbergue, E., 2017. *Les facteurs de variations de la lipolyse spontanée du lait de vache et mécanismes biochimiques associés*. Thèse (Doctorat). AgroCampus Ouest,, Rennes. 244 p.

Vanbergue, E.; Barillet, F.; Allain, C.; Autran, P.; Aurel, M.R.; Duvallon, O.; Portes, D.; Dessauge, F.; Boutinaud, M.; Dzidic, A., 2013. Aptitude des brebis laitières de race Lacaune à la conduite en monotraite: Premiers éléments zootechniques et physiologiques. *Rencontres autour des Recherches sur les ruminants*, 281-284.

Vanbergue, E.; Delaby, L.; Peyraud, J.L.; Colette, S.; Gallard, Y.; Hurtaud, C., 2017. Effects of breed, feeding system, and lactation stage on milk fat characteristics and spontaneous lipolysis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100 (6): 4623-4636. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-12094

Vanbergue, E.; Peyraud, J.L.; Ferlay, A.; Miranda, G.; Martin, P.; Hurtaud, C., 2018. Effects of feeding level, type of forage and milking time on milk lipolytic system in dairy cows. *Livestock Science*, 217: 116-126. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2018.09.019

Vanbergue, E.; Peyraud, J.L.; Guinard-Flament, J.; Charton, C.; Barbey, S.; Lefebvre, R.; Gallard, Y.; Hurtaud, C., 2016. Effects of DGAT1 K232A polymorphism and milking frequency on milk composition and spontaneous lipolysis in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 99 (7): 5739-5749. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10731

Vandeputte, M.; Bugeon, J.; Bestin, A.; Desgranges, A.; Allamelou, J.M.; Tyran, A.S.; Allal, F.; Dupont-Nivet, M.; Haffray, P., 2019. Réponse à la sélection sur le rendement de filet chez la truite arc-en-ciel. *6. Journées de la Recherche Filière Piscicole*. Paris, p.14. https://evenements.itavi.asso.fr/evenement/6emes-journees-de-la-recherche-piscicole

Varga-Visi, E.; Toxanbayeva, B., 2017. Application of fat replacers and their effect on quality of comminuted meat products with low lipid content: A review. *Acta Alimentaria*, 46 (2): 181-186. http://dx.doi.org/10.1556/066.2016.0008

Vargas-Bello-Perez, E.; Fehrmann-Cartes, K.; Iniguez-Gonzalez, G.; Toro-Mujica, P.; Garnsworthy, P.C., 2015. Short communication: Chemical composition, fatty acid composition, and sensory characteristics of Chanco cheese from dairy cows supplemented

with soybean and hydrogenated vegetable oils. *Journal of Dairy Science*, 98 (1): 111-117. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8831

Vasta, V.; Luciano, G., 2011. The effects of dietary consumption of plants secondary compounds on small ruminants' products quality. *Small Ruminant Research*, 101 (1-3): 150-159. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.09.035

Vasta, V.; Mele, M.; Serra, A.; Scerra, M.; Luciano, G.; Lanza, M.; Priolo, A., 2009. Metabolic fate of fatty acids involved in ruminal biohydrogenation in sheep fed concentrate or herbage with or without tannins. *Journal of Animal Science*, 87 (8): 2674-2684. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1761

Vasta, V.; Nudda, A.; Cannas, A.; Lanza, M.; Priolo, A., 2008. Alternative feed resources and their effects on the quality of meat and milk from small ruminant. *Animal Feed Science and Technology*, 147 (1-3): 223-246. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.020

Vasta, V.; Priolo, A., 2006. Ruminant fat volatiles as affected by diet. A review. *Meat Science*, 73 (2): 218-228. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.11.017

Vautier, A.; Boulard, J.; Bouyssière, M.; Houix, Y.; Minvielle, B., 2008. Prediction level of meat quality criteria on « pse-like zones » defect of pork's ham. *Proceedings of the 54th International Congress of Meat Science and Technology*. 10-15 August 2008, Cape Town, South Africa, 3 p.

Vautier, A.; Lhommeau, T.; Daumas, G., 2013. A feasibility study for the prediction of the technological quality of ham with NIR spectroscopy. *64. annual meeting of the European federation of animal science* 26-30 August 2013, Nantes, France, p 108.

Vautier, A.; Pieper, T.; Lhommeau, T.; Petersen, H.; Christensen, M., 2017. NIR and VIS-NIR spectroscopy to predict PSE-like zones. *63. International Congress of Meat Science and Technology*. 13-18 August 2017, Cork, Ireland, 2 p.

Vazgecer, B.; Ulu, H.; Oztan, A., 2004. Microbiological and chemical qualities of chicken doner kebab retailed on the Turkish restaurants. *Food Control*, 15 (4): 261-264. http://dx.doi.org/10.1016/s0956-7135(03)00065-3

Veissier, I.; Blokhuis, H.J.; Geers, R.; Jones, B.; Miele, M., 2005. Le projet Welfare Quality: de l'attente des consommateurs à la mise en place de certifications bien-être en élevage. *Bulletin de l'Académie vétérinaire de France*, 158 (3): 262-267.

Venkata Reddy, B.; Sivakumar, A.S.; Jeong, D.W.; Woo, Y.B.; Park, S.J.; Lee, S.Y.; Byun, J.Y.; Kim, C.H.; Cho, S.H.; Hwang, I., 2015. Beef quality traits of heifer in comparison with steer, bull and cow at various feeding environments. *Animal Science Journal*, 86 (1): 1-16. http://dx.doi.org/10.1111/asj.12266

Ventanas, S.; Ruiz, J.; Garcia, C.; Ventanas, J., 2007a. Preference and juiciness of Iberian dry-cured loin as affected by intramuscular fat content, crossbreeding and rearing system. *Meat Science*, 77 (3): 324-330. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.04.001

Ventanas, S.; Ventanas, J.; Tovar, J.; Garcia, C.; Estevez, M., 2007b. Extensive feeding versus oleic acid and tocopherol enriched mixed diets for the production of Iberian dry-cured hams: Effect on chemical composition, oxidative status and sensory traits. *Meat Science*, 77 (2): 246-256. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.010

Verdier-Metz, I.; Coulon, J.B.; Pradel, P.; Viallon, C.; Berdague, J.L., 1998. Effect of forage conservation (hay or silage) and cow breed on the coagulation properties of milks and on the characteristics of ripened cheeses. *Journal of Dairy Research*, 65 (1): 9-21. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029997002616

Verdier-Metz, I.; Martin, B.; Hulin, S.; Ferlay, A.; Pradel, P.; Coulon, J.B., 2002. Combined influence of cow diet and pasteurization of the milk on sensory properties of French PDO Cantal cheese. *26. IDF World Dairy Congress Congrilait, CIDIL, CD*. 24-28 Septembrer, Paris.

Verdier-Metz, I.; Martin, B.; Pradel, P.; Albouy, H.; Hulin, S.; Montel, M.C.; Coulon, J.B., 2005. Effect of grass-silage vs. hay diet on the characteristics of cheese: interactions with the cheese model. *Lait*, 85 (6): 469-480. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2005032

Verma, A.K.; Banerjee, R.; Sharma, B.D., 2015. Quality characteristics of low fat chicken nuggets: effect of salt substitute blend and pea hull flour. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 52 (4): 2288-2295. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-013-1218-1

Viau, M.; Gandemer, G.; Maillard, N.; Lessire, M.; Juin, H., 1999. Lipides alimentaires et qualité de la viande de poulet: influence de l'apport de quantité croissante d'acide linolénique (18: 2 n-6). *3. Journées de la Recherche Avicole*. Saint-Malo (France): 23-25/03/99, 359-362.

Vicira, V.L.A.; Norris, A.; Johnston, I.A., 2007. Heritability of fibre number and size parameters and their genetic relationship to flesh quality traits in Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture*, 272: S100-S109. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.08.028

Vieira, V.L.A.; Johansen, S.J.S.; Bickerdike, R.; Johnston, I.A., 2005. Impact of accelerated smoltification on muscle structure and fillet firmness at harvest in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 246 (1-4): 197-208. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.12.028

Villette, Y.; Theriez, M., 1981. Influence of birth-weight on lamb performances .2. Carcass and chemical-composition of lambs slaughtered at the same weight. *Annales De Zootechnie*, 30 (2): 169-182. http://dx.doi.org/10.1051/animres:19810204

Virgili, R.; Schivazappa, C., 2002. Muscle traits for long matured dried meats. *Meat Science*, 62 (3): 331-343. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00118-3

Vlckova, J.; Tumova, E.; Ketta, M.; Englmaierova, M.; Chodova, D., 2018. Effect of Housing System and Age of Laying Hens on Eggshell Quality, Microbial Contamination, and Penetration of Microorganisms into Eggs. *Czech Journal of Animal Science*, 63 (2): 51-60. http://dx.doi.org/10.17221/77/2017-cjas

Voidarou, C.; Vassos, D.; Rozos, G.; Alexopoulos, A.; Plessas, S.; Tsinas, A.; Skoufou, M.; Stavropoulou, E.; Bezirtzoglou, E., 2011. Microbial challenges of poultry meat production. *Anaerobe*, 17 (6): 341-343. http://dx.doi.org/10.1016/j.anaerobe.2011.05.018

Vorimore, F.; Thebault, A.; Poisson, S.; Cleva, D.; Robineau, J.; de Barbeyrac, B.; Durand, B.; Laroucau, K., 2015. Chlamydia psittaci in ducks: a hidden health risk for poultry workers. *Pathogens and Disease*, 73 (1). http://dx.doi.org/10.1093/femspd/ftu016

Vors, C.; Pineau, G.; Gabert, L.; Drai, J.; Louche-Pelissier, C.; Defoort, C.; Lairon, D.; Desage, M.; Danthine, S.; Lambert-Porcheron, S.; Vidal, H.; Laville, M.; Michalski, M.C., 2013. Modulating absorption and postprandial handling of dietary fatty acids by structuring fat in the meal: a randomized crossover clinical trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, 97 (1): 23-36. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.112.043976

Vuitton, D.A.; Divaret-Chauveau, A.; Dalphin, M.L.; Laplante, J.J.; von Mutius, E.; Dalphin, J.C., 2019. Protection contre l'allergie par l'environnement de la ferme : en 15 ans, qu'avons-nous appris de la cohorte européenne PASTURE ? . *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 203 (7): 637-638.

Wade, N.M.; Clark, T.D.; Maynard, B.T.; Atherton, S.; Wilkinson, R.J.; Smullen, R.P.; Taylor, R.S., 2019. Effects of an unprecedented summer heatwave on the growth performance, flesh colour and plasma biochemistry of marine cage-farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Journal of Thermal Biology*, 80: 64-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.021

Waegeneers, N.; Hoenig, M.; Goeyens, L.; De Temmerman, L., 2009. Trace elements in home-produced eggs in Belgium: Levels and spatiotemporal distribution. *Science of the Total Environment*, 407 (15): 4397-4402. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.031

Walachowski, S.; Dorenlor, V.; Lefevre, J.; Lunazzi, A.; Eono, F.; Merbah, T.; Eveno, E.; Pavio, N.; Rose, N., 2014. Risk factors associated with the presence of hepatitis E virus in livers and seroprevalence in slaughter-age pigs: a retrospective study of 90 swine farms in France. *Epidemiology and Infection*, 142 (9): 1934-1944. http://dx.doi.org/10.1017/s0950268813003063

Wallander, C.; Frossling, J.; Dorea, F.C.; Uggla, A.; Vagsholm, I.; Lunden, A., 2016. Pasture is a risk factor for Toxoplasma gondii infection in fattening pigs. *Veterinary Parasitology*, 224: 27-32. http://dx.doi.org/10.1016/j.vetpar.2016.05.005

Walstra, P., 1990. On the stability of casein micelles. *Journal of Dairy Science*, 73 (8): 1965-1979. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(90)78875-3

Wang, C.; Xie, Y.T.; Qi, J.; Yu, Y.; Bai, Y.; Dai, C.; Li, C.B.; Xu, X.L.; Zhou, G.H., 2018. Effect of Tea Marinades on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled chicken wings. *Food Control*, 93: 325-333. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.12.010

Wang, J.; Wu, S.G.; Zhang, H.J.; Yue, H.Y.; Xu, L.; Ji, F.; Xu, L.; Qi, G.H., 2013. Trimethylamine deposition in the egg yolk from laying hens with different FMO3 genotypes. *Poultry Science*, 92 (3): 746-752. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2012-02313

Warner, K.; Eskins, K.; Fanta, G.F.; Nelsen, T.C.; Rocke, J.W., 2001. Use of starch-lipid composites in low-fat ground beef products - Novel composites improve flavor and juiciness of low-fat ground beef products. *Food Technology*, 55 (2): 36-41.

Warner, R.D.; Dunshea, F.R., 2017. Producing consistent quality meat from the modern pig. In: Mathew, A., ed. *Achieving sustainable production of pig meat Volume 1: Safety, quality and sustainability*. London (UK): Burleigh Dodds Science Publishing, 38 p. http://dx.doi.org/10.1201/9781351114493

Warner, R.D.; Greenwood, P.L.; Pethick, D.W.; Ferguson, D.M., 2010. Genetic and environmental effects on meat quality. *Meat Science*, 86 (1): 171-183. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.042

Watanabe, G.; Kobayashi, H.; Shibata, M.; Kubota, M.; Kadowaki, M.; Fujimura, S., 2015. Regulation of free glutamate content in meat by dietary lysine in broilers. *Animal Science Journal*, 86 (4): 435-442. http://dx.doi.org/10.1111/asj.12321

Watkins, P.J.; Frank, D.; Singh, T.K.; Young, O.A.; Warner, R.D., 2013. Sheepmeat Flavor and the Effect of Different Feeding Systems: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (15): 3561-3579. http://dx.doi.org/10.1021/jf303768e

Watkins, P.J.; Kearney, G.; Rose, G.; Allen, D.; Ball, A.J.; Pethick, D.W.; Warner, R.D., 2014. Effect of branched-chain fatty acids, 3-methylindole and 4-methylphenol on consumer sensory scores of grilled lamb meat. *Meat Science*, 96 (2): 1088-1094. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.08.011

Watkins, P.J.; Rose, G.; Salvatore, L.; Allen, D.; Tucman, D.; Warner, R.D.; Dunshea, F.R.; Pethick, D.W., 2010. Age and nutrition influence the concentrations of three branched chain fatty acids in sheep fat from Australian abattoirs. *Meat Science*, 86 (3): 594-599. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.009

Wauters, J.; Verplanken, K.; Vercruysse, V.; Ampe, B.; Aluwe, M.; Vanhaecke, L., 2017. Sensory evaluation of boar meat products by trained experts. *Food Chemistry*, 237: 516-524. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.128

Weatherley, A.H.; Gill, H.S., 1983. Relative growth of tissues at different somatic growth-rates in rainbow-trout salmo-gairdneri richardson. *Journal of Fish Biology*, 22 (1): 43-60. http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.1983.tb04725.x

Weihe, R.; Dessen, J.E.; Arge, R.; Thomassen, M.S.; Hatlen, B.; Rorvik, K.A., 2019. Increased protein-to-lipid ratio in energy dense diets improves slaughter yields and muscle thickness of different weight classes of farmed Atlantic salmon (Salmo salar L.). *Aquaculture Reports*, 13. http://dx.doi.org/10.1016/j.aqrep.2018.10.001

Weil, C.; Lefevre, F.; Bugeon, J., 2013. Characteristics and metabolism of different adipose tissues in fish. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 23 (2): 157-173. http://dx.doi.org/10.1007/s11160-012-9288-0

Werner, C.; Poontawee, K.; Mueller-Belecke, A.; Hoerstgen-Schwark, G.; Wicke, M., 2008. Flesh characteristics of pan-size triploid and diploid rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) reared in a commercial fish farm. *Archiv Fur Tierzucht-Archives of Animal Breeding*, 51 (1): 71-83.

Wicks, J.C.; Beline, M.; Gomez, J.F.M.; Silva, S.L.; Luzardo, S.; Gerrard, D.E., 2019. Muscle energy metabolism, growth and meat quality. *Proceedings of the 65. International Congress of Meat Science and Technology - Muscle Biology*. Postdam, 4-9 August, p. 601. http://icomst-proceedings.helsinki.fi/papers/2019_06_03.pdf

Widgren, S.; Soderlund, R.; Eriksson, E.; Fasth, C.; Aspan, A.; Emanuelson, U.; Alenius, S.; Lindberg, A., 2015. Longitudinal observational study over 38 months of verotoxigenic Escherichia coli O157:H7 status in 126 cattle herds. *Preventive Veterinary Medicine*, 121 (3-4): 343-352. http://dx.doi.org/10.1016/j.prevetmed.2015.08.010

Wierup, M.; Wahlstrom, H.; Lahti, E.; Eriksson, H.; Jansson, D.S.; Odelros, A.; Ernholm, L., 2017. Occurrence of Salmonella spp.: a comparison between indoor and outdoor housing of broilers and laying hens. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 59: 1-8. http://dx.doi.org/10.1186/s13028-017-0281-4

Wiking, L.; Nielsen, J.H.; Bavius, A.K.; Edvardsson, A.; Svennersten-Sjaunja, K., 2006. Impact of milking frequencies on the level of free fatty acids in milk, fat globule size, and fatty acid composition. *Journal of Dairy Science*, 89 (3): 1004-1009. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72166-X

Wilfart, A.; Dusart, L.; Meda, B.; Gac, A.; Espagnol, S.; Morin, L.; Dronne, Y.; Garcia-Launay, F., 2018. Reducing feed environmental impacts for livestock. *Inra Productions Animales*, 31 (3): 289-306. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.2.2285

Wilhelm, B.J.; Leblanc, D.; Avery, B.; Pearl, D.L.; Houde, A.; Rajic, A.; McEwen, S.A., 2016. Factors Affecting Detection of Hepatitis E Virus on Canadian Retail Pork Chops and Pork Livers Assayed Using Real-Time RT-PCR. *Zoonoses and Public Health*, 63 (2): 152-159. http://dx.doi.org/10.1111/zph.12216

Willems, H.; Kreuzer, M.; Leiber, F., 2014. Alpha-linolenic and linoleic acid in meat and adipose tissue of grazing lambs differ among alpine pasture types with contrasting plant species and phenolic compound composition. *Small Ruminant Research*, 116 (2-3): 153-164. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.11.002

Windal, I.; Hanot, V.; Marchi, J.; Huysmans, G.; Van Overmeire, I.; Waegeneers, N.; Goeyens, L., 2009. PCB and organochlorine pesticides in home-produced eggs in Belgium. *Science of the Total Environment*, 407 (15): 4430-4437. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.063

Wong, Y.H.; Lai, O.M.; Abas, F.; Nyam, K.L.; Nehdi, I.A.; Muhamad, H.; Tan, C.P., 2017. Factors Impacting the Formation of 3-MCPD Esters and Glycidyl Esters During Deep Fat Frying of Chicken Breast Meat. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 94 (6): 759-765. http://dx.doi.org/10.1007/s11746-017-2991-1

Wood, J.D.; Brown, S.N.; Nute, G.R.; Whittington, F.M.; Perry, A.M.; Johnson, S.P.; Enser, M., 1996. Effects of breed, feed level and conditioning time on the tenderness of pork. *Meat Science*, 44 (1-2): 105-112. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(96)00044-7

Wood, J.D.; Enser, M.; Fisher, A.V.; Nute, G.R.; Sheard, P.R.; Richardson, R.I.; Hughes, S.I.; Whittington, F.M., 2008. Fat deposition, fatty acid composition and meat quality: A review. *Meat Science*, 78 (4): 343-358. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.019

Wood, J.D.; Fisher, A.V., 1990. *Improving the quality of lamb meat - taste, fatness and consumer appeal*. Penicuik Midlothian: British Soc Animal Production (*New Developments in Sheep Production*).

Wood, J.D.; Nute, G.R.; Fursey, G.A.J.; Cuthbertson, A., 1995. The effect of cooking conditions on the eating quality of pork. *Meat Science*, 40 (2): 127-135. http://dx.doi.org/10.1016/0309-1740(94)00051-8

Wyss, A.B.; House, J.S.; Hoppin, J.A.; Richards, M.; Hankinson, J.L.; Long, S.; Henneberger, P.K.; Freeman, L.E.B.; Sandler, D.P.; O'Connell, E.L.; Cummings, C.B.; Umbach, D.M.; London, S.J., 2018. Raw milk consumption and other early-life farm exposures and adult pulmonary function in the Agricultural Lung Health Study. *Thorax*, 73 (3): 279-282. http://dx.doi.org/10.1136/thoraxjnl-2017-210031

Yadav, S.; Pathera, A.K.; Islam, R.U.; Malik, A.K.; Sharma, D.P., 2018. Effect of wheat bran and dried carrot pomace addition on quality characteristics of chicken sausage. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31 (5): 729-737. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.17.0214

Yan, L.; Kim, I.H., 2013. Effects of dietary omega-3 fatty acid-enriched microalgae supplementation on growth performance, blood profiles, meat quality, and fatty acid composition of meat in broilers. *Journal of Applied Animal Research*, 41 (4): 392-397. http://dx.doi.org/10.1080/09712119.2013.787361

Yanagisawa, T.; Watanuki, C.; Ariizumi, M.; Shigematsu, Y.; Kobayashi, H.; Hasegawa, M.; Watanabe, K., 2009. Super Chilling Enhances Preservation of the Freshness of Salted Egg Yolk During Long-Term Storage. *Journal of Food Science*, 74 (2): E62-E69. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01046.x

Yanar, M.; Buyukcapar, H.M.; Yanar, Y., 2016. Effects of hot and sweet red peppers (capsicum annuum) as feed supplements on pigmentation, sensory properties and weight gain of Rainbow Trout (Onchorhynchus Mykiss). *Annals of Animal Science*, 16 (3): 825-834. http://dx.doi.org/10.1515/aoas-2016-0011

Yang, L.; Yang, Q.; Yi, M.; Pang, Z.H.; Xiong, B.H., 2013. Effects of seasonal change and parity on raw milk composition and related indices in Chinese Holstein cows in northern China. *Journal of Dairy Science*, 96 (11): 6863-6869. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6846

Yang, Y.; Wen, J.; Fang, G.Y.; Li, Z.R.; Dong, Z.Y.; Liu, J., 2015. The effects of raising system on the lipid metabolism and meat quality traits of slow-growing chickens. *Journal of Applied Animal Research*, 43 (2): 147-152. http://dx.doi.org/10.1080/09712119.2014.928631

Yannakopoulos, A.L., 2007. Egg enrichment in omega-3 fatty acids. In: Huopalahti, R.; Lopez-Fandiño, R.; Anton, M.; Shade, R., eds. *Bioactive egg compounds*. Berlin-Heidelberg (DE): Springer-Verlag, 159-170.

Yao, X.L.; Cai, F.H.; Zhu, P.Y.; Fang, H.X.; Li, J.W.; He, S.L., 2019. Non-invasive and rapid pH monitoring for meat quality assessment using a low-cost portable hyperspectral scanner. *Meat Science*, 152: 73-80. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.017

Yeater, M.; Casco, G.; Miller, R.K.; Alvarado, C.Z., 2017. Comparative evaluation of texture wheat ingredients and soy proteins in the quality and acceptability of emulsified chicken nuggets. *Poultry Science*, 96 (12): 4430-4438. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex250

Young, A.; Morris, P.C.; Huntingford, F.A.; Sinnott, R., 2005a. The effects of diet, feeding regime and catch-up growth on flesh quality attributes of large (1+sea winter) Atlantic salmon, Salmo salar. *Aquaculture*, 248 (1-4): 59-73. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.03.017

Young, O.; Braggins, T.J., 1998. Sheepmeat odour and flavour. In: Shahidi, F., ed. *Flavor of Meat, Meat Products and Seafoods*. London, UK: Blackie Academic and Professional, 101-130.

Young, O.A.; Baumeister, B.M.B., 1999. The effect of diet on the flavour of cooked beef and the odour compounds in beef fat. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 42 (3): 297-304. http://dx.doi.org/10.1080/00288233.1999.9513379

Young, O.A.; Berdague, J.L.; Viallon, C.; RoussetAkrim, S.; Theriez, M., 1997. Fat-borne volatiles and sheepmeat odour. *Meat Science*, 45 (2): 183-200. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(96)00100-3

Young, O.A.; Cummings, T.L.; Binnie, N.S., 2009. Effect of Several Sugars on Consumer Perception of Cured Sheepmeat. *Journal of Food Science*, 74 (5): S198-S204. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01167.x

Young, O.A.; Hopkins, D.L.; Pethick, D.W., 2005b. Critical control points for meat quality in the Australian sheep meat supply chain. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 45 (5): 593-601. http://dx.doi.org/10.1071/ea04006

Young, O.A.; Lane, G.A.; Podmore, C.; Fraser, K.; Agnew, M.J.; Cummings, T.L.; Cox, N.R., 2006. Changes in composition and quality characteristics of ovine meat and fat from castrates and rams aged to 2 years. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 49 (4): 419-430. http://dx.doi.org/10.1080/00288233.2006.9513733

Young, O.A.; Lane, G.A.; Priolo, A.; Fraser, K., 2003. Pastoral and species flavour in lambs raised on pasture, lucerne or maize. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83 (2): 93-104. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1282

Youssef, M.K.; Barbut, S., 2011. Fat reduction in comminuted meat products-effects of beef fat, regular and pre-emulsified canola oil. *Meat Science*, 87 (4): 356-360. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.011

Ytrestoyl, T.; Aas, T.S.; Asgard, T., 2015. Utilisation of feed resources in production of Atlantic salmon (Salmo salar) in Norway. *Aquaculture*, 448: 365-374. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.06.023

Ytrestoyl, T.; Coral-Hinostroza, G.; Hatlen, B.; Robb, D.H.F.; Bjerkeng, B., 2004. Carotenoid and lipid content in muscle of Atlantic salmon, Salmo salar, transferred to seawater as 0+ or 1+ smolts. *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular Biology*, 138 (1): 29-40. http://dx.doi.org/10.1016/j.cbpc.2004.01.011

Zabbia, A.; Buys, E.M.; De Kock, H.L., 2012. Undesirable Sulphur and Carbonyl Flavor Compounds in UHT Milk: A Review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52 (1): 21-30. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2010.487166

Zagorska, J.; Ciprovica, I., 2008. The chemical composition of organic and conventional milk in Latvia. *Proceedings 3rd Baltic conference on food science and technology*, 10-14.

Zahedirad, M.; Asadzadeh, S.; Nikooyeh, B.; Neyestani, T.R.; Khorshidian, N.; Yousefi, M.; Mortazavian, A.M., 2019. Fortification aspects of vitamin D in dairy products: A review study. *International Dairy Journal*, 94: 53-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.01.013

Zervas, G.; Tsiplakou, E., 2011. The effect of feeding systems on the characteristics of products from small ruminants. *Small Ruminant Research*, 101 (1-3): 140-149. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.09.034

Zhao, G.M.; Zhou, G.H.; Tian, W.; Xu, X.L.; Wang, Y.L.; Luo, X., 2005. Changes of alanyl aminopeptidase activity and free amino acid contents in biceps femoris during processing of Jinhua ham. *Meat Science*, 71 (4): 612-619. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.05.006

Zhao, Y.; Wells, J.H.; McMillin, K.W., 1994. Applications of dynamic modified atmosphere packaging systems for fresh red meats: Review. *Journal of Muscle Foods*, 5 (3): 299-328. http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4573.1994.tb00538.x

Zheng, X.B.; Wu, J.P.; Luo, X.J.; Zeng, Y.H.; She, Y.Z.; Mai, B.X., 2012. Halogenated flame retardants in home-produced eggs from an electronic waste recycling region in South China: Levels, composition profiles, and human dietary exposure assessment. *Environment International*, 45: 122-128. http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2012.04.006

Zhu, M.J.; Ford, S.P.; Means, W.J.; Hess, B.W.; Nathanielsz, P.W.; Du, M., 2006. Maternal nutrient restriction affects properties of skeletal muscle in offspring. *Journal of Physiology-London*, 575 (1): 241-250. http://dx.doi.org/10.1113/jphysiol.2006.112110

Zhuang, H.; Savage, E.M., 2011. Comparison of sensory descriptive flavor profiles between cooked hot-boned and cold-deboned broiler breast fillets. *International Journal of Poultry Science*, 10 (6): 426-432.

Zhuang, H.; Savage, E.M.; Lawrence, K., 2010. Effect of 3 postmortem electrical stimulation treatments on the quality of early deboned broiler breast meat. *Poultry Science*, 89 (8): 1737-1743. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2009-00460

Zidi, A.; Fernandez-Cabanas, V.M.; Carrizosa, J.; Jordana, J.; Urrutia, B.; Polvillo, O.; Gonzalez-Redondo, P.; Gallardo, D.; Amills, M.; Serradilla, J.M., 2010a. Genetic variation at the goat hormone-sensitive lipase (LIPE) gene and its association with milk yield and composition. *Journal of Dairy Research*, 77 (2): 190-198. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029910000099

Zidi, A.; Fernandez-Cabanas, V.M.; Urrutia, B.; Carrizosa, J.; Polvillo, O.; Gonzalez-Redondo, P.; Jordana, J.; Gallardo, D.; Amills, M.; Serradilla, J.M., 2010b. Association between the polymorphism of the goat stearoyl-CoA desaturase 1 (SCD1) gene and milk fatty acid composition in Murciano-Granadina goats. *Journal of Dairy Science*, 93 (9): 4332-4339. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2597

Zinn, R.A.; Jorquera, A.P., 2007. Feed value of supplemental fats used in feedlot cattle diets. *Veterinary Clinics of North America-Food Animal Practice*, 23 (2): 247-+. http://dx.doi.org/10.1016/j.cvfa.2007.03.003

Zouari, N.; Elgharbi, F.; Fakhfakh, N.; Ben Bacha, A.; Gargouri, Y.; Miled, N., 2010. Effect of dietary vitamin E supplementation on lipid and colour stability of chicken thigh meat. *African Journal of Biotechnology*, 9 (15): 2276-2283. https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/78559/68909

Zuliani, A.; Esbjerg, L.; Grunert, K.G.; Bovolenta, S., 2018. Animal Welfare and Mountain Products from Traditional Dairy Farms: How Do Consumers Perceive Complexity? *Animals*, 8 (11). http://dx.doi.org/10.3390/ani8110207

Zygoyiannis, D., 2006. Sheep production in the world and in Greece. *Small Ruminant Research*, 62 (1-2): 143-147. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.07.043

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants

Fichier 2 : Analyse des cahiers des charges des produits sous SIQO

Auteurs : Mégane Raulet (coordination), Antoine Clinquart, Bénédicte Lebret, Bruno Martin, Sophie Prache.

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - SIQO

S'agissant d'une analyse de cas et non d'une synthèse de littérature scientifique, le chapitre 2 fichier 2 ne fait pas l'objet d'une description de la bibliographie mobilisée, celle-ci correspondant majoritairement à des références législatives et techniques (dont les cahiers des charges), tant à l'échelle européenne que nationale.

Sommaire

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants 533

2.8 Analyse des SIQO 533

2.8.1 Cadre général des SIQO : Règlementation et exemple des cahiers des charges relatifs au jambon sec 533

2.8.2 Comparaison des cahiers des charges Label Rouge : Explicitation de l'importance des liens de leurs engagements avec les propriétés du produit, à partir de l'exemple des LR gros bovins de boucherie 551

2.8.3 Comparaison des cahiers des charges AOP, IGP, STG : Mise en évidence des arguments qualitatifs et explicitation de leurs liens aux propriétés des produits, à partir de l'exemple des fromages 573

2.8.4 Définition et application du cahier des charges de l'Agriculture biologique (AB) en Europe 595

CONCLUSIONS 603

Références bibliographiques 605

2.8 Analyse des SIQO

2.8.1 Cadre général des SIQO : Règlementation et exemple des cahiers des charges relatifs au jambon sec

Dans le secteur agro-alimentaire, le développement et la promotion de la qualité des produits animaux peut passer par la construction et la reconnaissance de signes de qualité garantissant certains engagements. Les signes officiels d'identification de qualité et d'origine, plus connus sous l'acronyme SIQO, sont strictement encadrés et règlementés : il s'agit des LR (Label Rouge), AOP (Appellation d'Origine Protégée), IGP (Indication Géographique Protégée), STG (Spécialité Traditionnelle Garantie) et AB (Agriculture Biologique). Dans un premier temps, nous présentons le cadrage général basé sur les définitions règlementaires. Puis, nous avons réalisé une comparaison entre ces signes de qualité à partir de l'exemple du jambon sec, ce qui permettra de constater la portée de chacun d'eux. Par la suite, chaque signe de qualité sera analysé : le LR à travers l'exemple des LR gros bovins, les systèmes de qualité, c'est-à-dire AOP, IGP, STG, à travers les exemples du jambon sec et des fromages et enfin l'AB. Ces différentes analyses s'intéresseront notamment aux spécifications tout au long de la chaine de production et à leur impact sur les propriétés du produit final.

2.8.1.1 Définition et règlementation

L'INAO (Institut national de l'origine et de la qualité), autorité compétente en matière de protection et de communication, définit les cinq SIQO reconnus en France de la façon suivante[1] :

- LR Label Rouge : produit de qualité supérieure en comparaison des produits standards. Cette qualité supérieure concerne les caractéristiques organoleptiques, l'image et les éléments de présentation ou de service du produit.
- AOP Appellation d'Origine Protégée : produit typique dont toutes les étapes de production, fabrication et transformation ont lieu dans la zone géographique délimitée, et dont la typicité est basée sur le terroir (interactions entre le milieu géographique, physique et biologique, et les facteurs humains).
- IGP Indication Géographique Protégée : produit typique dont au moins une étape parmi la production, la fabrication et la transformation a lieu dans la zone géographique délimitée qui lui confère une qualité, réputation ou autre caractéristique reconnaissable.
- STG Spécialité Traditionnelle Garantie : produit traditionnel, basé sur une composition, une méthode de fabrication ou de transformation traditionnelle.
- AB Agriculture Biologique : produit selon des pratiques respectueuses de l'environnement, respectant la biodiversité, les ressources naturelles et le bien-être animal, correspondant à une approche agro-écologique.

Ces définitions communiquées par l'INAO sont basées sur la réglementation européenne et/ou française, elles sont génériques et non spécifiques aux produits animaux. Ainsi les SIQO sont définis à l'échelle européenne, à l'exception du LR qui est une particularité française. De plus, si les LR, AOP, IGP, STG se traduisent en CDC spécifiques à chaque produit et qui doivent être validés par l'INAO puis publiés, l'AB quant à elle voit son CDC directement défini dans la règlementation européenne, bien que des guides de lecture et des fiches pratiques soient publiés en complément (à l'échelle nationale). Enfin, ces SIQO peuvent être combinés sur un même produit, à l'exception du LR et de l'AOP qui ne peuvent être apposés ensemble sur le même produit (article L641-2 du code rural). Il est ainsi possible de rencontrer des aliments certifiés LR et/ou IGP (ou STG) et/ou AB. Cette juxtaposition de signes engendre une possible confusion chez les consommateurs, ce qui questionne la problématique de la multiplication des signes et de leur perception.

Outre les SIQO, la règlementation européenne relative aux signes de qualité évoque les « mentions de qualité ». Ces mentions peuvent être appliquées à des produits présentant une caractéristique ou une propriété de production/transformation s'appliquant à des zones aux caractéristiques spécifiques. Le règlement européen (UE) n°1151/2012 cite nommément la mention « produit de montagne » et laisse la possibilité aux Etats membres de disposer de mentions de qualité nationales supplémentaires (Union Européenne, 2012). A ce titre, la règlementation française prévoit les mentions « montagne », « fermier » et « Haute Valeur Environnementale (HVE) ». La mention « fermier » n'est définie clairement que par produit. Ainsi la volaille fermière est détaillée dans le règlement (CE) n°543/2008 (Union Européenne, 2008), alors que le terme « fromage fermier » a été fixé par un décret national. La mention « fermier » est particulièrement mise en avant dans les cahiers des charges LR. En effet, le respect de certains critères supplémentaires octroie le droit d'utiliser cette mention en sus du signe LR.

La certification environnementale correspond à 3 niveaux successifs d'engagements relatifs à l'environnement. Le troisième niveau, le plus avancé et contraignant, procure le signe HVE. Pour l'heure, la certification HVE s'est surtout développée dans le secteur viticole. L'INAO a annoncé la prise en compte de la dimension agro-écologique par l'ensemble des SIQO, comme prévu dans son contrat d'objectifs et de performance 2019-2023[2]. En effet, la loi n°2018/938 du 30 octobre 2018, dite Egalim (République Française, 2018), prévoit dans son article 48 que : « *Un décret fixe les conditions dans lesquelles, au plus tard le 1er janvier 2030, les signes d'identification de la qualité et de l'origine mentionnés au 1° de l'article L. 640-2 du code rural et de la pêche maritime intègrent dans leurs cahiers des charges les dispositions pour que les exploitations concernées répondent aux exigences prévues pour faire l'objet de la certification prévue à l'article L. 611-6 du même code.* », autrement dit la « *certification qui comporte plusieurs niveaux d'exigences environnementales dont le plus élevé […] ouvre seul droit à la mention exploitation de haute valeur environnementale* ». En 2019, le décret d'application était en cours d'élaboration, des questions

[1] Plaquettes disponibles sur le site de l'INAO :
https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Label-Rouge;
https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Appellation-d-origine-protegee-Appellation-d-origine-controlee
https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Indication-geographique-protegee
https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Specialite-traditionnelle-garantie
https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Agriculture-Biologique

[2] Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. (2019). *Contrat d'objectifs et de performance 2019-2023.* https://www.inao.gouv.fr/content/download/2869/26832/version/1/file/COP-COPINAO20192023-Bassed%C3%A9f.pdf

étant débattues, notamment concernant l'adaptation possible aux élevages des critères conçus initialement pour les productions végétales. L'objectif actuellement affiché serait la certification environnementale niveau 2 ou 3 pour l'ensemble des SIQO, mais qui soulève dans ce cas l'interrogation relative à l'articulation de la certification HVE et celle du SIQO, en particulier AB. En effet, des inquiétudes ont été émises de la part des acteurs du secteur biologique sur une possible confusion entre les dimensions environnementales des différents SIQO.

2.8.1.2 Comparaison du cadre règlementaire

En s'appuyant strictement sur les références officielles, à la fois européennes et nationales, il est possible de faire des liens entre les engagements du CDC et les différentes propriétés du produit sous signe de qualité. Le tableau ci-après cite donc les références règlementaires et les propriétés définies pour chaque SIQO et mention (Tableau 2.8.1).

La propriété commune à tous les SIQO (mentions de qualité comprises) correspond à la qualité d'image. En effet, les signes officiels permettent de garantir la crédibilité et la fiabilité des produits certifiés, et par là d'en assurer la reconnaissance par les consommateurs. Au niveau national, les SIQO sont d'ailleurs regroupés dans la section « Mode de valorisation de la qualité et de l'origine » dans le Code rural. Il est à noter que la qualité d'image englobe de nombreuses facettes des propriétés d'un produit : les SIQO peuvent ainsi faire référence à des notions liées au développement durable, telles « *profitables à l'économie rurale, niveau élevé de bien-être animal, améliore la santé du sol…* ».

En revanche, trois profils peuvent être distingués selon les propriétés mises en avant par la règlementation. D'une part, le LR promeut la qualité supérieure qui se distingue des produits standards et qui est perceptible par les consommateurs. Il est à noter que la définition règlementaire du LR proposée dans le Code rural ne spécifie pas le type de propriétés concernées par la supériorité attendue d'un produit LR. Néanmoins, l'INAO précise que le LR permet la promotion des propriétés principalement organoleptiques, mais aussi d'usage, ce qui est en accord avec le choix et le positionnement que l'on peut relever dans les différents CDC (Cahiers des charges) LR. D'autre part, les SIQO liés à une zone géographique (à savoir AOP et IGP) ou à une tradition (STG) mettent en avant des propriétés organoleptiques particulières. En effet, les produits AOP, IGP et STG se différencient par des propriétés non pas supérieures mais différentes et perceptibles, basées sur la typicité et la spécificité du produit. Enfin, si l'on se base sur cet extrait du règlement (CE) n°834/2007 « *utilisation de procédés qui ne nuisent pas à l'environnement, à la santé humaine* », l'AB peut alors être reliée à des propriétés sanitaires (Commission européenne, 2007).

La certification environnementale (HVE) se distingue des autres signes et mentions de qualité par l'énonciation claire de l'absence de lien entre HVE et propriétés organoleptiques, nutritionnelles ou sanitaires : «*ni ne font état de propriétés organoleptiques ou nutritionnelles ou de qualités sanitaires particulières ni ne sont de nature à faire croire que les produits ont un effet bénéfique pour la santé du seul fait qu'ils sont issus d'exploitations certifiées de haute valeur environnementale* ».

Tableau 2.8.1 Comparaison des engagements des CDC des SIQO et mentions valorisantes en lien avec les propriétés des produits animaux, basée sur les références officielles nationales et européennes

Signe ou mention	LR	AB	AOP	IGP	STG	Produit de montagne	Fermier	Haute valeur environnementale
Référence UE		RCE 889/2008 (qui sera complété par RUE 2018/1584) RCE 834/2007 (qui sera abrogé par RUE 848/2018)	RUE 1151/2012			RUE 1151/2012 (mention de qualité)		
						complété par RUE 665/2014	RCE 543/2008 (volaille)	
Référence FR	Code Rural - R641-1 à -10 L641-2 à 4	Code Rural - R641-26 à 31 L641-13	Code Rural - R641-11 à 21 L641-5 à10	Code Rural - R641-11 à 21 L641-5 à10	Code Rural - R641-11 à 21 L641-23	Code Rural - R641-32 à 44 L641-14 à 17 ; Loi Montagne n°85-30 de 1985 ; Décret 2000-1231	Code Rural - D641-32 à 44 (œufs) et L641-19 Décret 2007-628 (fromage)	Code Rural - R641-57; D617-1 à 4; L641-19-1
Sanitaire	-	"limiter fortement l'utilisation des pesticides, qui peuvent entraîner la présence de résidus dans les produits agricoles (RCE889 6)" "utilisation de procédés qui ne nuisent pas à l'environnement, à la santé humaine (RCE834 II.3.c)"	-	-	-	-	-	"ne fait pas état de qualités sanitaires particulières (R641-57-2)"
Organoleptique	"Ensemble distinct de qualités et de caractéristiques spécifiques établissant un niveau de qualité supérieure" (R641-2.8)	-	"qualité/caractéristiques essentiellement ou exclusivement dues au milieu géographique (RUE1151 II.5.1.b)"	"qualité, réputation ou autre propriété attribuée essentiellement à origine géographique (RUE1151 II.5.2.b)"	"denrée alimentaire spécifique (RUE1151 III.18.1)" "spécificités : propriétés de production caractéristiques qui permettent de distinguer clairement un produit d'autres produits similaires" (RUE1151 I.3.5)	-	-	"ne fait pas état de propriétés organoleptiques particulières (R641-57-2)"
Nutritionnelle	-	-	-	-	-	-	-	"ne fait pas état de propriétés nutritionnelles particulières (R641-57-2)"
Usage	"qualités et de caractéristiques spécifiques établissant un niveau de qualité supérieure" (R641-2.8)	-	-	-	-	-	-	-
Technologique	-	-	-	-	-	-	-	-
Commerciale	-	-	-	-	-	-	-	-
Image	"mode de valorisation de la qualité et de l'origine" (Code rural VI.IV.1)	"viser à produire des produits de haute qualité (RCE834 II.3.b)" "préserver et justifier la confiance des consommateurs (RCE834 3)" "permettre une concurrence loyale et un bon fonctionnement du marché intérieur (RCE834 3)" ; "contribuant au développement rural (RCE834 3)" "maintient et améliore la santé du sol, de l'eau, des végétaux et des animaux (RCE834 II.3.a.i)" "assurer un niveau élevé de bien-être animal(RCE834 II.5.h)"	"garantir une concurrence loyale & conférant une valeur ajoutée (RUE1151 1.1.a) "profitable à l'économie rurale (RUE1151 4)" "assurant des revenus équitables (RUE1151 II.4.a)"			"garantir une concurrence loyale (RUE1151 1.1.a)" "la mention apporte une valeur ajoutée (RUE1151 IV.29.1.b)" "profitable à l'économie rurale (RUE1151 4)"		
					"sauvegarder les méthodes de production et recettes traditionnelles (RUE1151 III.17)"	"zones de montagne se caractérisent par des handicaps significatifs (Loi85-30 art3)"	"localisation des activités dans l'exploitation" (Décret 2007-628 art9)	"valorisation de la démarche agro-écologique" (Code rural L611-6)")

2.8.1.3 Comparaison des cahiers des charges des différents signes de qualité : Explicitation de l'importance des liens de leurs engagements avec les propriétés du produit, à partir de l'exemple du jambon sec

Si l'on ne considère plus uniquement les définitions et conditions règlementaires mais que l'on s'appuie sur les engagements décrits dans les CDC et autres documents techniques, il est possible d'une part de constater leur engagement tout au long de la chaine de production et d'autre part d'établir leur lien avec les différentes propriétés étudiées dans cette ESCo. L'analyse ci-dessous s'appuie sur l'exemple d'un produit transformé : le jambon sec. En 2019, pour définir le jambon sec LR, 5 CDC étaient disponibles en complément des Conditions de productions communes pour la production de porc et pour la production de produits de charcuterie. De même, la base de données européenne DOOR[3] recensait 50 CDC enregistrés de jambon (produit à base de viande) AOP, IGP et STG.

Pour plus de concision et de clarté, la comparaison à suivre porte sur un CDC par SIQO comme décrit dans le tableau ci-après (Tableau 2.8.2). Le choix des CDC s'est effectué à partir des produits les plus connus/consommés et dont les CDC étaient complets et accessibles. Cette comparaison entre les différents SIQO est une première étape. En effet, d'autres SIQO feront l'objet dans les sections suivantes d'une analyse à part en se basant sur un exemple : d'un côté le LR gros bovin, de l'autre les fromages AOP/IGP/STG.

Tableau 2.8.2 Produits et références utilisés pour la comparaison des cahiers des charges "jambon sec"

Produit et SIQO	Références et Sources
Viande porcine et jambon AB	RCE 834/2007 (version 01/07/2013) : Commission européenne (2007) RCE 889/2008 (version 12/11/2018) : Commission européenne (2008) Guide de lecture INAO (version 13/12/2018) Fiches FNAB : porc, transformation
Jambon sec supérieur LR	Arrêté du 27/07/2017 fixant les conditions communes relatives à la production en label rouge porc : Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2017b) Arrêté du 27/07/2017 fixant les conditions de production communes relatives à la production en label rouge produits de charcuterie / salaison (et Jambon sec) : Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2017c) Cahier des charges du label rouge n°LA07/08 Jambon sec supérieur : Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2017n)
Prosciutto di Parma AOP	Cahier des charges Prosciutto di Parma AOP (version Consorzio del Prosciutto di Parma) [traduction libre de l'italien][4] Demande d'enregistrement Prosciutto di Parma AOP (journal officiel de l'Union Européenne)
Jambon de Bayonne IGP	Cahier des charges Jambon de Bayonne IGP (bulletin officiel du Ministère de l'agriculture) : Ministère de l'agriculture et de l'alimentation (2018c) Demande d'enregistrement Jambon de Bayonne IGP (journal officiel des communautés européennes)
Jamon Serrano STG	Cahier des charges Jamon Serrano STG (version Asociación de Industrias de la Carne de España) [traduction libre de l'espagnol][5] Demande d'enregistrement Jamon Serrano STG (journal officiel des communautés européennes)

Cette comparaison n'est ainsi pas exhaustive, mais permet néanmoins de mettre en évidence de façon pragmatique les points de convergence et de différenciation entre SIQO. La restriction à un seul exemple par SIQO conduit cependant à aborder ce sujet en termes plus qualitatifs et relatifs que quantitatifs et absolus. De plus, chacun des CDC dispose d'un format qui lui est propre. Les spécifications ont ainsi été rassemblées en 23 critères pour permettre leur comparaison de façon certes partiale, mais logique.

Les tableaux suivants montrent dans un premier temps s'il existe ou non des spécifications tout au long de la chaine de production selon le SIQO considéré (Tableau 2.8.3), et dans un second temps ils détaillent ces spécifications (Tableau 2.8.4).

[3] Depuis le 01/01/2020, la plateforme européenne DOOR d'enregistrement des produits AOP, IGP et STG a été remplacée par eAmbrosia : https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/food-safety-and-quality/certification/quality-labels/geographical-indications-register/

[4] https://www.prosciuttodiparma.com/pdf/it_IT/disciplinare.28.11.2013.it.pdf

[5] https://www.anice.es/industrias/biblioteca/el-pliego-de-condiciones-para-la-elaboracion-de-jamon-serrano-etg-especialidad-tradicional-garantizada_18301_189_25698_0_1_in.html

Tableau 2.8.3 Spécifications concernant certains critères importants pour les propriétés du produit au cours des étapes de la chaine de production, selon les SIQO

Etape	Critère	LR	AOP	IGP	STG	AB
Animal	Race et génétique					
	Type d'animal					
	Origine					
Infrastructure	Bâtiment					
	Extérieur (parcours, aire d'exercice, plein air)					
Elevage	Gestion					
	Soin vétérinaire					
	Mutilation					
	Alimentation					
	Niveau ou forme d'alimentation					
	Effluents					
Abattage	Transport animal					
	Abattage					
	Carcasse					
	Ressuyage					
	Transport viande					
Transformation	Lieu de transformation					
	Caractéristiques de la matière première					
	Ingrédients et additifs					
	Méthode de transformation					
Conditionnement	Etapes					
	Forme de commercialisation					
	Caractéristiques du produit fini					
	Nombre de critères renseignés (sur 23 au total)	18	15	12	8	17

Légende

	Critère renseigné pour le SIQO considéré
	Critère non renseigné pour le SIQO considéré

Tableau 2.8.4 Spécifications au cours de la chaîne de production de jambon sec selon le SIQO considéré et selon les propriétés du produit final

Etape	Critère	SIQO	Organoleptique	Sanitaire	Nutritionnelle	Usage	Technologique	Commerciale	Image
Animal	Race et génétique	LR	Sélection pour qualité organoleptique supérieure. Reproducteurs non porteurs des allèles n et RN- associés à une mauvaise qualité de viande				Reproducteurs non porteurs des allèles n et RN- associés à une mauvaise qualité de viande	Reproducteurs non porteurs des allèles n et RN- associés à une mauvaise qualité de viande	
		AOP	Trois races autorisées mais de type plutôt conventionnel. Pas de race autochtone spécifique					Trois races autorisées	Trois races autorisées mais de type plutôt conventionnel. Pas de race autochtone spécifique
		IGP							
		STG							
		AB	Race évitant le défaut PSE	Race résistante aux maladies			Race évitant le défaut PSE	Race évitant le défaut PSE	Privilégier la diversité génétique des races ou souches, leur capacité d'adaptation aux conditions locales, la longévité, la vitalité et la résistance aux maladies. Préférence aux races autochtones
	Type d'animal	LR	Femelle ou mâle castré Âge à l'abattage : min 182 j					Femelle ou mâle castré Âge à l'abattage: min 182 j	Âge à l'abattage : min 182 j
		AOP	Femelle ou mâle castré Âge et poids à l'abattage : min 270 j et 140 kg					Femelle ou mâle castré Âge et poids à l'abattage : min 270 j et 140 kg	Âge à l'abattage : min 270 j
		IGP	Femelle ou mâle castré					Femelle ou mâle castré	
		STG							
		AB	(Mâle entier non interdit)						(Mâle entier non interdit)
	Origine	LR							

		AOP	Zone de production territorialisée mais beaucoup plus large que l'aire de transformation						Origine territorialisée
		IGP	Zone de production territorialisée mais beaucoup plus large que l'aire de transformation						Origine territorialisée
		STG							
		AB		Non mixité, origine bio					Non mixité, origine bio
Infrastructure	Bâtiment	LR		Ventilation ; type de sol (caillebotis ou litière)					Garantie du bien-être animal détaillée (type de sol : caillebotis et litière autorisés, superficie minimale/animal, ventilation, gestion litière) ; nombre animaux max par case
		AOP		Ventilation (élimination des gaz)					Garantie du bien-être animal simplement mentionnée
		IGP							
		STG							
		AB		Ventilation (limitation des gaz) Liste positive de produits de nettoyage et désinfection des bâtiments					Garantie du bien-être animal détaillée (type de sol : caillebotis autorisé si <50% surface intérieure ; aire de couchage avec litière, ventilation, respect du comportement, superficie/animal) Aération et éclairage naturels abondants. Accès obligatoire à espaces extérieurs Production hors-sol interdite
	Extérieur (parcours, aire	LR	Accès au plein air		Accès au plein air		Accès au plein air		Pour LR « fermier », « fermier en plein air » et « fermier en liberté » : parcours

	d'exercice, plein air)								(aire bétonnée) ou plein air (sol nu) possible et détaillé (aménagement, densité)
		AOP							
		IGP							
		STG							
		AB	Accès à un extérieur		Accès au pâturage : modification du profil lipidique (AG n-3)		Accès à un extérieur		Aire d'exercice extérieure obligatoire (aménagement, superficie/animal)
Elevage	Gestion	LR							Non mixité (spécialisation des sites d'élevage)
		AOP							
		IGP							
		STG							
		AB							Non mixité
	Soin vétérinaire	LR							
		AOP							
		IGP							
		STG							
		AB		Prévention favorisée. Traitements allopathiques limités et délai d'attente augmenté					Limitation des traitements ; interdiction de traitements allopathiques préventifs ou de substances stimulant la croissance ou visant à maîtriser la reproduction (synchronisation des chaleurs, induction de mise bas). La phytothérapie et l'homéopathie sont favorisées.
	Mutilation	LR							
		AOP							
		IGP							
		STG							
		AB							Coupe des queues, épointage des dents et pose d'anneau nasal interdits

									(dérogations exceptionnelles) Castration avec anesthésie et/ou analgésie jusqu'à 7 j
	Alimentation	LR	Rations détaillées (liste positive de catégories d'ingrédients et proportions globales) A base de céréale, AG maîtrisé, avec lactosérum		Rations détaillées (liste positive de catégories d'ingrédients et proportions globales) A base de céréale, AG maitrisé, avec lactosérum				Spécification d'aliments interdits : Farine de viande, d'os, de plume ou de sang, de manioc ou de patate douce. Huiles de poisson.
		AOP	Rations détaillées (liste positive d'ingrédients et proportions) A base de céréale, AG maîtrisé, avec lactosérum		Rations détaillées (liste positive d'ingrédients et proportions) A base de céréale, AG maitrisé, avec lactosérum				Rations détaillées, céréales et lactosérum de Parmesan (Parmigiano-Reggiano)
		IGP	A base de céréale (>50%) AG maîtrisé		A base de céréale (>50%) AG maitrisé				A base de céréales (>50%)
		STG							
		AB		Interdiction OGM Aliments biologiques (autorisation ≤ 5% aliments non bio jusque fin 2020) Liste positive d'additifs et minéraux limitée					Auto-approvisionnement (>20%, >30% à partir de 01/2021) et approvisionnement local mis en avant Interdiction OGM Aliments biologiques (autorisation ≤ 5% aliments non bio jusque fin 2020) Liste positive d'additifs et minéraux limitée Interdiction de l'incorporation d'acides aminés de synthèse dans la ration. Mise à disposition en de fourrages grossiers (frais, secs ou ensilés) ou accès au pâturage

	Niveau ou forme d'alimentation	LR						Aménagement pour éviter la compétition	Aménagement pour éviter la compétition
		AOP	Alimentation rationnée						
		IGP							
		STG							
		AB							
	Effluents	LR		Conditions d'épandage encadrées					Taille d'élevage limitée par les capacités d'épandage, taille des salles d'élevage limitée Conditions d'épandage encadrées
		AOP							
		IGP							
		STG							
		AB		Nombre d'animaux limités Quantité d'effluents limités					Quantité d'effluents limités Epandage obligatoirement sur terres bio
Abattage	Transport animal	LR	Mise à jeun avant embarquement entre 12 et 18 h et durée mise à jeun-abattage < 30 h	Mise à jeun avant embarquement entre 12 et 18 h et durée mise à jeun-abattage < 30h			Dispositif d'attente et d'embarquement à l'élevage Pas de mélange entre lots d'engraissement Mise à jeun avant embarquement entre 12 et 18 h et durée mise à jeun-abattage < 30 h	Dispositif d'attente et d'embarquement à l'élevage Pas de mélange entre lots d'engraissement Mise à jeun avant embarquement entre 12 et 18h et durée mise à jeun-abattage < 30h	Respect du bien-être animal (aménagement à l'élevage, manipulation des animaux , conditions de transport, Durée ou distance de parcours max < 6 h ou 200 km
		AOP	Porc sain et à jeun depuis 15 h	Porc sain et à jeun depuis 15 h			Porc sain et à jeun depuis 15 h	Porc sain et à jeun depuis 15h	Porc reposé
		IGP							
		STG		Porc en bonne santé					Porc en bonne santé
		AB	Stress réduit				Stress réduit	Stress réduit	Respect du bien-être animal (stimulation électrique et calmants interdits) Durée de transport réduite au minimum

	Abattage	LR		Ecoulement eau et déjections facilité			Douchage (avant transport si >10°C, arrivée abattoir, avant abattage) ; temps repos minimal	Identification éventuels incidents d'élevage impactant la qualité (porcs non labellisables). Douchage (avant transport si >10°C, arrivée abattoir, avant abattage); durées mise à jeun et transport limitées, temps repos minimal à l'abattoir	Minimisation du stress (durée mise à jeun et transport limitées, aménagement des cases de bouverie d'abattoir, temps repos minimal à l'abattoir
		AOP							
		IGP						Abatteur-découpeur habilité	Abatteur-découpeur habilité
		STG		Respect de la législation sanitaire					
		AB							Souffrance réduite
	Carcasse	LR	Poids chaud minimum Epaisseurs de muscle et gras minimales, gamme de pH ultime				Poids chaud minimum Epaisseurs de muscle et gras minimales, gamme de pH ultime	Poids chaud minimum Epaisseurs de muscle et gras minimales, gamme deet pH ultime Gras bardière blanc et ferme Absence de défauts d'aspect (épilation, griffures, points de sang, fractures)	
		AOP	Classes U, R, O				Classes U, R, O	Classes U, R, O	
		IGP						Marquage spécifique des jambons	Marquage spécifique des jambons (traçabilité élevage-transformation-produit fini)
		STG							
		AB							
	Ressuyage	LR	Eviter frottement os/muscle ou gras	Eviter condensation			Eviter condensation (joue sur la conservabilité)	Eviter condensation (maîtrise de perte de poids)	
		AOP							

		IGP							
		STG							
		AB							
	Transport viande	LR							
		AOP							
		IGP							
		STG	Température maitrisée (<3°c à cœur)	Température maitrisée (<3°c à cœur)			Température maitrisée (<3°c à cœur)	Température maitrisée (<3°c à cœur)	
		AB		Transport approprié, substitution/contamination impossible					Transport approprié, substitution/contamination impossible
Transformation	Lieu de transformation	LR							
		AOP	Terroir restreint, et altitude max 900 m						Terroir restreint, et altitude max 900 m
		IGP	Terroir restreint						Terroir restreint
		STG							
		AB		Non mixité					Non mixité
	Caractéristiques de la matière première	LR	Provient de porc LR Poids du jambon, gamme de pH ultime, et épaisseur de gras requis Absence de défauts d'aspect Gras blanc et ferme	Délai de mise en œuvre après abattage Température à cœur du jambon à réception : -3 à 4°C Critères microbio : Pseudom. <105/g et Enterobact<104/g			Poids du jambon, gamme de pH ultime et épaisseur de gras requis Sans défaut Interdiction d'utilisation de maigre congelé Gras blanc et ferme	Provient exclusivement de porc LR Délai max de mise en œuvre après abattage Interdiction d'utilisation de maigre congelé Absence de défauts d'aspect	Provient exclusivement de porc charcutier LR
		AOP	Poids min et max, gras, iode détaillés	Acide linoléique <15% dans le tissu gras Délai de mise en œuvre après abattage					Provient de porc AOP
		IGP	Poids et épaisseur gras min, Sans défauts d'aspect				Poids et épaisseur gras min Bon pouvoir de rétention d'eau	Coupe spécifique Poids et épaisseur gras min, bonne rétention d'eau, Sans défauts d'aspect	Provient de porc IGP
		STG	Poids, gras détaillés Sans défaut	Température à cœur <3°C					
		AB							Provient de porc AB

	Ingrédients et additifs	LR	Liste positive (reprise du Code des usages) : Sel, sucre, nitrate, saindoux/panne. Ferments interdits	Sel et nitrates autorisés Ionisation interdite	Sel, sucre, panne/saindoux autorisés		Sel, sucre, panne/saindoux, nitrates autorisés Ferments interdits	Liste positive (reprise du Code des usages) : Sel, sucre, nitrate, saindoux/panne. Ferments interdits	Ionisation interdite
		AOP	Sel sec ou humide Aucun additif autorisé y compris de type E (nitrites, nitrates, salpêtre, colorants, arômes etc…)	Seul le sel est autorisé. Aucun additif autorisé	Sucre non autorisé		Seul le sel est autorisé. Aucun additif autorisé	Sel sec ou humide Aucun additif autorisé y compris de type E (nitrites, nitrates, salpêtre, colorants, arômes etc…)	Aucun ajout autre que sel
		IGP	Sel naturel du terroir Epices et aromates (dont piment d'Espelette AOP) autorisés En quantité limitée: salpêtre, sel nitrité, sucre.	Sels nitrités (sodium, potassium, salpêtre) autorisés mais limités	Sucre autorisé mais limité		Sels nitrités (sodium, potassium, salpêtre) autorisés mais limités	Sel naturel du terroir Epices et aromates (dont piment d'Espelette AOP) autorisés En quantité limitée: salpêtre, sel nitrité, sucre.	Sel naturel du terroir Epices et aromates (dont piment d'Espelette AOP) autorisés En quantité limitée: salpêtre, sel nitrité, sucre.
		STG	Sel commun, additif (sel nitrifiant) Fumage, épices interdites	Sel nitrifiant autorisé	Sucre non autorisé		Sel nitrifiant autorisé	Sel commun, additif (sel nitrifiant) Fumage, épices interdites	Sel nitrifiant autorisé
		AB	Liste d'ingrédients encadrés : 95% AB, additifs listés, arômes naturels, colorants pour estampillage de viande, eau et sels, minéraux si légalement exigés	Additifs autorisés selon liste restrictive : Sels nitrités (sodium, potassium) autorisés mais limitésIonisation interdite	Sucre non interdit		Nitrites autorisés mais limités	Liste d'ingrédients encadrés : 95% AB, additifs listés, arômes naturels, colorants pour estampillage de viande, eau et sels, minéraux si légalement exigés	Réduction des additifs et liste positive réduiteNitrite limitésIonisation interdite
	Méthode de transformation	LR	Process et conditions de transformation très détaillés Fabrication 9 mois min				Process et conditions de transformation très détaillés Perte de poids précisée	Process et conditions de transformation très détaillés	Fabrication 9 mois min
		AOP	Process et conditions de transformation très détaillés Sondage pour vérification olfactive Fabrication 12 mois min, dont affinage				Perte de poids minimale (indicateur de séchage) précisée	Process et conditions de transformation très détaillés Fabrication 12 mois min	Fabrication 12 mois min et jusqu'à 36 mois ou plus

			150 j min et jusqu'à 30 mois						
		IGP	Process détaillé (salage au sel sec et séchage à l'air) Fabrication 7 mois min			Process détaillé (salage au sel sec et séchage à l'air, autre procédé de conservation interdit	Process détaillé (salage au sel sec et séchage à l'air)	Process détaillé (salage au sel sec et séchage à l'air) Fabrication 7 mois min	Fabrication 7 mois min
		STG	Process et conditions de transformation détaillés Fabrication 7 mois min				Perte de poids précisée	Process et conditions de transformation très détaillés	Fabrication 7 mois min
		AB							Pas de transformation pouvant induire en erreur Précaution lors de la transformation
Conditionnement	Etapes	LR	Délai entre raidissage et tranchage				Température précisée		
		AOP		Emballage sous atmosphère modifiée ou sous vide autorisé		Emballage de taille, forme, poids variable	Emballage sous atmosphère modifiée ou sous vide autorisé		Conditionnement dans l'aire géographique
		IGP	Process (désossage, raidissage…) détaillé Délai entre tranchage et conditionnement				Process (désossage, raidissage…) détaillé	Process (désossage, raidissage…) détaillé. Délai entre tranchage et conditionnement Conditionnement dans l'aire géographique	Conditionnement dans l'aire géographique
		STG							
		AB							
	Format et commercialisation	LR		Température de conservation conseillée selon le format		Jambon entier, demi, quart			Logo LR
		AOP	Tableau précisant les durées de conservation selon poids, affinage, conservation			Entier, désossé ou en tranches sous forme prétranché-préemballé sous atmosphère modifiée	Tableau précisant les durées de conservation selon poids, affinage, conservation		Logo AOP (générique) et marquage (jambon entier) ou logo (produits tranchés) spécifique du Jambon de Parme
		IGP				Avec os, Désossés, découennés, dégraissés, pressés, moulés, et conditionnés ; Entiers,			Logo IGP

						en demi ou en quart ; Tranchés en portions unitaires.			
		STG				coupe en V ou ronde, avec ou sans pied, dé-sossé avec couenne ou sans couenne et dé-graissé			Logo STG
		AB							Logo AB
	Caractéris-tiques du pro-duit fini	LR	Teneurs maximales en sel, sucre, humidité : li-mités Caractéristiques orga-noleptiques requises, sans défauts (aspect, goût, texture)		Teneurs maximales en sel, sucre limités	Humidité contrôlée : donc conservation mai-trisée		Teneurs maximales en sel, sucre, humidité Durée maximale de conservation Caractéristiques orga-noleptiques requises, sans défauts (aspect, goût, texture)	
		AOP	Sel, humidité, protéo-lyse, poids : limités Caractéristiques senso-rielles requises, sans défaut		Sel limité	Humidité contrôlée : donc conservation mai-trisée		Sel, humidité, protéo-lyse, poids : limités Caractéristiques orga-noleptiques requises, sans défaut	
		IGP	Sel, humidité, sucre, poids : limités Caractéristiques senso-rielles requises, sans défaut		Sel, sucre limités	Humidité contrôlée : donc conservation mai-trisée		Sel, humidité, sucre, poids : limités Caractéristiques orga-noleptiques requises, sans défaut	
		STG	Sel, humidité : limités Caractéristiques senso-rielles requises, sans défaut		Sel limité	Humidité contrôlée : donc conservation mai-trisée		Sel, humidité : limi-tésCaractéristiques or-ganoleptiques re-quises, sans défaut	
		AB							

Légende :

Critère non renseigné pour le SIQO de la ligne concernée

Par rapport à la chaine de production, le LR couvre le plus de critères et de paramètres depuis le type d'animal et les conditions d'élevage jusqu'au conditionnement et au produit fini. L'AB couvre également de nombreux critères. A contrario, la STG est le SIQO qui couvre le moins l'ensemble des étapes de production. En effet, les spécifications liées à la production du Jamon serrano STG ne concernent pas la production primaire mais la transformation à partir de la matière première (carcasse/jambon (pièce brute). Ce constat est cohérent avec le cadre règlementaire des STG qui mentionne « *un mode de production, d'une transformation ou d'une composition […] traditionnelle*[6] ». Pour autant, une demande d'enregistrement de « Jamon Serrano » (serrano signifie en espagnol « de la montagne ») en tant qu'IGP a été déposée en 2016, ce qui permettrait son ancrage dans un territoire précis et fixe, on observe ainsi une perméabilité et une évolution possible entre les SIQO.

Les SIQO peuvent être comparés entre eux selon leur implication au cours des différentes étapes de production et de transformation. Selon l'enchainement des étapes de production puis de transformation, le premier point différenciant concerne les caractéristiques des animaux. Ainsi le LR, l'AB et l'AOP se sont penchés sur des critères liés à la race et à la génétique des animaux : d'un côté le LR et l'AB préconisent des races favorisant différentes propriétés du produit fini mais sans les spécifier, de l'autre l'AOP requiert 3 races précises. Pour autant, les races de porcs autorisées dans l'AOP Jambon de Parme sont des races relativement « conventionnelles » (voire favorables à la qualité sensorielle comme le Duroc) et non des races pures autochtones, comme c'est le cas dans d'autres productions de jambon sec AOP en Italie, France, Espagne ou Portugal. Concernant le type d'animal, le LR, l'AOP et l'IGP annoncent explicitement que les mâles doivent être castrés. Bien que l'AB ne l'énonce pas explicitement, mais le type d'animal n'étant pas spécifié pour la transformation en agriculture biologique, il est induit que les mâles entiers (non castrés) ne sont pas interdits.

Aucune restriction n'est précisée quant à l'origine des animaux dans le cas du LR ni du STG « Jamon Serrano », conformément aux définitions règlementaires de ces SIQO. En revanche, l'AB requiert (bien qu'avec dérogations possibles) des animaux nés et élevés en exploitations biologiques. De même, l'AOP « Prosciutto di Parma », en accord avec la définition règlementaire de ce SIQO, délimite les régions dans lesquelles les animaux peuvent être élevés. Toutefois, cette zone est très large (environ les ¾ du territoire italien) relativement à la zone très restreinte de transformation des jambons, contrairement à d'autres productions de jambon AOP ou les étapes de production des animaux et d'élaboration des produits sont réalisées dans une aire géographique délimitée et restreinte. L'IGP « Jambon de Bayonne » (2018c) présente une situation atypique : bien que la définition règlementaire du SIQO n'impose qu'une seule étape entre la production, la transformation ou l'élaboration dans la zone géographique obligatoire définie, ce CDC spécifique décrit la région d'élevage des animaux, en plus de la région de transformation règlementaire requise. La région d'élevage est toutefois nettement plus étendue que celle de transformation. Des contre-exemples de jambon IGP dont la provenance de la matière première n'est pas spécifiée peuvent être cités, comme le jambon d'Auvergne IGP (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016c) ou encore le jambon sec des Ardennes IGP (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016b). Plus précisément, le CDC du jambon sec des Ardennes IGP était revu en 2014 et une des modifications consistait en la « *Suppression de l'obligation d'approvisionnement en porcs dans l'aire géographique : cela donne plus de souplesse aux opérateurs et leur permet de s'approvisionner en porcs tout en respectant les caractéristiques des matières premières décrites dans le cahier des charges* ». Ainsi une grande diversité d'exigences concernant les « contraintes » de production - qui constituent aussi des éléments différenciant contribuant à la typicité – existe au sein des signes AOP et IGP.

L'AB, dont l'objectif de respect de l'environnement est explicite, et le LR ont la particularité d'encadrer la production et l'épandage des effluents de l'élevage. La dimension environnementale est moins forte pour les exemples étudiés relevant des autres signes de qualités (AOP, IGP et STG) qui ne font pas référence à la gestion des effluents. De même, ces signes de qualité font peu mention du bien-être animal : excepté une citation succincte dans le CDC de l'AOP « Prosciutto di Parma », il n'existe pas de précision quant aux infrastructures, densités, mutilations et soins vétérinaires dans les exemples étudiés. Dans une moindre mesure, le LR spécifie bien les infrastructures à mettre en place, mais ne fait pas référence aux soins vétérinaires ni aux mutilations.

---

[6] Article 18, Commission Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012 R1151 Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012R1151Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012R1151

De tous les SIQO, à part l'usage de son logo, l'AB est le seul à ne pas présenter des spécifications relatives au produit fini, à ses caractéristiques et son conditionnement, en particulier le type d'emballage (recyclable, composition, réduction…). Les autres CDC sont par ailleurs très précis quant aux caractéristiques du produit fini, s'attachant ainsi à garantir des résultats sur le produit commercialisé.

Outre le fait que chaque SIQO est engagé différemment sur les différentes étapes de la chaine de production, les engagements pris renvoient différemment aux 7 volets de la qualité, comme le montre le tableau ci-après recensant le pourcentage des propriétés influencées par les spécifications d'un SIQO (Tableau 2.8.5). Ce pourcentage est basé sur le nombre d'engagements pris par un SIQO ayant un effet sur la propriété considérée par rapport au nombre total d'engagements renseignés pour ce même SIQO.

Tableau 2.8.5 Importance relative des engagements des différents SIQO quant aux différents volets de la qualité du jambon sec (sur la base des critères renseignés par SIQO)

SIQO	Organoleptique	Sanitaire	Nutritionnelle	Usage	Technologique	Commerciale	Image	Critères renseignés (sur 23)
AB	24%	53%	12%	0%	24%	18%	100%	17
AOP	87%	33%	20%	20%	40%	47%	80%	15
IGP	75%	8%	25%	25%	33%	67%	83%	12
LR	67%	44%	22%	11%	56%	61%	72%	18
STG	63%	63%	25%	25%	38%	50%	50%	8

Légende

Les deux propriétés les plus concernées par les engagements du SIQO

Toutes les définitions règlementaires des SIQO ont un objectif affiché lié à l'image des produits. Ainsi les spécifications de tous les SIQO s'y réfèrent dans des proportions élevées mais différentes. L'AB a une dimension basée sur l'image extrêmement forte : la plus élevée par rapport à ses autres dimensions et également plus élevée par rapport aux autres SIQO. Cette relation privilégiée entre AB et propriétés d'image résulte principalement de la mise en avant du respect de l'environnement et du bien-être animal. L'AB présente l'autre particularité d'avoir un impact important sur les propriétés sanitaires qui représentent les deuxièmes propriétés influencées par les spécifications AB. Ces deux particularités sont en accord avec les principes de l'agriculture biologique définis dans la règlementation européenne.

Les spécifications des autres SIQO (LR, AOP, IGP) sont principalement axées sur les propriétés organoleptiques et d'image. Ces propriétés organoleptiques découlent surtout du type d'animal spécifié, de l'alimentation des animaux et de leurs conditions d'élevage, des conditions de pré-abattage et d'abattage ainsi que des procédés d'élaboration des produits (matières premières et ingrédients, durée et conditions des différentes étapes de transformation, durée d'affinage). Quant aux propriétés d'image, elles se retrouvent tout au long des étapes de production et transformation, notamment en lien avec l'environnement et le bien-être animal (infrastructure, extérieur, gestion, soin vétérinaire et mutilation) à l'instar de l'AB. Enfin le STG, qui est le signe disposant du plus faible nombre de critères parmi les 23 critères recensés pour l'ensemble des SIQO, les effets recensés agissent principalement sur les propriétés organoleptiques et sanitaires. Contrairement aux autres SIQO, la STG ne semble avoir moins de lien avec les propriétés d'image.

Au-delà des propriétés majeures d'image et/ou organoleptiques adressées par les engagements de chaque SIQO, les engagements des CDC et documents techniques renvoient à d'autres dimensions de la qualité, plus fortement que leurs objectifs règlementaires. Par exemple, l'AB, outre les propriétés d'image et sanitaire, prend également des engagements en lien avec les dimensions organoleptique, technologique, commerciale, et en proportion plus modérée avec les propriétés nutritionnelles, ces dernières faisant l'objet d'études à approfondir en réponse aux attentes liées aux produits issus de l'AB. L'AOP et l'IGP prennent en compte de façon plutôt homogène l'ensemble des propriétés restantes (commerciale, technologique, usage et un peu sanitaire), et considèrent de plus en plus les propriétés nutritionnelles (par exemple une révision récente du CDC de l'AOP Prosciutto di Parma inclut notamment une réduction de la teneur en sel du produit fini). Quant au STG, ses spécifications jouent un rôle aussi par rapport aux dimensions commerciales et technologique.

Chaque SIQO montre ainsi à travers ses spécifications son implication dans les diverses dimensions des propriétés des produits animaux, avec des spécificités, notamment liées à leur définition légale initiale. La couverture des différentes étapes de production et de transformation par les spécifications des CDC est ainsi en accord avec les éléments règlementaires de chaque

SIQO : le LR et l'AB couvrent la chaine de production et transformation de façon plutôt étendue, alors que la STG a une couverture plus réduite et concentrée sur la transformation. Tous les SIQO ont un impact important sur les propriétés d'image de leur produit, souvent en lien avec l'environnement, la santé et le bien-être animal. L'AB présente en plus un lien étroit avec les propriétés sanitaires, alors que les autres SIQO associent un fort lien aux propriétés organoleptiques. On observe par ailleurs une grande diversité parmi les exigences des CDC des SIQO, ces éléments de différenciation permettent ainsi d'établir la particularité et la spécificité/typicité de chacun. Ces CDC évoluent et peuvent être revus : on observe de cette façon une adaptation aux conditions locales, voire même une ré-adéquation entre les caractéristiques du produit et de sa production avec les objectifs de chaque SIQO.

Les conclusions extraites de ce travail doivent toutefois être nuancées par le fait qu'il portait sur l'analyse tirée d'exemples concrets mais non exhaustifs, il existe ainsi toujours des contre-exemples ou des exceptions. Bien que concernant des productions de grande ampleur en Europe, les CDC choisis ne peuvent être représentatifs de l'intégralité de la production de jambon sec sous SIQO. Les différentes spécifications proviennent de CDC dont la trame et la construction diffèrent. Elles ont donc été regroupées sous des critères plus englobants afin de permettre une comparaison logique : le découpage artificiel des différentes spécifications des CDC peut donc avoir un effet sur la quantification des effets de ces mêmes spécifications. Enfin les effets des spécifications sur les propriétés des produits animaux n'ont pas été qualifiés (positif, négatif) ni pondérés (effet très important, important, moyen, peu important) : il s'agissait davantage de donner des ordres de grandeur et de tendances dans la comparaison des SIQO les uns par rapport aux autres, et non d'obtenir des valeurs absolues.

2.8.2 Comparaison des cahiers des charges Label Rouge : Explicitation de l'importance des liens de leurs engagements avec les propriétés du produit, à partir de l'exemple des LR gros bovins de boucherie

Parmi les différents signes officiels de qualité, il en est un qui se distingue par sa définition règlementaire : le LR et son « *niveau de qualité supérieur* », que l'INAO a associé à des « *caractéristiques sensorielles, des conditions de production qui se distinguent, l'image du produit et des éléments de présentation ou de service* ». L'étude des CDC LR projette donc d'analyser comment ces CDC participent à la construction de la qualité des produits animaux en prenant l'exemple des gros bovins LR. La structure et l'organisation des CDC seront présentées avant que les spécifications ne soient détaillées. Enfin, le lien entre spécifications et propriétés des produits animaux sera précisé.

2.8.2.1 Structure générale des cahiers des charges LR

Les critères techniques appliqués aux produits LR sont répartis en 2 niveaux. Le premier, le plus général, correspond aux « **conditions de production communes** », remplaçant les anciennes « notices techniques », et qui sont appliquées à l'ensemble des opérateurs d'une filière. Il en existe 9, chacune relative à une filière animale, par exemple les gros bovins de boucherie, le porc ou encore les palmipèdes[7]. Le second niveau complète le premier avec des spécificités propres à chaque produit, et correspond au cahier de charges spécifique à chaque produit LR.

La structure de tous les CDC LR est la même : elle comprend une description du produit LR avec notamment les éléments justifiant de sa qualité supérieure (aussi appelés « **caractéristiques certifiées communicantes** »), la description du **produit courant de comparaison** et les **points de comparaison entre celui-ci et le produit LR**, la méthode d'obtention qui correspond à tous les **engagements** appliqués lors de la production et enfin les **PPC (Principaux Points de Contrôle)**. Le produit courant de comparaison est décrit dans le CDC mais de façon très large et variable entre CDC, sa définition peut en effet rester vague et volontairement ouverte à la variabilité, comme c'est le cas pour le CDC LA1891 (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017u ; 2017v ; 2017w) qui annonce un produit courant « *de type laitier, de tout système de production, de maturation généralement comprise entre 3 et 5 jours* ». A titre d'exemple de caractéristiques certifiées communicantes, le CDC LA0294 (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017j) relatif à la « *viande fraiche de gros bovins de boucherie* » annonce les points suivants : *« viande bovine issue de race Blanc Bleu ou d'un croisement de la race Blanc Bleu avec une race à viande, alternance prairie-étable, les animaux pâturant au moins 6 mois dans l'année* ». Enfin, les PPC comme la race, le chargement, le plan d'alimentation, etc. sont évalués par voie documentaire et/ou visuelle.

Les CDC LR, au nombre de 16, ont été analysés de la façon suivante : un premier état des lieux des critères et des spécifications leur étant liés a été établi pour les conditions de production communes et pour chaque CDC spécifiquement. Le critère correspond à la thématique de la règle imposée par le CDC, par exemple la race de l'animal. La spécification quant à elle correspond aux diverses possibilités offertes par les CDC pour une thématique, par exemple « *Les animaux sont exclusivement de*

[7] INAO. (2019, 05 07). *Conditions de production communes en label rouge* https://www.inao.gouv.fr/Espace-professionnel-et-outils/Produire-sous-signes-de-qualite-comment-faire/ Guides-pratiques/Conditions-de-production-communes-en-label-rouge

type racial AUBRAC ». Enfin les critères seront caractérisés, et leur relation avec les 7 propriétés constitutives de la qualité, étudiées dans le présent rapport, a été détaillée.

Arrêté du 27/07/2017 – conditions de production communes Gros bovins de boucherie LR (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a)
CDC LA0199 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Fermier race Aubrac (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017h)
CDC LA0274 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Race Charolaise (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017i)
CDC LA0294 Viande fraîche de gros bovins LR De boucherie (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017j)
CDC LA0386 Viande fraîche de gros bovins LR Fermier (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017k)
CDC LA0389 Viande, abats et viande hachée, frais et surgelés, de gros bovins LR Race Charolaise (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017l)
CDC LA0511 Viande fraîche de gros bovins LR Race blonde d'Aquitaine (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017m)
CDC LA0804 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Race Salers (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017o)
CDC LA0902 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Race Blonde d'Aquitaine (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017p)
CDC LA1189 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Race Charolaise (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017q)
CDC LA1297 Viande fraîche de gros bovins LR De boucherie (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017r)
CDC LA1693 Viande fraîche de gros bovins LR Fermier (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017s)
CDC LA1791 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Race Blonde d'Aquitaine (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017t)
CDC LA1891 Viande et abats frais de gros bovins LR De boucherie (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017u)
CDC LA1897 Viande et abats frais et surgelés de gros bovins LR Race Gasconne (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017v)
CDC LA2288 Viande fraîche et surgelée de gros bovins LR Race Limousine (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017w)
CDC LA2605 Viande fraîche de gros bovins LR Race Parthenaise (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017x)

Remarque : le CDC LA2901 (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017y) « Viande hachée fraîche et surgelée de gros bovins de boucherie » LR n'a pas été pris en compte dans les tableaux comparatifs car il ne concerne pas les étapes de la naissance à l'abattage, mais traite seulement des critères de transformation. Son insertion dans la comparaison aurait donc induit un déséquilibre avec des critères non comparables. On remarque toutefois que ce CDC particulier requiert une matière première issue de muscles précis provenant de carcasses LR avec un engagement obligatoire dans la démarche VBF (Viande bovine française) et « 100% » muscle. En effet, chaque muscle autorisé est mentionné en annexe et accompagné du détail du parage. Sont mises en avant les étapes de transformation de la viande hachée : désossage/parage détaillé pour chaque muscle, pré-hachage et hachage avec température (1-2°C) et délai de mise en œuvre (4 h), surgélation avec délais et températures, découpe et conditionnement. Contrairement aux autres CDC portant sur l'ensemble de la production, élevage compris, le CDC LA2901 contient une section dédiée aux « *caractéristiques du produit fini* » : absence de corps étrangers (absence de particules métalliques), caractéristiques visuelles et organoleptiques attendues (grain visible et perceptible, texture aérée, homogène…). Le CDC LA2901 tire donc sa spécificité par rapport aux autres LR du traitement du produit après obtention de la viande, et non de l'obtention de la viande elle-même.

Parmi les 16 CDC gros bovins LR publiés, il en existe trois qui offrent une possible mention fermière : LA0199, LA0386 et LA1693 (Tableau 2.8.6). Les CDC LR ont en effet la particularité de préciser quelques critères dont le respect octroie le droit d'utiliser la mention fermière. Dans le cas des gros bovins, il s'agit de 3 critères : le chargement (inférieur à 1,4 UGB/ha SFP), le type de bâtiment (stabulation entravée seulement en hiver et en finition) et l'autonomie alimentaire (supérieure ou égale à 60%). Ces critères sont présentés comme plus contraignants que les spécifications non-fermières. Pourtant, sur les 3 CDC

offrant une possible mention fermière (LA0199, LA0386 et LA1693), seul 1 CDC oblige réellement à un chargement inférieur à 1,4 UGB/ha SFP, les deux autres CDC reviennent au même seuil que le LR non fermier en autorisant le même chargement que celui autorisé pour les LR non fermiers. Par ailleurs, en production fermière, le recours à la stabulation entravée est restreint puisqu'elle n'est autorisée que pendant la période hivernale et une courte période de finition, qui n'est par ailleurs pas précisée. Or, le LA0199 assouplit ce critère et l'autorise pendant toute la durée de la finition. Quant à l'autonomie alimentaire, deux CDC non fermiers LA1189 et LA1297 mentionnent ce critère et s'engagent à des niveaux équivalents ou plus élevés (60 et 80%) que le seuil fermier.

Tableau 2.8.6 Comparaison des spécifications pour les produits fermiers extraites des cahiers des charges LR gros bovins

Cahier des charge		Critère		
		Chargement	Type de bâtiment	Autonomie alimentaire
Conditions de production communes	Spécification LR non fermier	Sur l'ensemble de l'exploitation, le facteur de densité doit être au maximum de 2 UGB par hectare de SFP (surface fourragère principale).	Différents types autorisés avec surface/dimension minimale précisée (dont stabulation entravée)	-
	Spécification LR fermier	Sur l'ensemble de l'exploitation, le facteur de densité des animaux doit être au maximum de 1,4 UGB par hectare de « surface de fourragère principale » (SFP). Toutefois, un facteur de densité maximum de 2 UGB par hectare de SFP peut être accordé sur justification.	La stabulation entravée n'est autorisée que pendant la phase de stabulation hivernale et une courte période de finition	Les ressources produites sur l'exploitation constituent au moins 60% de l'alimentation des bovins. Les apports extérieurs ne peuvent concerner que les aliments concentrés complémentaires.
CDC avec mention fermière possible	LA0199	NC : idem LR fermier (<1,4 UGB/ha SFP)	La stabulation entravée n'est autorisée que pendant la phase de stabulation hivernale et les 4 mois de la période de finition.	Les ressources produites sur l'exploitation (herbe, foin, fourrages grossiers conservés (fourrages de céréales et de cultures dérobées) représentent au minimum 70% en matière sèche de l'alimentation totale des bovins.
	LA0386	Le facteur de densité est au maximum de 2 UGB/ha SFP.	NC : idem LR fermier (pendant hiver et courte période de finition)	NC : idem LR fermier (>60%)
	LA1693	Le facteur de densité des animaux est au maximum de 2 UGB par ha de SFP destiné au label rouge. Les facteurs agro-climatiques génèrent une production fourragère en qualité et en quantité. Ils permettent de bénéficier à la fois de ressources herbagères pour le pâturage des animaux d'élevage et des cultures fourragères plus intensives : herbe fauchée, mélange céréalier, maïs ensilage… nécessaires pour les rations hors pâturage et les rations d'engraissement.	NC : idem LR fermier (pendant hiver et courte période de finition)	Autonomie fourragère minimale 80%
CDC non fermier	LA1189	-	-	≥ 60% de l'alimentation des animaux du troupeau label est produite sur l'exploitation (hors pâturage).
	LA1297	-	-	Plus de 70% de la matière sèche est produite sur l'exploitation.

Les spécifications des LR fermiers relatives au chargement et à la stabulation entravée ne sont pas appliquées de façon aussi restrictive que prévue dans les conditions de production communes. L'autonomie fourragère attribuée aux LR fermiers ne se révèle pas aussi discriminante puisque d'autres LR non-fermiers se positionnent sur ce critère contraignant. Autrement dit, à partir de la lecture des CDC gros bovins LR, les critères fermiers sont parfois revus à la baisse et moins ambitieux, et parfois non spécifiques aux produits fermiers.

Un autre élément étonnant concerne les CDC ayant le même intitulé mais pourtant basés sur des spécifications très différentes. Ainsi les CDC LA0294, LA1297 et LA1891 sont tous trois intitulés « Viande fraîche de gros bovins de boucherie » et ont pourtant des spécifications qui leur sont propres. Le LA0294 autorise uniquement la race Blanc Bleu (ou croisement), alors que les LA1297 et LA1891 acceptent uniquement les races Blonde d'Aquitaine, Limousine et Bazadaise ; ou encore les LA0294 et LA1297 imposent une finition d'au moins 4 mois, alors que le LA1891 6 mois minimum. Chaque CDC LR est construit par un certain groupement d'acteurs souhaitant se rassembler autour d'un produit de qualité. C'est pourquoi cette variété de CDC et d'intitulé découle de la construction historique des CDC LR au cours de laquelle chacun des acteurs demandaient une reconnaissance de LR d'une même catégorie, par exemple « Viande et abats de gros bovins race X » et donc sous un même intitulé mais avec des critères différents.

En 2000, une précédente analyse comparative des CDC LR gros bovins avait été publiée (Roche *et al.*, 2000). Celle-ci présentait d'une part les éléments de variabilité des spécifications, notamment les caractéristiques de la carcasse (conformation, engraissement, poids) et de l'alimentation (alternance pâture/stabulation, maïs autorisé ou non, ensilage en unique fourrage interdit, finition à l'herbe ou avec fourrage autorisé) : ces éléments étaient très variables selon les CDC considérés. D'autre part, elle signalait que les démarches du LR étaient souvent basées sur une différenciation par la race et la zone de production. Ainsi, parmi les CDC LR alors étudiés, seuls 4 ne spécifiaient pas la zone de production. Actuellement, plus aucun CDC LR ne spécifie une zone de production. Par exemple, le bœuf de Bazas, anciennement sous LR, a été enregistré en 2008 en tant qu'IGP, tout comme le bœuf de Chalosse enregistré sous IGP en 1996 mais qui s'appuie toujours sur les critères LR du LA1891. Il y a ainsi eu une forte modification dans les CDC LR : ceux faisant référence à une zone géographique ont évolué vers une labellisation IGP voire AOP. Le LR s'est donc détaché du lien avec une zone géographique désormais réservée aux AOP/IGP. En revanche, le lien avec les races a été conservé. Cependant, le LR n'intègre pas la notion de race bovine en conservation. Par exemple la race Mirandaise, de type race à viande, décrite comme s'engraissant facilement et réputée pour ses veaux de lait et ses bœufs « nacrés de Gascogne »[8], pourrait faire l'objet d'une étude pour envisager l'intérêt d'un LR (ou d'une IGP), notamment en lien avec les objectifs de préservation de la biodiversité fixés par l'INAO. Cette race a ainsi été enregistrée en tant que Sentinelle par l'association Slow Food, notamment pour faire reconnaître ses « qualités gustatives »[9].

2.8.2.2 Spécifications des LR gros bovins

Les critères de production spécifiés dans les conditions de production communes et les CDC visent à favoriser l'obtention de la qualité organoleptique supérieure annoncée par le LR (Casabianca, 2018). Les critères « parcourent » toute la chaîne de production, depuis le type d'animal (race, type sexuel), les pratiques d'élevage (castration, alimentation dont plan et liste d'ingrédients), les bâtiments et l'environnement de production, les conditions de transport et d'abattage et jusqu'à la transformation de la viande incluse.

Afin d'analyser et comparer les critères de productions LR, trois éléments sont distingués dans le tableau ci-après : i) la description des produits courants de comparaison à la fois dans les conditions de production communes (dans le tableau, l'engagement qualifié de « (commun) » est issu des conditions de production communes) et dans les CDC, ii) les spécifications présentées dans les conditions de production communes et iii) celles spécifiques à chaque CDC. Les critères de ce tableau ont été considérés en suivant l'ordre de la construction des CDC : naissance-sevrage > Fabrication d'aliments > Elevage > Finition > Abattage > Transformation et surgélation > Découpe et conditionnement. Enfin, l'acronyme « NC » correspond à « Non communiqué » et indique par conséquent que le CDC ne dispose pas de spécification particulière sur ce critère, appliquant par défaut la spécification des conditions de production communes. (Tableau 2.8.7)

[8] IDELE. *La race bovine Mirandaise* http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID= workspace://SpacesStore/0dbda9fb-badd-45b8-8e24-d997dd3f9773 [Consulté le 19/06/2019]

[9] Slow Food. *Bœuf mirandais de Gascogne* https://slowfood.fr/wp-content/uploads/ 2017/09/slowfood-sentinelles-slow-food-biodiversite-alimentation-boeuf-mirandais-gascogne.pdf [Consulté le 19/06/2019]

Tableau 2.8.7 Description des produits courants de comparaison et des spécifications issus des conditions de production communes et des CDC LR gros bovins

<table>
<tr><th></th><th>N°</th><th>Critère</th><th>Produits courants de comparaison</th><th>Spécification des conditions de production communes</th><th>Spécifications des CDC</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Type d'animal</td><td>1</td><td>Race</td><td>• Toutes races et croisement de races existantes : viande ou laitière ou mixte (commun + 4 CDC)
• Type racial laitier (7 CDC)
• Bovin de type laitier ou mixte (2 CDC)
• Laitier, majoritairement Prim'Holstein (1 CDC)</td><td>Races à viandes pures et/ou croisement</td><td>• Race pure (une seule race à viande autorisée) : 11 CDC
• Races pures (plusieurs races à viande autorisées) : 2 CDC
• Croisement (croisement autorisé) : 2 CDC
• NC (sans critère supplémentaire) : 1 CDC
Remarque : 1 CDC précise que la race « Blanc Bleu » doit présenter le phénotype culard</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Castration</td><td>• Pas de maîtrise de la castration des mâles : Jeunes Bovins, ou bœufs castration tardive (1 CDC)
• Pas de contrainte (1 CDC)</td><td>Concernant les mâles, seuls les bœufs (castrés) sont labelisables (castration avant l'âge de 12 mois)</td><td>• Age maximal de castration 10 mois : 2 CDC
• NC (sans critère supplémentaire) : 14 CDC</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Sevrage</td><td>• Elevage des veaux: Le mode allaitant n'est pas obligé ou pas de durée minimum fixée pour le sevrage (commun)
• Pas d'âge minimum pour le sevrage (1 CDC)
• Le mode allaitant n'est pas obligatoire (1 CDC)</td><td>L'âge minimal au sevrage est de 4 mois</td><td>• Age minimum de 6 mois : 2 CDC
• Age minimum de 5 mois : 1 CDC
• NC (sans critère supplémentaire) : 13 DC
Remarque : 1 CDC précise que les veaux sont isolés dans un pâturage ou un box spécifique collectif avec accès à la nourriture en même temps que les autres animaux du groupe</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Age à l'abattage</td><td>• Pas de limite d'âge à l'abattage (commun + 2 CDC)
• Mâles pas d'âge maximum imposé, Femelles de 28 mois minimum à 120 mois maximum. (Majorité abattues avant 8 ans et plus de 20% abattues entre 8 et 12 ans) (1 CDC)
• Animaux pouvant être abattus plus jeunes ou plus âgés que dans le cadre du Label (1 CDC)
• Vache de réforme jusqu'à 160 mois et plus (1 CDC)
• 28 à 144 mois (1 CDC)
• Age à l'abattage compris entre 28 et 120 mois (1 CDC)
• La génisse peut être abattue avant</td><td>Mâles de 30 mois minimum
Femelles : 28 mois minimum et 120 mois maximum</td><td>• ajout de critère supplémentaire ou modification : 13 CDC
<table>
<tr><th rowspan="2">Age à l'abattage (mois)</th><th colspan="2">Mâles</th><th colspan="2">Génisse</th><th colspan="2">Vache</th></tr>
<tr><th>Min</th><th>Max</th><th>Min</th><th>Max</th><th>Min</th><th>Max</th></tr>
<tr><td>Conditions de production communes</td><td>30</td><td></td><td>28</td><td></td><td></td><td>120</td></tr>
<tr><td>Minimum</td><td>30</td><td>48</td><td>28</td><td>42</td><td>30</td><td>96</td></tr>
<tr><td>Maximum</td><td>36</td><td>96</td><td>36</td><td>108</td><td>48</td><td>120</td></tr>
<tr><td>Médiane</td><td>30</td><td>50</td><td>28</td><td>96</td><td>33</td><td>120</td></tr>
</table>
• NC (sans critère supplémentaire ou différent) : 3 CDC</td></tr>
</table>

			l'âge de 28 mois. Le bœuf peut être abattu dès 24 mois. (1 CDC) • Pas de minimum, Pas de maximum mais des animaux laitiers usés jeunes quand très intensif. (1 CDC) • Le bœuf peut être abattu dès 24 mois et il n'y a pas d'âge limite pour les vaches. Certaines sont abattues à plus de 15 ans (1 CDC)		
Infrastructure	5	Litière	• Pas d'obligation concernant la litière. Pas d'interdiction des caillebotis intégraux (commun)	présence de caillebotis intégraux interdite. litière végétale obligatoire. Cette obligation peut être levée en zone de montagne lorsque la conception des bâtiments permet d'assurer le confort des animaux et la gestion des effluents (stabulation entravée ou stabulation libre avec logettes). Les stalles et logettes doivent être propres et sèches. Les quantités de paille et/ou autres matériaux formant la litière, ainsi que leur renouvellement doivent permettre à la litière d'être sèche et souple pour assurer un confort maximal aux animaux.	• Litière végétale obligatoire sans exception : 14 CDC • Litière végétale avec exception plus souple en montagne (si aucune production de céréales à paille) : 1CDC • NC (sans critère supplémentaire) : 1 CDC
	6	Type de bâtiments (dont un critère fermier)		- Etable à stabulation entravée : Dimension minimale de la stalle (m) : longueur x largeur : 1,80 x 1,15 - Etable à stabulation libre à logettes : Dimension minimale de la stalle (m) : longueur x largeur 2,50 x 1,20 - Etable à stabulation libre sur litière accumulée : Surface de couchage par UGB (m²) avec un minimum de 3 m² par animal de surface paillée : 6 m² par UGB - Stabulation libre : Largeur minimale de place à l'auge (m) 0,7 m par UGB - Critère restrictif pour les LR fermiers : Stabulation entravée seulement en hiver ou une courte période de finition	• Rallongement de la stabulation entravée possible pendant une courte période de finition à toute la période de finition : 1 CDD fermier • Maintien du critère contraignant fermier : 2 CDC fermiers • NC (sans critère supplémentaire) : 13 CDC non-fermiers
	7	Effectif max/lot d'animaux en finition logés non entravés	• Pas d'obligation concernant le nombre d'animaux par lot en finition (4 CDC) • Atelier en nombre illimité (80-100) (1 CDC)		• Effectif maximum de 30 : 11 CDC • Effectif maximum de respectivement 24/20/14 : 3 CDC • 5 animaux/30m² : 1 CDC • NC (aucun critère supplémentaire) : 1 CDC
	8	Bien-être animal		Les animaux ont accès en permanence à un système d'abreuvement correct et conforme à leurs besoins.	• Accès à l'auge simultanément : 6 CDC, dont 1 avec la mention de couchage suffisant

				Eau de qualité adéquate (eau visuellement propre, sans excréments, claire et régulièrement renouvelée).	• Accent sur le bien-être animal (couchage, manipulation sans stress) : 1 CDC • NC (sans condition supplémentaire) : 9 CDC
	9	Ouvertures (aération, éclairage)	• Pas d'obligation concernant les ouvertures (1 CDC)	Une aération sans courant d'air est maintenue pendant la présence des animaux, soit par une circulation naturelle de l'air, soit, à défaut, par une ventilation mécanique. Le bâtiment dans lequel les animaux sont logés est éclairé par une lumière naturelle pour que les animaux soient bien visibles le jour et un éclairage possible la nuit.	• Dimension des ouvertures détaillées (1/15ème minimum de la surface au sol) : 1 CDC • NC (sans condition supplémentaire) : 15 CDC
	10	Propreté/Entretien Désinsectisation/ Dératisation	• Pas d'obligation concernant le nettoyage des bâtiments (commun)	Les bâtiments d'élevage sont vidés, nettoyés de façon approfondie au moins une fois par an. Les bâtiments d'élevage sont tenus propres et bien entretenus ainsi que les abords et les voies d'accès de la ferme, par souci d'hygiène et d'image.	• Désinsectisation, dératisation : 2 CDC (au moins 1 fois par an, ou après la sortie des animaux) • Voies d'accès en bon état, pas d'écoulement d'effluents : 2 CDC • Intégration paysagère des constructions : 1 CDC • Interdiction d'épandage de boues d'épuration ou industrielles : 1 CDC • NC (sans condition supplémentaire) : 10 CDC
Pâtures	11	Chargement (dont un critère fermier)	• Pas de d'obligation concernant le chargement (commun)	Chargement maximum autorisé : 2 UGB/ha de SFP (Surface Fourragère Principale) 0,30 hectare de prairie par UGB. Critère restrictif pour les LR fermiers < 1,4 UBG/ha SFP	• Restauration du critère LR classique (2 UGB/SFP) : 2 CDC fermiers • Maintien du critère contraignant fermier (<1,4 UGB/ha) : 1 CDC fermier • NC (pas de critère supplémentaire à la notice technique) : 13 (tous non-fermiers)

	12	Durée minimale de pâturage	• Pas d'obligation de pâturage (commun + 3 CDC) • On peut trouver tous les systèmes allant du 0 pâturage au pâturage extensif toute l'année (3 CDC) • Alimentation plutôt en bâtiments avec de l'ensilage de maïs et des concentrés (1 CDC) • Pas de règle précise pour la conduite du troupeau (1 CDC) • Claustration permanente (1 CDC) • Pas de définition de règle précise pour les conditions d'habitat et d'alimentation (1 CDC) • Pas de cycle prairie étable obligatoire et durée de pâturage minimum facultatif (1 CDC)	Respect des cycles traditionnels d'alternance entre pâture et stabulation pendant la durée de leur élevage. Durée de pâturage minimum de 5 mois	• Minimum 6 mois pâturage par an : 11 CDC • Minimum 7 mois pâturage par an : 2 CDC • Minimum 8 mois pâturage par an : 1 CDC • NC (durée de pâturage non modifiée) : 2 CDC, dont 1 CDC avec transhumance obligatoire (4 mois minimum, > 800 m)
	13	Aménagement/entretien	• Pas d'obligation d'abris en plein air (commun)	En fonction des conditions climatiques, la période de stabulation peut être supprimée (plein air intégral). En cas de plein air intégral, les animaux disposent d'abris naturels ou artificiels.	• Précision concernant l'accès à un point d'abreuvement : 3 CDC, dont un qui mentionne l'entretien des sources et des haies. • NC (pas d'indication supplémentaire) : 13 CDC
Alimentation	14	Médication / Aliments médicamenteux		L'utilisation en l'état de matières premières à visée prophylactique ou thérapeutique est interdite.	• Aliments médicamenteux interdits sauf sur prescription vétérinaire pour un usage thérapeutique : 1 CDC • Les antibiotiques hors usage vétérinaire sont interdits dans l'alimentation des bovins : 1 CDC • NC (pas de critère complémentaire) : 14 CDC
	15	Matières premières / Formulation		Matières premières autorisées à entrer dans la formulation des aliments composés du troupeau reproducteur (catégorie selon catalogue européen des matières premières pour aliment des animaux) 1 - grains de céréales et produits dérivés, 2 - graines ou fruits d'oléagineux et produits dérivés, 3 - graines de légumineuses et produits dérivés, 4 - tubercules, racines et produits dérivés 5 - autres graines et fruits, et produits dérivés, 6 fourrages, fourrages grossiers et produits dérivés, 7 autres plantes et produits dérivés, 8 produits laitiers et produits dérivés,	• Liste d'additifs interdits étoffée et détaillée : 15 CDC, • dont 4 CDC précisent également des matières premières et produits interdits (entre autres soja, huile de palme), • dont 1 CDC n'autorise que certains minéraux • dont 1 CDC ajoute une liste positive de minéraux autorisés • NC (pas de condition supplémentaire) : 1 CDC Remarque : 1 CDC annonce les fourchettes à respecter pour les conditions de formulation.

				11 – minéraux et produits dérivés, Dans la catégorie 12- (Sous-) produits de la fermentation de micro-organismes et 13- Divers : seuls quelques éléments sont autorisé Additifs interdits : -Urée - Les produits et additifs d'origine animale à l'exception des produits laitiers	
	16	Fourrage et additifs autorisés	• Toutes les matières premières et additifs de la réglementation sont autorisés Pas d'obligation de se fournir auprès de fabricants référencés (commun + 2 CDC) • Respect de la règlementation en vigueur. Pas de règles spécifiques sur les matières premières utilisées (1 CDC) • Pas d'obligation de définir les matières premières sélectionnées pour l'alimentation des bovins Les fabricants d'aliment ne sont pas obligatoirement référencés, ni les formules d'aliment Les additifs antibiotiques (catégorie A) sont autorisés réglementairement dans l'alimentation des bovins (1 CDC)	Les foins et les ensilages sont parfaitement conservés (absence d'odeur anormale, absence de moisissures). L'ensilage est réalisé sans utilisation d'agents conservateurs chimiques. L'urée est interdite.	• Restriction de l'usage de l'ensilage (« ne doit pas être utilisé en aliment unique », mais type non précisé) : 4 CDC • Liste restrictive (positive) des fourrages autorisés (par ex. foin d'herbe et légumineuse, paille de graminées, céréales, protéagineux, fourrage conserve d'herbe et légumineuse) : 3 CDC • Liste positive d'additifs technologiques autorisés : 1 CDC • NC (sans critère supplémentaire) : 8 CDC
	17	Autonomie alimentaire (= critère fermier)	• Origine de l'alimentation indéterminée (1 CDC)	Critère concernant les LR fermiers : Les ressources produites sur l'exploitation constituent au moins 60% de l'alimentation des bovins. Les apports extérieurs ne peuvent concerner que les aliments concentrés complémentaires.	• Instauration d'un critère d'autonomie (de >50% à >70%) : 4 CDC non fermiers • Autonomie augmentée à respectivement >70% et >80% : 2 CDC fermiers • Maintien du critère contraignant fermier à >60% : 1 CDC fermier • NC (sans critère d'autonomie) : 9 CDC non fermiers

	18	Plan d'alimentation	• Pas obligation concernant le mode d'alimentation (commun +2 CDC) • Aucune obligation quant à l'alimentation (1 CDC) • Ensilage autorisé (1 CDC) • Matières premières incorporées en fonction du coût formule. Soja omniprésent. Pas de matières premières imposées. (1 CDC) • Pas de règles spécifiques concernant les conditions de logement (1 CDC) • Pas de rationnement en fourrage conservés (1 CDC) • Alimentation des animaux définie et contrôlée en élevage : Très variable, souvent à l'ensilage et à l'aliment du commerce. (1 CDC)	Exclusivement selon le mode de conduite de troupeau allaitant. L'alimentation est fortement liée au cycle prairie-étable	Les plans d'alimentation sont répartis entre les différents âges de l'animal (avant sevrage, après sevrage, en finition). • Le lait maternel est prévu à volonté dans presque tous les plans d'alimentation avant sevrage, et ce quelle que soit la période (estivale/hivernale). Il est à noter que 3 CDC rallongent la phase d'allaitement jusqu'au premier hiver ou première année. • Le pâturage est très majoritairement à volonté durant la période estivale, quelle que soit la phase. Quelques conditions supplémentaires peuvent être notées : durée du pâturage 6 mois minimum, pâturage du 10/05 au 10/11. • Les fourrages secs (grossiers ou non) sont globalement à volonté durant les différentes phases, bien que certains CDC limitent l'accès au fourrage sec, plutôt considéré en complément si besoin. • Les fourrages conservés sont autorisés surtout en post-sevrage 2ème année et en finition, principalement en période hivernale, dans les limites imposées. En phase de finition, les indications quant aux fourrages conservés sont très variées, et à adapter selon le sexe, l'âge : entre 6 et 40 kg matière brute, 1 CDC interdit l'ensilage, 1 CDC limite l'ensilage de maïs à 10 kg, un autre interdit les fourrages conservés autre que herbe ou légumineuse. • L'utilisation de compléments et concentrés est autorisée pour tous les CDC quelle que soit la période concernée en post-sevrage et finition. En revanche, comme dans le cas des fourrages conservés, les compléments et concentrés ont des utilisations prescrites très variées durant la phase de finition et qui sont à adapter selon le sexe, l'âge : entre 6 et 18 kg matière brute. Un cas intéressant d'incorporation obligatoire de graines de lin pures en finition était relevé (la finition étant fixée à 60 pour les bœufs et femelles<52 mois ou 100 jours pour les femelles>52 mois).

Finition	19	Type de finition	• Pas d'obligation de finir les animaux (1 CDC)		• A l'herbe ou à l'auge : 11 CDC, dont 3 évoquent la notion de saison • NC pas de critère spécifique : 5 CDC Remarque : 2 CDC précisent les caractéristiques du bâtiment de finition (7 m²/animal minimum, stabulation soit bétonnée soit en herbe).
	20	Durée de finition	• Pas de durée minimale de finition (3 CDC) • Pas de présence minimale sur l'élevage de finition (1 CDC)		• Durée minimale en cas d'auge stricte (1 à 4 mois, médiane 2 mois) : 7 CDC • Durée minimale sans autre commentaire (4 à 6 mois) : 7 CDC • Durée minimale variable selon l'âge des animaux (2 ou 3 mois) : 1 CDC • NC (pas d'indication supplémentaire) : 1 CDC
	21	Aliment interdit en finition	• Alimentation en finition très variable, intensif, ensilage fréquent (1 CDC)		• Ensilage interdit (sans précision) : 2 CDC • Fourrages conservés autre qu'herbe ou légumineuse interdits : 1 CDC • Ensilage, enrubannage et maïs interdits : 1 CDC • Aucune interdiction alimentaire mentionnée : 12 CDC
	22	Traitement	• Délai d'attente réglementaire en cas de traitements médicamenteux ou pour la maîtrise de la reproduction (commun) • Respect des délais de rémanence des médicaments (1 CDC) • Pas de délai d'attente supplémentaire (1 CDC)	Les traitements sont limités aux interventions strictement nécessaires au rétablissement de la bonne santé des animaux et à la maîtrise de la reproduction. Les animaux ne doivent pas être traités pour la maîtrise de la reproduction dans les 6 mois précédant l'abattage. Lorsque le temps d'attente lié à l'administration d'un médicament est inférieur à 15 jours, un délai minimal de 15 jours doit être respecté entre la fin du traitement et l'abattage	• Extension du délai à 30 jours : 1 CDC • NC (pas d'indication supplémentaire) : 15 CDC
Abattage et carcasse	23	Sélection des animaux /Défauts éliminatoires sur carcasses et viandes	• Aucune sélection de carcasse (2 CDC) • Sélection des animaux vivants: tous bovins confondus (1 CDC) • Animaux non sélectionnés/triés à l'abattage (1 CDC)	Les viandes à coupe sombre (à pH élevé) (ou tout autre défaut grave à l'examen visuel de la coupe en particulier), la fibrolipomatose (dégénérescence graisseuse), les pétéchies (purpura), les hématomes, les traces de varon sont éliminatoires.	• Respect des caractères phénotypiques de la race : 1 CDC • Bonne santé des animaux avant départ : 2 CDC Dont 1 CDC : absence de leucose/tuberculose/brucellose • Animaux avec varons écartés : 1 CDC • NC (sans critère supplémentaire ou différent) : 12 CDC
	24	Confort animaux	• Pas de délai maximum pour l'abattage (commun) • Pas de règle concernant le retrait des animaux sales. (1 CDC) • Pas de règle écrite concernant le délai d'attente (1 CDC)	Le délai maximum entre l'enlèvement des animaux, à l'élevage ou au centre d'allotement, et leur abattage est de 24 h Les locaux d'attente sont pourvus de dispositifs d'abreuvement à satiété. Les abatteurs s'assurent du niveau de propreté des animaux.	• Renforcement des critères liés au bien-être animal et au stress (conditions calmes, en douceur, propre avec aération et éclairage) : 15 CDC • NC (sans critère supplémentaire ou différent) : 1 CDC

				Les animaux sales et très sales sont séparés des animaux destinés au label rouge (les animaux classés C et D ne sont pas labellisables).	
	25	Mode de refroidissement	• Pas de règle de prise de températures des viandes. (1 CDC) • Pas de règle de ressuage (1 CDC)	Le mode de refroidissement peut être progressif ou rapide (cold shortening) avec stimulation électrique. Une courbe de descente en température des carcasses doit être établie à l'abattoir. Délai maximal pour atteindre une température à cœur inférieure ou égale à 7°C (la température est prise à cœur dans le faux-filet (Longissimus lomborum) au niveau de la 13ème vertèbre dorsale) = 36 h. La température de la viande ne descend pas à moins de 10°C tant que le pH est supérieur à 6, ce qui correspond à une durée d'environ 10 heures après l'abattage. En cas de mise en œuvre d'une réfrigération rapide, une stimulation électrique efficace est effectuée sur la ligne d'abattage. L'efficacité de cette stimulation est vérifiée en routine par une appréciation de l'installation de la rigidité cadavérique (impossibilité du pliage de l'épaule), et ponctuellement par une mesure de pH (<6,2-méthode de laboratoire) avant l'entrée en réfrigération rapide. La réfrigération rapide doit toutefois éviter la congélation superficielle des carcasses.	• Renforcement du protocole de stimulation électrique (définition d'un protocole particulier, vérification de l'efficacité) : 5 CDC • Refroidissement progressif (stimulation électrique interdite) : 5 CDC, dont 1 CDC qui met l'accent sur le facteur de densité des carcasses permettant la circulation suffisante de l'air • Importance de proscrire la condensation : 2 CDC • NC (sans critère supplémentaire ou différent) : 4 CDC
	26	Classes de conformation autorisées	• Toutes les classes du classement EUROP autorisées (commun +6 CDC) • Conformation: classes R O P (2CDC)	Conformation : E, U, R	• Plus restrictif (« U, R » ou « E,U ») : 3 CDC • Plus spécifique (précise R+ et/ R=) : 3 CDC • NC : 10 CDC
	27	Classes d'état d'engraissement autorisées	• Toutes les classes d'engraissement de 1 à 5 (commun + 5 CDC)	Etat d'engraissement : 2, 3, 4	• Plus restrictif (2 ou 3 seulement) : 5 CDC • Précise les caractéristiques du gras de couverture attendues (couleur +/- blanche) : 1 CDC • NC : 10 CDC
	28	Poids carcasse minimum	• Pas de poids minimum de carcasse (8 CDC) • Le poids moyen des carcasses est inférieur à 300 kg (1 CDC) • Poids de carcasse ≥ 200 kg (1 CDC) • Pas de borne minimum et maximum de poids de carcasse (1 CDC)		Tous les 16 CDC précisent des poids de carcasse minimum à respecter : • Poids de carcasse distingués selon la race ou l'âge de l'animal : 3 CDC Poids carcasse Mâle Génisse Vache (kg) Minimum 320 260 280 Maximum 400 380 400 Médiane 345 300 330

	29	Couleur de la viande	• Couleur de la viande : Classes 1 à 4 (3 CDC)		Tous les 16 CDC précisent la nuance de rouge attendue (vif, franc, voire foncée ou claire) dont : • Référence à la grille de couleur de l'Institut de l'élevage : 3 CDC • Insiste sur l'homogénéité de la couleur : 3 CDC • Précision sur le protocole de mesure de la couleur (coupe, délai…) : 2 CDC • Insiste sur l'exclusion des muscles non conformes : 2 CDC
	30	pH ultime de la viande	• Pas d'exigence sur le pH ultime (commun)	pH ultime inférieur ou égal à 5,8. Le pH est mesuré systématiquement : -Dans le muscle long dorsal au niveau de la 13ème côte-1ère lombaire pour une carcasse entière ou un quartier arrière, - dans la tranche (semi-membranosus) pour une cuisse - dans la noix d'entrecôte (longissimus thoracis) au niveau de la 5ème côte pour un quartier avant.	• Spécification sur le délai pour atteindre le pH requis (48 ou 24h) : 2 CDC • NC (pas de condition supplémentaire) : 14 CDC
	31	Emoussage			• moussage autorisé mais limité (pas excessif) : 6 CDC • Emoussage autorisé : 2 CDC • NC sans commentaire : 8 CDC
	32	Délai de maturation pour les conformations exceptionnelles		Dans le cas des animaux « culards » ou de conformation exceptionnelle classés « E », le délai de maturation peut être réduit sur justification.	• Réduction possible (à 8 jours ou -2 jours) : 3 CDC • Pas de réduction possible : 5 CDC • Aucun commentaire à ce sujet : 11 CDC
	33	Durée minimum de maturation pour les viandes à griller et à rôtir (sauf hampe, onglet, filet)	• La durée de maturation est en général de 3 à 5 jours (commun + 3 CDC) • Pas de durée minimale (1 CDC) • Pas de définition précise de règles de maturation des viandes (1 CDC) • Non précisé et très aléatoire (1 CDC) • Essentiellement animaux de races laitières ou croisés (1 CDC)	10 jours pleins minimum pour la présentation en demi-carcasse ou en quartier et 13 jours minimum pour la présentation en sous-vide. La hampe et le filet n'ont pas de délai de maturation.	• Augmente à 12 jours, voire 14 jours (pour bœufs et femelles de plus de 60 mois ayant vêlé) : 2 CDC • NC (sans autre commentaire) : 14 CDC
	34	Délai de maturation pour les viandes à braiser et à bouillir	• La durée de maturation est en général de 3 à 5 jours (commun + 4 CDC) • Selon les délais d'approvisionnement (2 à 3 jours) (1 CDC) • Pas de durée minimale (1 CDC) • Non précisé (1 CDC)	Pour les viandes à braiser et à bouillir, le temps de maturation est de 2 jours pleins minimum	• Augmentation du délai de maturation (minimum 3 (2 CDC), 4 (11 CDC) ou 5 (1 CDC) jours) : 14 CDC • NC : 2 CDC

	35	Délai d'attente maximum entre l'abattage et la mise en surgélation	• Pas de délai minimum avant la mise en surgélation. DDM (Date de durabilité minimum) : entre 12 et 24 mois. (commun)	Respect du délai de maturation avant la mise en surgélation. DDM : 12 mois. La congélation des découpes de viande et des abats est interdite, seule la surgélation est autorisée. Les découpes de viande et abats sont surgelées par un procédé qui permet d'atteindre une température à cœur de –18°C dans un délai maximum de 6 h	• Précision quant au délai maximum entre abattage et surgélation (13 à 30 jours) : 7 CDC • NC (sans commentaire) : 9 CDC, dont 1 CDC précise l'interdiction de vendre viande décongelée
	36	Conditionnements autorisés			Tous les 16 CDC apportent des précisions sur le conditionnement dont : • Possible sous-vide : 8 CDC, dont 6 CDC mentionnent également l'atmosphère modifiée Remarque : 2 CDC précisent que les opérations de conditionnement doivent être réalisées dans l'établissement de découpe.

Choix du type d'animal : Le LR gros bovin est basé sur des races à viande pures ou issues de croisement entre races à viande ; la viande LR ne provient donc jamais de vaches laitières. Sur les 16 CDC, 11 n'autorisent qu'une seule race à viande. La labellisation LR gros bovins ne concerne que les bœufs (mâles castrés), génisses et vaches (dans une gamme d'âge) ; la viande LR ne provient donc jamais de taurillons ni de taureaux : la castration permet d'améliorer la tendreté de la viande.

Bien-être animal pendant l'élevage : Un intérêt particulier est porté aux bâtiments et à la conduite d'élevage. Le caillebotis intégral est interdit, la litière végétale est obligatoire (exception possible dans 1 CDC en zone montagneuse). Le bien-être animal est nommément abordé : le LR reprend les instructions de la directive (CE) N°98/58 concernant la protection des animaux dans les élevages et portant sur des paramètres comme l'aération/ventilation, l'abreuvement suffisant…[10]; il précise par ailleurs certains points, notamment les dimensions minimales des stalles/logettes ou la densité animale autorisée.

Conduite d'élevage et alimentation : La production des gros bovins LR doit respecter le principe de l'alternance traditionnelle pâture/stabulation. Le chargement est plafonné à 2 UGB (Unité gros bétail)/ha de SFP (Surface fourragère principale), et la durée de pâturage doit être d'au moins 5 mois annuels. Onze CDC augmentent cette durée minimale jusqu'à 8 mois.

L'alimentation occupe une place importante dans les CDC LR. Ainsi, les conditions de production communes fournissent une liste de matières premières autorisées pour l'alimentation. Quinze CDC étoffent et détaillent la liste d'ingrédients et/ou additifs interdits. De plus, chaque CDC développe un plan d'alimentation avant sevrage, après sevrage (1ère puis 2ème année et suivantes) et pour la période de finition, en séparant les périodes estivale et hivernale. Il est à noter que trois CDC donnent une définition de ces périodes, comme détaillé ci-dessous :

CDC	Période estivale	Période hivernale
LA0511	Une période estivale (pâturage) minimum de 8 mois par an, les animaux sont menés au pâturage et consomment de l'herbe à volonté.	Une période hivernale (étable ou pâturage) pour le reste de l'année.
LA1891	En période estivale, les animaux sont en plein air et bénéficient de pâturage à volonté complété de fourrages secs ainsi que d'aliments complémentaires et concentrés.	En période hivernale, les animaux sont en stabulation et bénéficient d'une alimentation composée de fourrages secs et conservés et d'aliments complémentaires et concentrés.
LA2288	Durant les périodes de printemps et d'été-automne, en fonction des possibilités de l'exploitation, l'alimentation devra essentiellement être composée de pâturage de qualité	En hiver, l'alimentation devra essentiellement être composée de fourrages secs et/ou conservés (foin, ensilage,...)

Les jeunes sont allaités, le lait maternel est disponible à volonté. Il est à noter que trois CDC allongent la période d'allaitement jusqu'au premier hiver ou première année. Le pâturage à volonté est très majoritaire durant la saison estivale, quelle que soit la phase de l'élevage (post-sevrage et finition). Les fourrages secs (grossiers ou non) sont globalement distribués à volonté durant les différentes phases et les deux périodes saisonnières, bien que certains CDC limitent l'accès au fourrage sec, plutôt considéré comme complément si besoin. Les fourrages conservés sont autorisés, principalement en période hivernale, dans les limites imposées (en complément ou non).

En phase de **finition**, les indications quant aux fourrages conservés sont très variées, et à adapter selon le sexe, l'âge de l'animal. Certains CDC restreignent l'incorporation d'ensilage de maïs en finition, voire l'interdisent dans un cas. En revanche, bien que le pâturage soit mentionné le plus souvent « à volonté » dans les plans d'alimentation en finition estivale, aucun CDC n'oblige à une finition au pâturage strict. L'utilisation de compléments et concentrés est autorisée pour tous les CDC quelle que soit la période concernée en post-sevrage et finition. En revanche, comme dans le cas des fourrages conservés, les compléments et concentrés ont des utilisations prescrites très variées durant la phase de finition et qui sont à adapter selon le sexe, l'âge : entre 6 et 18 kg matière brute. Un cas intéressant d'incorporation obligatoire de graines de lin pures en finition est à relever dans le LA0386, qui justifie ce critère de la façon suivante : « impact sur le profil lipidique des viandes (apports d'acides gras oméga 3) ». Dans son article, Roche (2000) précisait que la ration de finition était surtout spécifiée par les LR en

[10] Commission Européenne, 1998. Directive 98/58/CE du Conseil du 20 juillet 1998 concernant la protection des animaux dans les élevages. *JOUE L 221 du 08.08.1998, p. 23–27*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/ ?uri=celex%3A31998L0058 Commission européenne, 1998. Directive 98/58/CE du Conseil du 20 juillet 1998 concernant la protection des animaux dans les élevages. *JOUE L 221 du 08.08.1998, p. 23–27*.

lien avec une race et une zone géographique, notamment un CDC requérait une finition à l'herbe entre mai et aout. Suite à la révision des CDC LR gros bovin, l'insertion du pâturage dans la finition est désormais plus générale et moins restrictive.

D'autres éléments importants concernent l'**abattage et les caractéristiques des carcasses et des viandes**. Ainsi les conditions de production communes instaurent un délai maximum de 24 h entre l'enlèvement et l'abattage. La majorité des CDC renforcent le critère de confort des animaux qui respecte la ligne directrice du bien-être animal énoncée dans le Règlement (CE) n°1099/2009[11]: barres de guidage, sans arête vive… Le traitement de la carcasse est également détaillé. Pour le mode de refroidissement et le suivi de la température, les conditions de production communes prévoient la descente à 7°C en maximum 36 h. Toutes les carcasses ne sont pas éligibles pour la labellisation : elles doivent respecter des **seuils minima de conformation d'état d'engraissement**. La gamme de conformation minimum est E-U-R (les lettres EUROP qualifient le classement de la conformation de la carcasse à l'échelle de l'UE, E étant la classe des carcasses au développement musculaire le plus important). Mais 6 CDC sont plus restrictifs (E-U ou U-R ou E-U-R+…). Quant au degré d'engraissement, la carcasse doit être classée entre les niveaux 2 et 4 inclus (5 classes d'engraissement existent, la classe 5 correspondant aux carcasses les plus grasses). Cinq CDC sont plus restrictifs et 1 CDC va même jusqu'à préciser la couleur du gras. Le poids de la carcasse est détaillé par type d'animal (bœuf, génisse ou vache) et propre à chaque CDC, tout comme la couleur de viande (bien que le pH ultime concerne l'ensemble des CDC), autrement dit chaque CDC prend en compte ses spécificités liées aux choix de race, d'alimentation, pour adapter les caractéristiques attendues du produit final. Bien que les « conditions de production communes » ne le mentionnent pas, l'émoussage est autorisé dans 8 cas en grande partie pour préciser que celui-ci doit être adapté à la situation et non excessif.

Au sujet plus précisément de la viande, le **pH ultime** de la viande doit être maitrisé : il doit atteindre 5,8 et être mesuré selon un protocole précis. En outre, 2 CDC indiquent que ce pH ultime doit être atteint en 24 ou 48 h. Enfin comme la plupart des CDC la présentent comme une caractéristique certifiée communicante et justifiant de la qualité supérieure, **la durée minimale de maturation des pièces de viandes** est précisée : 10 jours pour les viandes à griller et 2 jours pour les viandes à braiser/bouillir. Pour comparaison, la norme NF V 46 001 (AFNOR, 1996) – Décembre 1996 « Viande de gros bovins : conditions de valorisation du potentiel de tendreté » (ou équivalent) recommande 10 jours de maturation pour les pièces à griller. A signaler que 2 CDC allongent cette durée. Chaque CDC liste les modes de conditionnement autorisés : 8 autorisent le sous-vide, dont 6 avec atmosphère modifiée.

L'ensemble des critères relatés dans les CDC LR couvre donc toute la chaine de production depuis le choix de la race et du type d'animal (type sexuel, âge), jusqu'au mode (voire au lieu) de conditionnement de la viande, en passant par des engagements sur les conditions d'élevage (bien-être, alimentation, limitation des traitements médicamenteux), de pré-abattage (durée de transport, bien-être animal), le choix des animaux à l'abattoir (tri sur la propreté de l'animal), des carcasses et des viandes qui sont éligibles, les conditions de refroidissement des carcasses (densité de carcasses, mode de refroidissement, température) et la durée de maturation. La construction de la qualité se fait donc à la fois à travers des **choix initiaux** (race notamment), des **engagements quant aux conditions d'élevage et de pré-abattage de l'animal, de refroidissement des carcasses ainsi que de maturation de la viande**, et des **tris successifs** au cours de la chaîne de production (tri au niveau de l'élevage du type d'animal éligible, tri au niveau de l'abattoir des animaux, des carcasses et viandes éligibles).

2.8.2.3 Analyse des spécifications, de leur diversité et de leurs liens avec les 7 propriétés constitutives de la qualité du produit

Le LR est défini par un engagement sur la qualité supérieure et les propriétés organoleptiques des produits. Pour autant, les engagements des CDC LR renvoient à des propriétés à spectre plus large. Le tableau ci-après propose donc une lecture des différents critères des CDC selon les propriétés des produits animaux en lien avec leur qualité.

Si les conditions de production communes établissent un socle commun, chaque CDC peut aller plus loin et être plus qualifiant. Cet élément peut être traduit par le degré de spécification qui correspond au nombre de CDC qui diffèrent des conditions de production communes pour chaque critère. Il permet de caractériser un critère selon qu'il se distingue beaucoup des conditions des productions communes (fort degré de spécification) ou peu (faible degré de spécification). Autrement dit, plus le degré de spécification est élevé, plus le critère considéré a été précisé dans les CDC par rapport aux conditions de production communes, comme détaillé ci-dessous :

- Faible (de 0 à 5 CDC différents des conditions de production communes)

[11] Commission Européenne, 2009. Règlement (CE) n°1099/2009 du Conseil du 24 septembre 2009 sur la protection des animaux au moment de leur mise à mort (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 303 du 18.11.2009, p. 1–30*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32009R1099 Commission européenne, 2009. Règlement (CE) n°1099/2009 du Conseil du 24 septembre 2009 sur la protection des animaux au moment de leur mise à mort (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 303 du 18.11.2009, p. 1–30.*

- Moyen (de 6 à 10 CDC différents des conditions de production communes)
- Fort (de 11 à 16 CDC différents des conditions de production communes)

Un autre indicateur est le degré de diversité qui correspond à la diversité des spécifications pour chaque critère. Il s'attache à préciser si pour un même critère, les CDC présentent des spécifications très variées (fort degré de diversité) ou au contraire très homogènes et similaires (faible degré de diversité). Autrement dit, plus le degré de diversité est élevé, plus le nombre de spécifications différentes est élevé pour le critère considéré, comme détaillé ci-dessous :

- Fort (≥ 5 spécifications/critère)
- Moyen (de 3 à 4 spécifications/critère)
- Faible (≤ 2 spécifications/critère)

Si on analyse le classement selon le degré de spécification, on remarque qu'il y a quasiment autant de critères avec un faible (13 critères) qu'avec un fort degré (14 critères) de spécification. Les critères pour lesquels les conditions de production communes sont globalement considérées comme suffisantes concernent par exemple l'âge à la castration et au sevrage, les aliments interdits, les traitements sanitaires en finition, les défauts éliminatoires de la carcasse, le pH ultime de la viande, la durée de maturation pour les viandes à griller. Ces éléments font donc partie de la construction de la qualité supérieure du produit LR par rapport au produit conventionnel, mais ils ne sont pas des éléments distinctifs de chaque LR. En revanche, des critères comme la race, la durée minimale de pâturage, les plans d'alimentation, les matières premières autorisées ou interdites, le type et la durée de finition, l'âge à l'abattage, les conditions pré-abattage, le poids minimum de la carcasse, ont été renforcés par beaucoup de CDC LR.

Concernant le degré de diversité, la plupart des critères (21) ont entre 3 et 4 spécifications (degré de diversité moyen). D'autre part, 11 critères ont 2 voire moins de types de spécifications : ainsi, peu d'options ont été retenues, ce qui témoigne d'un consensus entre CDC : âge à la castration, pH ultime maximum de la viande ou encore délai de maturation de la viande. Enfin, 4 critères ont un fort degré de diversité (5 ou plus, jusque 16 spécifications différentes par critère) ; il s'agit des plans d'alimentation, de l'âge à l'abattage, de la couleur de la viande (nuance, homogénéité) et du poids minimum de la carcasse, qui ont été adaptés pour chaque CDC en fonction des différences de production (notamment de la race). Cette forte diversité résulte de la variabilité de la construction historique et culturelle de chaque CDC. Un exemple représentatif est l'introduction de graines de lin : le LA 03/86 émis par l'association Bœuf fermier du Maine dans la Sarthe et décrivant la « *tradition de la culture du lin* ». Elle découle également de la construction des spécifications et des choix techniques : une race donnée, a fortiori avec une alimentation spécifique, engendrera des individus dont les caractéristiques à l'abattage seront, elles aussi, spécifiques et à adapter : âge et poids de l'animal pour l'abattage, couleur de la viande.

Les liens entre les spécifications des CDC LR gros bovins et les différents volets de la qualité ont été synthétisés dans un tableau (Tableau2.8.8). Sur les 36 critères repérés, les engagements concernant 21 d'entre eux ont un impact positif sur les propriétés organoleptiques. On note ainsi le lien entre l'engagement pris ou le choix réalisé dans les CDC et la qualité attendue du produit et ce tout au long de la chaîne production. A contrario, 6 critères n'ont pas (âge au sevrage, type de litière, effectif lot) ou peu (âge à la castration, additifs autorisés) d'impact sur la qualité organoleptique. La deuxième propriété la plus concernée par les critères des CDC gros bovins LR est celle de l'image, notamment concernant le bien-être animal, l'entretien du paysage et du territoire et le respect de l'environnement. On peut citer en exemple, l'interdiction du soja dans le CDC LA 22/88 qui renvoie au débat actuel sur cette production et ses impacts environnementaux (OGM, déforestation…), ou encore l'accès au pâturage et l'entretien des infrastructures qui jouent sur le bien-être animal. Quant aux propriétés nutritionnelles, même si elles ne participent pas de la définition initiale, les engagements des CDC peuvent l'impacter, comme la race et l'alimentation avec l'importance du pâturage et de l'alimentation à l'herbe, et aussi la finition, par exemple avec l'obligation d'incorporer des produits à base de graines de lin dans la ration. Il est à noter qu'un seul critère est lié à la propriété d'usage, pourtant mise en avant dans la communication du LR : le type de conditionnement autorisé. En outre, un critère (la castration) pourrait avoir, à terme, un impact négatif sur la qualité d'image, du fait d'un problème d'acceptabilité sociale. Il est possible qu'à l'instar du porc, les engagements des CDC relativement à cette pratique soient amenés à changer.

Les engagements sur les critères ayant un fort degré de spécification ont quasiment tous un impact positif sur les propriétés organoleptiques. Autrement dit, les critères pour lesquels une définition plus fine et plus restrictive est donnée dans les CDC ont un lien direct avec les propriétés organoleptiques qui sont le point crucial pour le LR. Par exemple, les critères des races autorisées ou encore de la durée minimale de pâturage sont beaucoup plus restrictifs. En effet, ces éléments représentent un fort enjeu pour la tendreté, la jutosité et la couleur. De même, les critères présentant un fort degré de diversité ont tous un lien direct avec les propriétés organoleptiques. La propriété organoleptique est ainsi mise en valeur par les critères et les

spécifications des CDC LR. Les exemples de l'âge à l'abattage, des plans d'alimentations du poids de carcasse sont représentatifs : chaque CDC définit ses propres spécifications, et il y a donc autant de profils techniques que de CDC. Or ces critères jouent un rôle important dans la texture et la flaveur de la viande.

Tableau 2.8.8 Degré de spécification, de diversité et liens entre les spécifications dans les CDC et les 7 propriétés conduisant à la qualité de la viande de gros bovins LR

N°	Critère	Degré de spécification	Degré de diversité	Organoleptique	Sanitaire	Nutritionnelle	Usage	Technologique	Commerciale	Image
1	Race	Fort	Moyen	+		+		+	+	
2	Castration	Faible	Faible	+ ou 0		?		0	0	-
3	Sevrage	Faible	Moyen	0				0	0	+
4	Age à l'abattage	Fort	Fort	+		+				
5	Litière	Fort	Moyen	0	?			0		?
6	Type de bâtiments + fermier	Faible	Moyen							?
7	Effectif max/lot d'animaux en finition logés non entravés	Fort	Moyen	0						?
8	Bien-être animal	Moyen	Moyen	+	?					+
9	Ouvertures (aération, éclairage)	Faible	Faible							+
10	Propreté/Entretien Désinsectisation/ Dératisation	Moyen	Moyen		+					+
11	Chargement + fermier	Faible	Moyen							+
12	Durée minimale de pâturage	Fort	Moyen	+		+		+		
13	Aménagement/entretien	Faible	Faible							+
14	Médication / Aliments médicamenteux	Faible	Moyen		+					+
15	Matières premières / Formulation	Fort	Moyen	+	+	+			+	+
16	Fourrage et additifs autorisés	Moyen	Moyen	+ ou 0	+	+				
17	Autonomie alimentaire = fermier	Moyen	Moyen							+
18	Plan d'alimentation	Fort	Fort	+		+				
19	Type de finition	Fort	Faible	+		+				
20	Durée de finition	Fort	Moyen	+				+		
21	Aliment interdit en finition	Faible	Moyen	+		+				
22	Traitement	Faible	Faible		+ ou 0					
23	Sélection des animaux / Défauts éliminatoires sur carcasses et viandes	Faible	Moyen	+	+			+		
24	Confort animaux	Fort	Faible	+	?			+		+
25	Mode de refroidissement	Fort	Moyen	+	+			+		

26	Classes de conformation autorisées	Moyen	Moyen	+/-					+	
27	Classes d'état d'engraissement autorisées	Moyen	Moyen	+		+			+	
28	Poids carcasse minimum	Fort	Fort	+		?			+	
29	Couleur de la viande	Fort	Fort	+						
30	pH ultime de la viande	Faible	Faible	+	+			+		
31	Emoussage	Moyen	Moyen							
32	Délai de maturation pour les conformations exceptionnelles	Faible	Moyen	+						
33	Durée minimum de maturation pour les viandes à griller et à rôtir (sauf hampe, onglet, filet)	Faible	Faible	+						
34	Délai de maturation pour les viandes à braiser et à bouillir	Fort	Faible	+						
35	Délai d'attente maximum entre l'abattage et la mise en surgélation	Moyen	Faible	+	+					
36	Conditionnements autorisés	Moyen	Faible	+			+	+		

Légende du tableau :
+ : impact positif
- : impact négatif
? : impact possible
0 : sans impact
+/- : impact peu important

La figure ci-après retrace des spécifications mises en place au cours des étapes de la chaine alimentaire et dont la succession permet de favoriser l'obtention d'une qualité supérieure du point de vue organoleptique (Figure 2.8.1) : les engagements techniques (alimentation, transport, abattage, maturation), le choix de la race et des animaux labelisables (type sexuel) et le tri des carcasses et des viandes éligibles, conduisent tous à favoriser les propriétés organoleptiques du produit final. De façon plus générale, l'ensemble des CDC gros bovins LR combine des spécifications qui concourent à favoriser la production d'un produit de qualité supérieure, bien sûr du point de vue des propriétés organoleptiques, mais également nutritionnelle (par l'intermédiaire du choix de la race, de l'alimentation et du pâturage), et d'image (alimentation, confort des animaux).

Pourtant, on peut noter certains aspects ne figurant pas dans les CDC. Ainsi la castration qui est obligatoire pour les mâles est prescrite avant l'âge de 12 mois, mais aucune instruction n'est donnée quant à la **méthode de castration** à utiliser. Or, bien que la méthode de castration n'impacte pas la croissance du jeune, elle pourrait influencer le niveau de stress, la castration élastique étant moins stressante que la castration chirurgicale (Bretschneider, 2005). Ainsi, une étude sur la castration des buffles a conclu que la castration avec la méthode Burdizzo (pince à castrer) était moins stressante que la méthode chirurgicale (Martins *et al.*, 2011). Un autre point qui pourrait être soulevé est la composition du pâturage. En effet, dans les CDC LR l'accent est mis les modalités d'alternance pâture/stabulation dans l'alimentation mais la nature de l'herbe pâturée n'est pas spécifiée, alors que Duckett montrait par exemple que l'intensité de la flaveur du bœuf Angus était plus élevée lors de pâturage incluant la luzerne ou du millet qu'en pâturage comprenant plusieurs essences (Duckett *et al.*, 2013). Un critère de biodiversité du pâturage pourrait ainsi être créé sans pour autant devenir trop exclusif. Par ailleurs, le **type de suspension de la carcasse** n'est pas mentionné, alors que la filière s'interroge sur l'adoption de la suspension pelvienne, laquelle favorise la tendreté de la viande (mais requiert un espace supérieur dans les abattoirs ; Bastien (2004)). Enfin, les paramètres de conditionnement sous-vide et sous atmosphère modifiée (délai de mise en œuvre, gaz, procédure…) sont également absents des CDC.

On observe donc qu'effectivement les textes structurant les conditions de production des LR détaillent des spécifications pour les différentes étapes de production/transformation et dont la mise en place par les acteurs (élevage, abattage, conditionnement) amène à l'obtention d'un produit « de qualité supérieure ».

Figure 2.8.1 Spécifications des gros bovins LR mises en place au cours des étapes de la chaîne alimentaire favorisant l'obtention d'une qualité supérieure de la viande bovine du point de vue organoleptique

Etapes de production/transformation

Etapes de production	Type d'animal			Elevage	Pré-abattage	Carcasse			Viande
Critère	Race	Type sexuel	Age à l'abattage	Pâturage	Confort/Bien-être	Conformation	Engraissement	pH ultime	Maturation
Produit courant de comparaison	Tout type de race (laitier, allaitant, mixte)	Tout type éligible	Pas de limite d'âge à l'abattage	Tout type de système (de pâturage zéro à extensif)	Pas de délai d'abattage	Toutes classes : E-U-R-O-P	Toutes classes : 1 à 5	Pas de pH ultime défini règlementairement	3 à 5 jours en moyenne
Conditions de production communes aux LR	Race à viande	Seuls les mâles castrés (bœuf) sont labellisés	Mâles : 30 mois minimum Femelle : entre 28 et 120 mois	Respect du cycle traditionnel pâture/stabulation. Min 5 mois de pâturage /an.	Maximum 24 h entre enlèvement des animaux et abattage	E-U-R	2 à 4	≤ 5,8	Min 10 jours pour les viandes à griller/rôtir et 2 jours pour les viandes à braiser/bouillir
Cahiers des charges spécifiques	Restreint à 1 seule ou quelques races à viande autorisées	Seuls les mâles castrés (bœuf) sont labélisés	Age à l'abattage adapté, voire plus restrictif selon le CDC et ses pratiques d'élevage	Augmente jusque 8 mois de pâturage par an	Conditions d'attente : calme, en douceur, propre avec aération et éclairage	Restreint à E-U ou U-R	Restreint à, voire avec une couleur de gras spécifiée	Délai de 24 ou 48 h pour atteindre ce pH ultime	Augmente jusque 14 jours pour les viandes à griller/rôtir et 5 jours pour les viandes à braiser/bouillir
Propriété Organoleptique de la viande	Couleur, jutosité, tendreté, flaveur	Tendreté (gras)	Tendreté (fibre musculaire), couleur	Couleur (pigment)	Couleur, tendreté (évite pH anormalement élevé)	Peu de lien avec jutosité et flaveur	Tendreté (taux de lipides), jutosité, flaveur	Couleur, jutosité	Tendreté, flaveur

Légende

Tri par individu

Engagement sur le troupeau

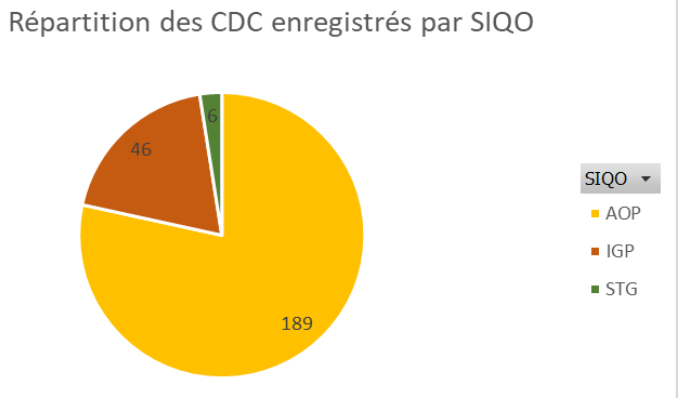
2.8.3 Comparaison des cahiers des charges AOP, IGP, STG : Mise en évidence des arguments qualitatifs et explicitation de leurs liens aux propriétés des produits, à partir de l'exemple des fromages

L'intégralité des CDC du système AOP/IGP/STG européen est disponible sur la plateforme DOOR[12]. Ces CDC sont publiés dans le *Journal officiel de l'Union européenne*, en 3 étapes : introduction de la demande, publication, enregistrement. Les produits sont regroupés par classe, la classe 1.3 correspondant aux fromages. En revanche, il convient de noter que les CDC européens disponibles sur DOOR ne sont pas aussi complets que les nationaux. En premier lieu la base de données extraite de DOOR pour les cahiers des charges enregistrés sous la classe 1.3 sera présentée, puis les résultats d'analyse textuelle de ces CDC disponibles sur DOOR seront détaillés et enfin une comparaison de CDC nationaux des fromages de la région Auvergne-Rhône-Alpes sera proposée.

2.8.3.1 Présentation de la base de données des cahiers des charges des fromages européens sous SIQO

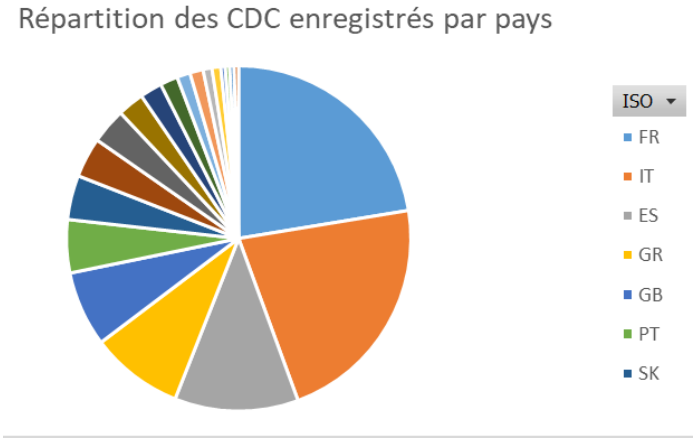
Au total en 2019, 241 fromages étaient enregistrés en tant que AOP, IGP et STG à l'échelle européenne. La très grande majorité de ces fromages (78%) relèvent de l'AOP. Au contraire le signe STG est très peu représenté (2%) (Figure 2.8.2). Cette prédominance de l'AOP est d'autant plus importante si l'on considère les fromages au lait de chèvre, brebis, bufflonne ou mixte par rapport aux fromages au lait de vache. Ainsi, entre 85 et 100% des fromages au lait de chèvre, brebis, bufflonne ou mixte appartiennent aux AOP, contre 70% pour les fromages au lait de vache.

Figure 2.8.2 Répartition des CDC de fromages enregistrés sur la plateforme DOOR selon le SIQO



Les principaux pays contributeurs en terme de fromages AOP/IGP/STG sont par ordre décroissant de références : France (54 références), Italie (53 références), soit chacun 22% des références, suivis par l'Espagne (28 références) et la Grèce (21 références). (Figure 2.8.3)

Figure 2.8.3 Répartition des CDC de fromages enregistrés sur la plateforme DOOR selon le pays



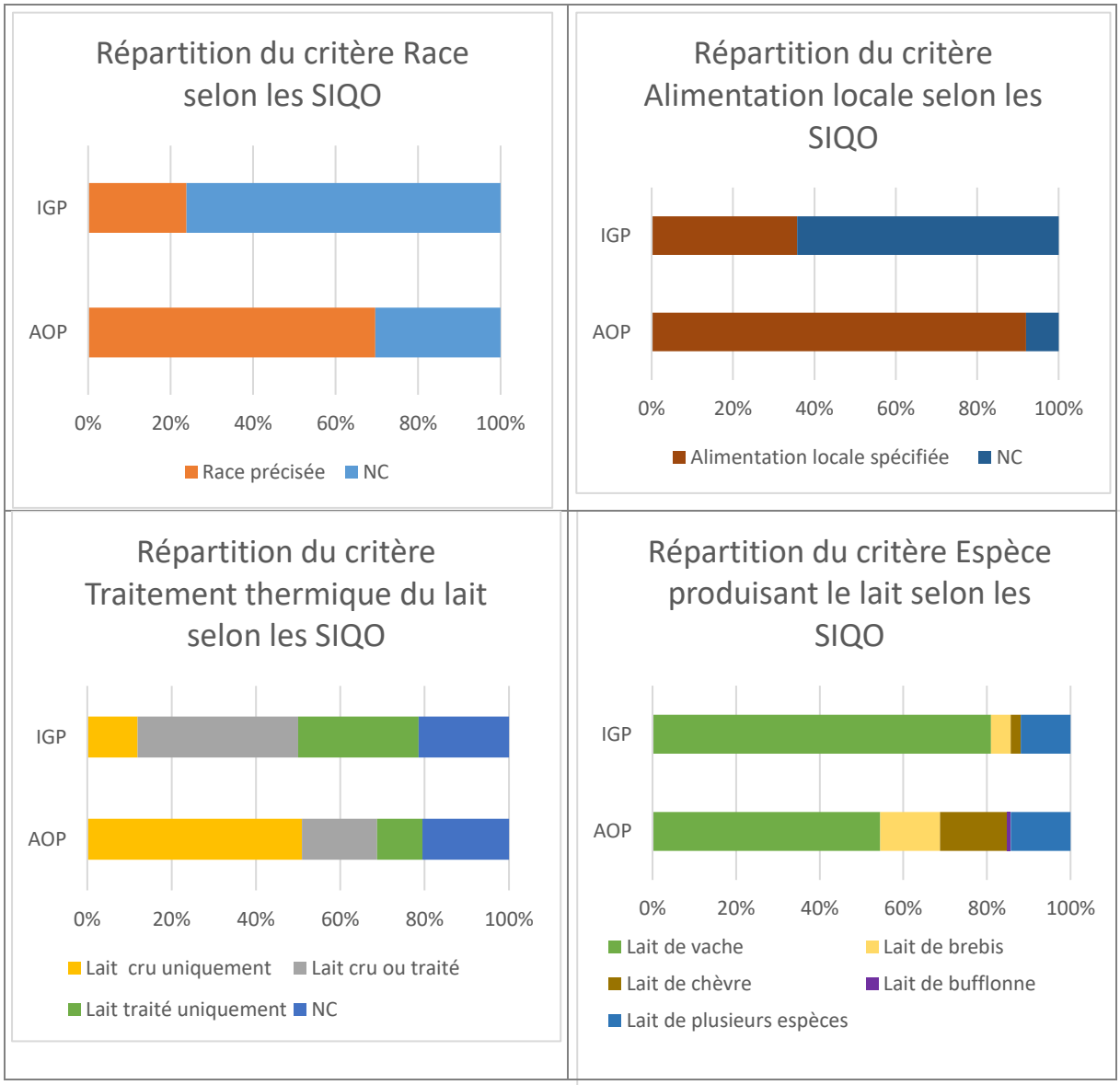
Des spécificités nationales apparaissent également : un tiers des fromages au lait de brebis seul enregistrés se situent en Italie, 60% des fromages au lait de chèvre seul sont français. Quant aux fromages issus de laits mixtes (chèvre+brebis ou

[12] http://ec.europa.eu/agriculture/quality/door/list.html?locale=fr

brebis avec possible vache et/ou chèvre, etc…), ils sont concentrés en Grèce (40%). D'ailleurs, la Grèce est l'un des rares pays (avec le Portugal) où il y a moins de fromages référencés au lait de vache que d'un autre type de lait.

Sur la plateforme DOOR, certains CDC ne sont pas disponibles sous la forme publiée au *Journal officiel* réduisant donc les CDC AOP et IGP accessibles à 154. Si l'on extrait les critères : mention d'une race ou plusieurs obligatoires pour tout ou partie du cheptel, type de lait utilisé (vache, chèvre, brebis, bufflonne ou mixte), alimentation locale requise (exprimée en % de la ration ou à travers le pâturage local), traitement thermique du lait pour la fabrication du fromage, on peut établir les répartitions ci-après (Figure 2.8.4):

Figure 2.8.4 Répartition des CDC de fromages enregistrés et disponibles sur la plateforme DOOR selon différents engagements pour les AOP et les IGP



Se basant sur ces répartitions, on peut remarquer que les fromages AOP recensés ont un profil basé sur la spécification de la race animale et de l'origine de la matière première de la ration animale, et dans une moindre proportion ces fromages mettent davantage en avant le lait cru. Quant aux fromages IGP, la race animale et l'origine de la matière première de la ration sont beaucoup moins spécifiées, en accord avec sa définition règlement qui ne requiert qu'une seule étape parmi la chaine de production et transformation dans l'aire géographique. Concernant le type d'animal, les fromages IGP sont principalement fabriqués à partir de lait de vache, les autres espèces étant très peu représentées dans le registre. Les fromages AOP sont également beaucoup fabriqués à partir de lait de vache, mais les autres espèces sont davantage représentées que pour les fromages IGP et de façon plutôt homogène.

2.8.3.2 Analyse textuelle des cahiers des charges de fromages européens enregistrés

Afin d'objectiver les thématiques sémantiques abordées dans les CDC et de clarifier le lexique et les relations entre les mots (ici appelés formes), une analyse lexicométrique a été réalisée sur le texte extrait des CDC. L'étude porte sur les CDC téléchargés à partir de la plateforme européenne DOOR, publiés au Bulletin Officiel de l'Union Européenne, appartenant à la catégorie 1.3 Fromages (AOP, IGP et STG) et sous le statut « enregistré ». Les CDC ont ainsi été rassemblés en différents corpus de texte : soit l'ensemble des CDC (TOTAL), soit les CDC regroupés par type de SIQO (AOP, IGP ou STG). Les CDC ont également été caractérisés par le pays émetteur de la demande d'enregistrement et par le type de lait (vache, chèvre, brebis et mixte/autre). Deux logiciels ont été utilisés : IRAMUTEQ et Cortext. Sous Cortext, l'analyse Epic bump a été réalisée pour représenter les principales expressions nominales. Sous Iramuteq n'ont été prises en compte que les formes suivantes : noms, verbes et adjectifs (les autres formes comme les adverbes, pronoms, etc. n'ont pas été incluses) et ont été réalisés les tests suivants :

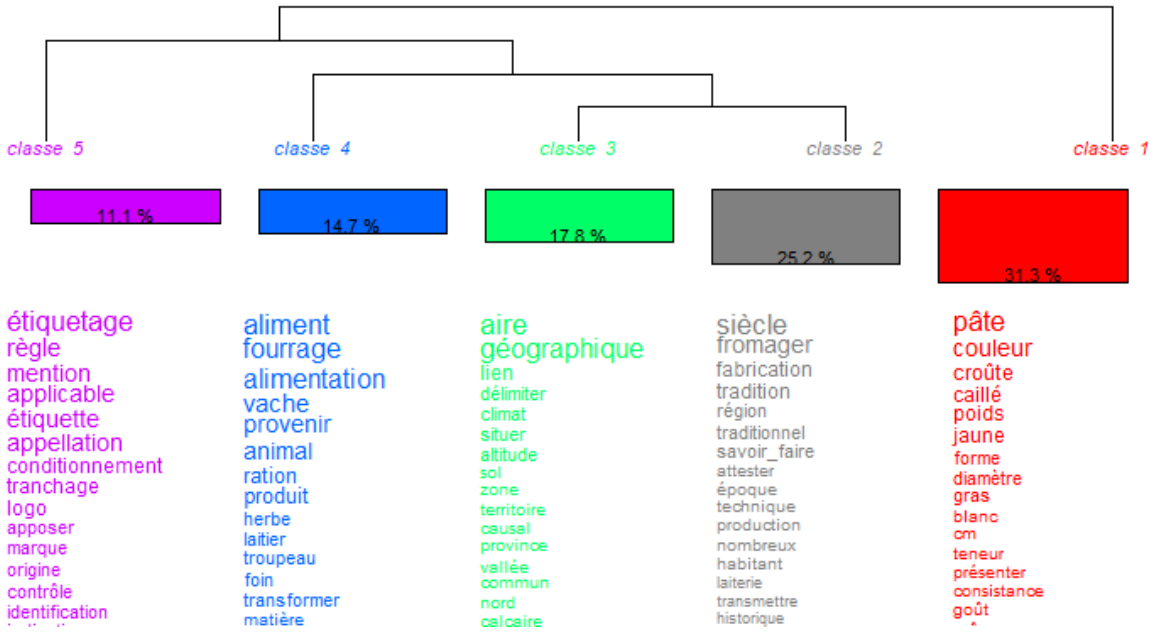
- Nuage de mots qui permet d'identifier les formes les plus présentes dans le corpus,
- Classification selon la méthode Reinert (AFC : Analyse factorielle des correspondances) qui permet d'identifier des groupes thématiques.

Dans un premier temps, l'analyse portera sur les CDC dans leur intégralité de façon à mettre en évidence leur organisation et leur lien aux différentes propriétés identifiées dans cette ESCo. Dans un second temps, les chapitres extraits des CDC et relatifs à la justification de l'usage du SIQO, c'est-à-dire au lien avec l'aire géographique (AOP, IGP) et au caractère traditionnel (STG), feront l'objet de tests de façon à formaliser les éléments mis en avant dans les CDC, leur évolution au cours du temps et la relation entre ces éléments.

Structure générale des CDC fromages

Afin de mettre en évidence les grandes thématiques abordées dans les CDC, la classification selon Reinert des formes du corpus TOTAL des CDC dans leur version intégrale (Figure 2.8.5) aboutit à 5 classes : 1) en rouge - caractéristiques du fromage aussi bien visuelles (couleur) que de texture et de goût ; 2) en gris - histoire avec des références à la forme siècle, mais aussi à la tradition et au savoir-faire ; 3) en vert - géographie incluant aussi des éléments pédoclimatiques ; 4) en bleu - zootechnie qui traite notamment de l'alimentation des animaux (fourrage, ration, foin, pâturage) ; 5) en violet - aspects règlementaires concernant l'étiquetage, les mentions, le logo.

Figure 2.8.5 Dendrogramme obtenu par classification selon Reinert (paramètres : analyse simple sur segments de texte, classes terminales à la pre-mière phase = 10) sur le corpus TOTAL des CDC de fromages dans leur version intégrale (93,82% de segments classés)



Ces grandes thématiques sont fortement influencées par le plan commun des CDC qui impacte les informations données et leur structuration par chapitre. On distingue trois grands types de plans détaillés dans le tableau ci-après (Tableau 2.8.9).

Tableau 2.8.9 Plans utilisés dans les CDC fromages (AOP et IGP) disponibles sur la plateforme européenne DOOR

3. Type de produit 4. Description du cahier des charges a) Nom b) Description c) Aire géographique d) Preuve de l'origine e) Méthode d'obtention f) Lien g) Structure de contrôle (organisme) h) Étiquetage i) Exigences nationales	3. Description du produit agricole ou de la denrée alimentaire 3.1. Type de produit 3.2. Description du produit portant la dénomination visée au point 1 3.3. Matières premières (uniquement pour les produits transformés) 3.4. Aliments pour animaux (uniquement pour les produits d'origine animale) 3.5. Étapes spécifiques de la production qui doivent avoir lieu dans l'aire géographique délimitée 3.6. Règles spécifiques applicables au tranchage, râpage, conditionnement, etc. 3.7. Règles spécifiques d'étiquetage 4. Description succincte de la délimitation de l'aire géographique 5. Lien avec l'aire géographique 5.1. Spécificité de l'aire géographique 5.2. Spécificité du produit 5.3. Lien causal entre l'aire géographique et la qualité ou les caractéristiques du produit (pour les AOP), ou une qualité spécifique, la réputation ou une autre caractéristique du produit (pour les IGP)	3. Description du produit agricole ou de la denrée alimentaire 3.1. Type de produit 3.2. Description du produit portant la dénomination visée au point 1 3.3. Aliments pour animaux (uniquement pour les produits d'origine animale) et matières premières (uniquement pour les produits transformés) 3.4. Étapes spécifiques de la production qui doivent avoir lieu dans l'aire géographique délimitée 3.5. Règles spécifiques applicables au tranchage, râpage, conditionnement, etc., du produit auquel la dénomination fait référence 3.6. Règles spécifiques applicables à l'étiquetage du produit auquel la dénomination fait référence 4. Description succincte de la délimitation de l'aire géographique 5. Lien avec l'aire géographique

Pour reprendre les thématiques à travers le prisme des sept propriétés identifiées dans la présente ESCo, un nuage de mots a été produit à partir du corpus TOTAL des CDC dans leur version intégrale. Il permet de visualiser dans une seule représentation graphique la majorité des formes selon leur fréquence dans le texte (Figure 2.8.6). Pour disposer d'un ordre de grandeur, la forme « fromage » est la plus citée (fréquence = 3 421), et sur les 5 841 formes recensées, 1 662 formes ont une fréquence supérieure ou égale à 10.

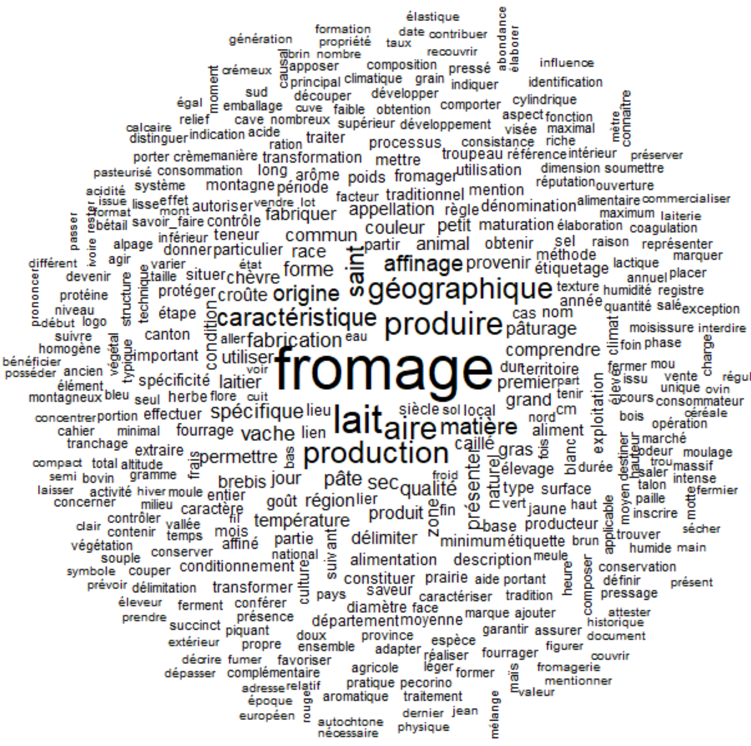


Figure 2.8.6 Nuage de mots du corpus TOTAL des CDC fromages européens AOP, IGP et STG (produit sous Iramuteq, 400 mots, fréquence ≥ 65)

On remarque ainsi que les propriétés organoleptiques et d'image sont parmi les plus représentées : de nombreuses formes avec une fréquence élevée y renvoient (Tableau 2.8.10). Ce constat rejoint celui établi à partir des définitions règlementaires des SIQO. A l'inverse, les propriétés nutritionnelles et surtout sanitaires sont extrêmement peu mentionnées dans les CDC. Il est probable que les propriétés sanitaires étant un prérequis à toute production alimentaire, elles ne fassent pas l'objet d'une attention particulière dans la rédaction des cahiers des charges.

Tableau 2.8.10 Formes et leur fréquence dans les CDC fromages européens AOP, IGP et STG, selon les 7 propriétés

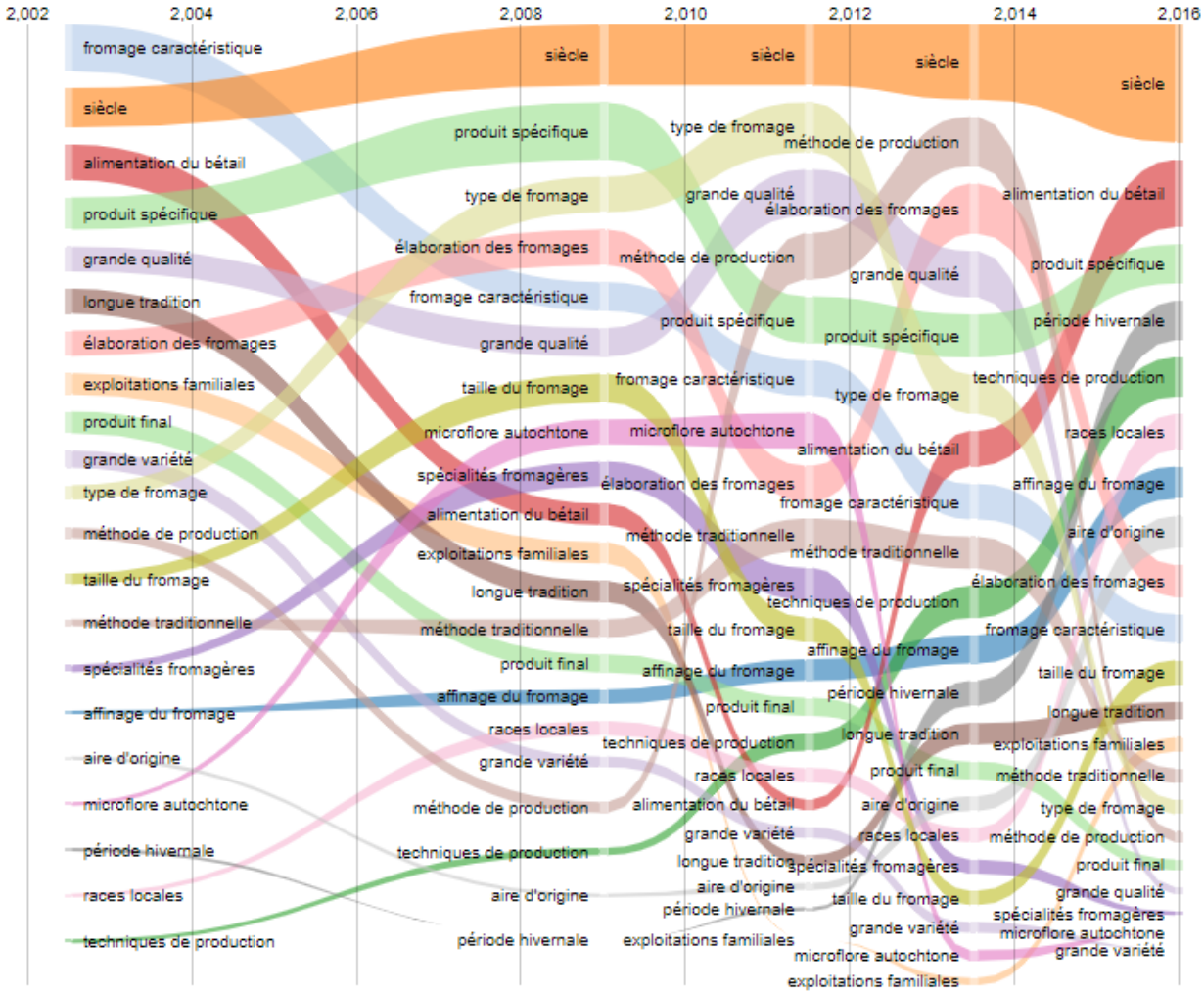
Propriété (ordre de prévalence décroissant)	Prévalence dans le corpus	Exemple de forme et leur fréquence	Localisation dans le plan des CDC
Organoleptique	+++	Pâte 640, couleur 470, croûte 369, goût 331,	Type/Description du produit ; Lien
Image	+++	Origine 715, pâturage 383, traditionnel 301, local 254, montagne 207,	Lien
Technologique	++	Coagulation 102, pressage 89, pasteurisé 77,	Méthode d'obtention
Usage	++	Conditionnement 217, portion 122, tranchage 116	Règles spécifiques […] au conditionnement
Commercial	+	Poids 292, diamètre 184	Type/Description du produit ; Règles spécifiques […] au conditionnement
Nutritionnelle	-	Protéine 103, composition 95 Non présents sur le graphe : oméga 4, lipide 2	Type/Description du produit ; Lien
Sanitaire	-	Non présents sur le graphe : contamination 19, spore 8	Alimentation des animaux ; Règles spécifiques […] au conditionnement ;

Analyse de la justification de l'usage du SIQO, c'est-à-dire le lien avec l'aire géographique (AOP, IGP) et le caractère traditionnel (STG)

Les chapitres des CDC relatifs au lien avec l'aire géographique et au caractère traditionnel ont été extraits des CDC pour faire l'objet d'une analyse lexicométrique afin de mettre en évidence les différents arguments mis en avant dans les CDC. De plus, l'impact des différentes composantes du corpus (S pour SIQO, P pour pays, L pour le type de lait) a été pris en compte.

L'analyse dynamique (selon la date d'enregistrement ou du dernier amendement du CDC) des expressions nominales majoritairement utilisées dans les chapitres relatifs au lien avec l'aire géographique et au caractère traditionnel extrait du corpus TOTAL montre que les thèmes liés à l'histoire (« siècle ») et à l'élevage (« alimentation du bétail ») restent finalement prépondérants, malgré des variations (Figure 2.8.7). De plus, les références à la transformation (« affinage » et « technique de production ») sont plus nombreuses au cours du temps. Fait intéressant, l'expression « races locales » est de plus en plus utilisée. Au contraire, les groupes de mots relatifs aux caractéristiques du fromage (« type de fromage », « taille du fromage », « produit final ») sont de moins en moins recensés.

Figure 2.8.7 Evolution des 100 premières expressions nominales dans le corpus TOTAL entre 1996 et 2018 (Epic bump par le logiciel Cortext, homogeneous distribution - overlopping periods)



Les arguments présentés dans les CDC du corpus TOTAL ont été classés en 4 classes par Iramuteq (Tableau 2.8.11). Un titre a été donné de façon à représenter au mieux la thématique évoquée par chaque classe. La première classe est relative à l'HISTOIRE du fromage (« siècle »), la deuxième à l'ELEVAGE (« prairie »), la troisième à la TRANSFORMATION du fromage (« affinage ») et la quatrième aux conditions PEDOCLIMATIQUES (« climat »). Parmi ces quatre classes, seules les conditions pédoclimatiques et la transformation du fromage sont des éléments présentés à la fois dans les CDC AOP et IGP. A l'inverse, la classe ELEVAGE se retrouve dans le corpus des AOP et non dans celui des IGP ; tandis que la classe HISTOIRE se retrouve dans le corpus des IGP et non dans celui des AOP. Cette répartition fait écho aux définitions règlementaires de chacun de ces SIQO : les AOP s'appuient sur des critères concernant à la fois l'élevage et la transformation, alors que les IGP s'appuient davantage sur leur histoire. Enfin les CDC AOP présentent la particularité d'insister sur la production et les méthodes, tandis que les CDC IGP insistent sur la renommée.

Cette classification permet également d'identifier les composantes du corpus qui participent le plus à chaque classe. Pour les fromages AOP, les CDC émis par l'Italie (P_IT) participent fortement à la classe METHODE, tandis que les CDC émis par la France (P_FR) sont surtout impliqués dans la classe TRANSFORMATION. Pour les fromages IGP, la situation est plus disparate : les CDC émis par la France participent aux classes TRANSFORMATION et conditions PEDOCLIMATIQUES, tandis que les CDC émis par la Slovaquie (P_SK) participent à la classe HISTOIRE. La rédaction des CDC et les arguments privilégiés pour la demande de certification sont ainsi influencés par le pays émetteur de la demande.

Tableau 2.8.11 Classes identifiées dans les chapitres « lien à l'aire géographique » et « spécificité » extraits des CDC fromages européens AOP, IGP, STG, par une classification selon Reinert réalisée sur Iramuteq (classification simple sur segments de texte, 10 classes à la première itération, taille de segments entre 12 et 14) selon le type de SIQO

Corpus	Nombre de CDC	Nombre de classes	% de segments classés	Classe	PEDOCLIMATIQUE		TRANSFORMATION		ELEVAGE		HISTOIRE		METHODE		RENOMMEE			
TOTAL	159	4	72,15	%	19,2		24,9		25,1		30,9							
				Formes et chi²	climat situer calcaire précipitation altitude nord moyenne massif relief sol	239,1 196,2 194,1 188,7 179,7 166,9 160,6 154,5 141,3 136,8	affinage caractéristique processus pâte maturation produire caillé spécifique fromage obtenir	239,0 190,9 179,1 145,7 140,4 131,7 124,9 116,1 101,8 99,8	pâturage prairie alimentation fourrage élevage animal herbe espèce race fourrager	257,8 190,0 187,1 165,9 163,2 158,0 140,9 133,4 124,1 123,6	siècle fromage attester premier époque historique nom marché laiterie fabriquer	276,6 170,4 91,6 82,5 81,6 71,7 71,3 71,3 67,8 61,7						
				Composantes et chi²	*P_FR *S_PDO *L_VBC *L_F *P_SI	43,0 36,4 10,8 4,9 3,7	*P_IT *P_UK *L_V *S_PDO *P_IE	87,8 12,5 4,5 4,5 2,8	*S_PDO *P_FR *L_VC *P_GR *L_C	95,5 17,1 16,4 12,9 11,2	*S_PGI *P_SK *P_DK *S_TSG *P_NL	222,3 104,6 68,9 37,4 31,0						
AOP	112	4	63,99	%	27,6		21,8		28,2				22,4					
				Formes et chi²	situer altitude climat calcaire nord sol sud précipitation massif vallée	130,4 121,2 118,6 108,5 105,7 102,7 94,9 87,1 86,3 83,0	caillé affinage moule fromage pâte entier cuve bois pressé moulage	264,1 135,8 104,3 99,6 93,7 90,0 72,7 71,3 69,0 67,8	élevage race laitier alimentation vache bovin fourrage pâturage ressource exploitation	241,8 171,6 133,8 104,9 93,4 93,0 87,5 85,6 56,6 56,3			produire particulier transmettre caractéristique technique traditionnel méthode fromager fromage arôme	131,2 90,6 84,1 83,5 79,3 77,1 72,5 70,1 69,3 65,1					
				Composantes et chi²	*P_SI *L_F *P_PT *P_FR *L_V	17,0 4,6 3,3 2,3 2,1	*P_FR *L_C *L_VB *P_RO *P_DE	59,3 19,6 3,2 0,4 0,3	*P_PL *P_GR *P_ES *L_VBC *L_BC	8,1 7,9 6,6 1,7 0,9			*P_IT *L_B *P_DE *P_UK *P_IE	67,3 17,3 7,0 5,7 3,4					
IGP	42	4	90,14	%	17,4		33,9				33,6				15,1			

				Formes et chi²	climat herbe sol aire pâturage géogra- phique élevage montagneux précipitation prairie	117,9 106,8 95,4 92,1 81,7 80,0 71,1 62,5 62,5 62,0	affinage pâte caillé permettre goût ferment texture processus caractéris- tique acidité	86,5 61,6 60,6 47,1 44,5 39,8 38,6 36,6 36,0 35,7			siècle land tradition laiterie historique laitier marché producteur époque seul	98,8 28,4 27,9 26,5 26,1 23,6 23,4 23,1 21,6 21,2			concours prix article foire ouvrage publier consacrer remporter édition presse	108,8 97,2 89,2 68,2 66,4 49,8 49,6 45,3 44,2 44,2		
				Compo-santes et chi²	*P_FR *L_VBC *P_ES *P_PT *L_VB	46,2 8,9 8,9 4,5 3,3	*P_FR *P_UK *L_V *S_PGI	50,8 32,8 8,5 0			*P_SK *P_DE *P_NL *P_DK *L_B	41,7 24,7 14,7 13,4 5,6			*P_CZ *P_IT *P_PL *L_VBC *P_ES	46,0 23,7 14,1 4,2 4,2		
Résultats à titre indicatif : Le corpus STG ne comprend que peu de documents et ses résultats ne sont pas tranchés (les classes ne sont pas regroupées par intitulé)																		
STG	5	7	86,84	%	16,7		19,7		12,1		12,1		13,6		13,6		12,1	
				Formes et chi²	siècle peu fromage couleur époque	22,3 10,4 7,5 5,7 5,7	toile donner caillé motte partie	34,3 20,2 15,8 8,4 7,5	forme cœur soleil canard moule	32,9 30,9 30,9 22,8 22,8	berger personne rendre installation constituer	33,8 30,9 30,9 15,8 8,8	fabrication méthode montagneux slovaque traditionnel	28,4 22,1 22,1 17,4 15,8	fabriquer partir document pouvoir lait	50,1 34,3 13,6 9,9 8,5	letton fête mater boire vie	39,2 30,9 30,9 22,8 22,8
				Compo-santes et chi²	*P_LV *L_V	2,7 2,1	*P_SE *P_IT	4,8 1,0	*L_V *P_LV	1,3 1,1	*L_B *P_SK	7,1 7,1	*L_B *P_SK	5,4 5,4	*L_B *P_SK	0,5 0,5	*P_LV *L_V	18,2 11,6

2.8.3.3 Comparaison des cahiers des charges de fromages nationaux Auvergne-Rhône-Alpes

L'étude présentée dans cette partie porte sur les CDC nationaux des fromages AOP et IGP de la région Auvergne-Rhône-Alpes disponibles et publiés au *Bulletin officiel du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation*. L'objectif est d'observer et comprendre la construction de ces CDC à travers les choix en terme de spécifications et d'analyser leurs liens avec les propriétés du produit fini, en l'occurrence le fromage. La liste ci-dessous présente les fromages considérés pour l'étude, classés par volume commercialisé sous IG décroissant[13]. Il est à noter que le fromage Salers AOP ne disposait pas de CDC publié dans le Bulletin officiel disponible et n'a donc pas été intégré dans l'étude.

Reblochon	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015c)
Cantal	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2019)
Saint Nectaire	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a)
Tomme de Savoie	Vache	IGP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017g)
Fourme d'Ambert	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014a)
Beaufort	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015a)
Bleu d'Auvergne	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017d)
Abondance	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018b)
Emmental de Savoie	Vache	IGP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017f)

Saint Marcellin	Vache	IGP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014e)
Tome des Bauges	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015d)
Fourme de Montbrison	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014c)
Picodon	Chèvre	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016a)
Bleu de Gex	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014d)
Bleu du Vercors	Vache	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017e)
Rigotte de Condrieu	Chèvre	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2013)
Chevrotin	Chèvre	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015b)
Charolais	Chèvre	AOP	(Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014b)

L'analyse des CDC fromages AOP/IGP portera d'une part sur les spécifications et leur importance en terme de nombre de CDC concernés, et d'autre part sur les liens entre chaque spécification et les sept propriétés des produits animaux considérées dans cette ESCo (Tableau 2.8.12). Pour plus de clarté, les spécifications (hors NC, NC signifiant Non communiqué) indiquées dans le tableau sont présentées de la plus citée à la moins citée dans les CDC. Les spécifications considérées sont issues de la section « Description de la méthode d'obtention du produit » de chaque CDC. Bien que cette section soit de structure similaire entre les CDC, il n'existe pas de structure unique ou de critères communs établis. Les spécifications ont donc été regroupées de façon logique et par analogie, mais les disparités entre CDC ne permettent pas d'avoir un regard vraiment exhaustif sur l'ensemble des spécifications. Quant au lien entre la spécification et les propriétés des produits animaux (+, - ou +/- dans le tableau), il est défini par rapport à la spécification la plus citée au sein du corpus de CDC (hors NC).

Descriptions des CDC et des spécifications

Les CDC fromages AOP/IGP d'Auvergne-Rhône-Alpes sont construits selon le même plan : les spécifications sont rédigées en suivant le déroulé de la production : partant du type d'exploitation, de ses caractéristiques et de celles du cheptel, l'élevage et la production du lait sont décrits à travers la ration (dont le pâturage), la fumure et les conditions de traite. Ensuite, après la collecte et le stockage du lait, les phases de transformation sont détaillées (ingrédients, ensemencement/emprésurage, moulage, pressage, salage, affinage), enfin le détail de la conservation et du conditionnement du fromage.

Concernant l'exploitation, des CDC (tous AOP) se positionnent en tant que production non-conventionnelle en interdisant le hors-sol (5 CDC) ou la stabulation/claustration permanente (4 CDC). De manière plus confidentielle, certains CDC (4 sur 18) instaurent également des limites maximales de production. Neuf CDC restreignent le chargement global autorisé. Un élément intéressant concerne le type de cheptel. Les AOP et IGP construisent leur identité sur le lien au terroir, ainsi à l'exception

[13] INAO, Mémento 2016, Observatoire des IG en Auvergne-Rhône-Alpes. https://www.inao.gouv.fr/Nos-actualites/Les-Indications-geographiques-IG-d-Auvergne-Rhone-Alpes-en-chiffres

de 3 CDC AOP, tous les autres caractérisent leur cheptel : soit à travers la race, soit à travers l'origine géographique des animaux, mais ces deux critères ne sont jamais concomitants. Il est important de préciser que dans chaque CDC, une section distincte délimite un territoire précis (liste des communes fournies) pour la production du lait, du fromage, l'affinage voire la conservation et/ou le conditionnement. Rappelons que l'ensemble des étapes d'un fromage AOP doit avoir lieu dans la zone géographique, alors que seule une partie des étapes de production de l'IGP doit obligatoirement se réaliser dans la zone. L'obligation d'utiliser des « vaches et génisses nées et élevées sur l'aire géographique » vient donc en complément de la requête initiale de production territorialisée. Pour autant, le lien entre naissance dans un territoire donné et caractéristique du produit fini n'est pas l'élément le plus déterminant en comparaison du lien entre élevage dans un territoire donné et caractéristique du produit fini. On peut alors émettre l'hypothèse que l'instauration de ce critère résulte de la construction de CDC dans des territoires dépourvus de race laitière autochtone ou emblématique, mais souhaitant malgré tout marquer un lien territorial.

Une grande partie des engagements au niveau de l'élevage porte sur l'alimentation des animaux. L'herbe et le pâturage y prédominent : tous les CDC mentionnent « une ration à base d'herbe et de fourrage » et 12 CDC requièrent une durée annuelle minimale de pâturage (de 120 à 180 j/an). Les spécifications relatives aux ensilages, aux aliments complémentaires et aux concentrés sont également très représentées dans les CDC : 10 CDC interdisent l'ensilage de maïs, 10 interdisent l'ensilage d'herbe et 16 imposent une limite quantitative pour l'utilisation des aliments complémentaires. Les autres points relatifs à l'élevage se rapportent à la fumure et à la traite. La fumure, ou épandage des matières fertilisantes, est un critère commun à tous les CDC : certains CDC limitent la fertilisation minérale (4/18), d'autres listent les fumures organiques autorisées (11 CDC). Enfin, les modalités de traite sont souvent abordées, en terme de planning à respecter (6 CDC) et d'hygiène (4 CDC). Il n'est en revanche jamais fait mention explicitement de « robot de traite ». Son interdiction peut être sous-entendue, par exemple par l'obligation de prévoir 8 heures entre la traite du matin et du soir alors que la traite automatique implique des fréquences de traite moins maitrisées, mais ce thème n'est pas abordé en tant que tel.

Pour la production fromagère, les CDC abordent : équipement, ingrédients et étapes de transformation. Concernant le traitement thermique du lait, 10 CDC n'autorisent que du lait cru : tous ces CDC sont AOP, excepté l'Emmental de Savoie (IGP) et concernent les quatre fromages au lait de chèvre. Par ailleurs, 8 CDC interdisent des appareils de traitement thermiques. De même, tous les CDC donnent des indications quant aux ingrédients autorisés (présure, ferments, chlorure de sodium et de calcium, colorants …). Le diagramme de fabrication est explicité dans chaque CDC, avec ses étapes et ses particularités, chaque fromage résultant d'un mode de fabrication propre (température, durée, tranchage ou non du caillé, pressage ou non, etc). En accord avec la définition des produits AOP et IGP en lien avec leur typicité, 6 CDC mettent en avant la spécificité de leur production : par les levains choisis, le type de moule ou encore la maturation et l'affinage. L'affinage est une étape cruciale pour la transformation : sa durée et ses conditions (température, hygrométrie) sont précisées. On peut en revanche remarquer que le CDC du Saint Marcellin AOP laisse l'opérateur libre de faire valoir son savoir-faire et donc de gérer la durée de l'affinage selon son expérience. Enfin le type de conditionnement est indiqué dans certains CDC : Abondance AOP, Reblochon AOP, Chevrotin AOP, dont 2 CDC précisent qu'il s'agit de fromages pouvant être vendus individuellement au consommateur. Mais cela ne représente pas un critère majoritairement précisé, malgré son importance pour la distribution.

Description du degré de précision des critères

Afin de caractériser les critères extraits des CDC, on peut appliquer un classement basé sur leur degré de précision qui correspond au nombre de CDC présentant une spécification pour un critère :

- Fort (Nombre de CDC présentant cette spécification = de 13 à 18 / NC = de 0 à 5 CDC)
- Moyen (Nombre de CDC présentant cette spécification = de 7 à 12 / NC = de 6 à 11 CDC)
- Faible (Nombre de CDC présentant cette spécification = de 1 à 6 / NC = de 12 à 18 CDC)

En d'autres termes, il s'agit de caractériser l'implication des CDC sur un critère précis et dans quelle mesure il a été considéré par les acteurs que ce critère devait être spécifié dans le CDC : plus le degré de précision d'un critère est élevé, plus ce critère a fait l'objet de spécifications dans les CDC. Les critères sont répartis en quantité peu ou prou équivalente entre les 3 classes de degré de spécification, seuls les critères de degré de précision moyen sont un peu plus représentés (37% des critères). Les critères extraits des CDC s'appuient donc en proportion similaire sur des critères génériques, partagés par le plus grand nombre de fromages AOP et IGP, et sur des critères plus spécifiques qui leur sont propres.

En revanche, la répartition des critères entre ces différentes classes de précision varie selon la catégorie de critère considérée. Les critères liés au type d'exploitation et de cheptel sont peu concernés par un fort degré de précision (1/5 critères) à l'exception du chargement. Au contraire, les critères liés à l'alimentation des animaux (pâturage, ration) se trouvent dans la catégorie à fort degré de précision (8/11 critères). Quant aux critères relatifs à la fumure, ils présentent un degré de précision moyen (3/4 critères). Tout ce qui se réfère à la traite et à la collecte du lait ne fait pas l'objet de beaucoup de précisions (fort degré de

précision pour seulement 1/6 critères). La majeure partie des critères liés aux étapes de transformation fromagère (ensemencement, pressage, maturation…) relève de degré de précision moyen (10/20 critères). Mais surtout, les critères de l'affinage sont toujours fortement précisés dans les CDC (tous les critères ont un fort degré de précision), alors que les critères de traitement du produit fini (report, conservation, conditionnement) ne sont pas fortement précisés par l'ensemble des CDC (aucun critère avec un fort degré de précision).

On peut donc distinguer une gradation selon les différentes classes de degré de précision. Tout d'abord, cette analyse montre que les CDC sont majoritairement construits à travers l'alimentation des animaux et l'affinage c'est-à-dire les types de critères davantage concernés par un fort degré de précision. Il s'agit du socle de critères en communs à ces CDC. Cette constatation est à relativiser par le fait que ces CDC proviennent de la même région française, et que leur construction peut ainsi avoir des similarités liées à des convergences culturelles régionales. Ensuite les critères liés à la fumure et à la transformation fromagère se placent principalement dans la classe de degré de précision moyen. Enfin, les critères de type d'exploitation et de cheptel, de traite et collecte du lait, de traitement du produit fini ne sont pas systématiquement abordés dans le CDC et correspondent à des spécifications plus anecdotiques, conférant des particularités supplémentaires à chaque fromage.

Certains cas particuliers apparaissent à la lumière du classement par degré de précision : les critères pour lesquels tous les CDC émettent des spécifications (quand NC = 0). Ils sont au nombre de sept : Ration de base, Complémentaires et concentrés, Alimentation provenant de l'aire géographique, Traitement thermique du lait, Ingrédients, Type du sel/saumure, Conditions d'affinage. Ces critères correspondent à des éléments induisant de la typicité au produit : en particulier grâce à l'alimentation à base d'herbe/fourrage et provenant de l'aire géographique, à l'interdiction de traitement thermique du lait, ainsi qu'à la liste limitée d'ingrédients et aux conditions d'affinage (durée, température, hygrométrie). Ces éléments étant essentiels dans la construction de l'identité du fromage, ils ont logiquement des liens positifs plus nombreux avec les différentes propriétés étudiées (en moyenne 3.6 liens positifs par critère).

Impact des spécifications

Il est en effet possible de recenser les différents liens entre les engagements des CDC fromages AOP/IGP de la région Auvergne-Rhône-Alpes et les propriétés identifiées pour les produits animaux (organoleptique, sanitaire, nutritionnelle, usage, technologique, commerciale, image), que ce soit d'ordre général, par rapport au degré de précision et/ou aux différentes propriétés (Tableaux 2.8.12 et 2.8.13). Au préalable de cette analyse, il est important de préciser que les effets envisagés ne sont pas pondérés les uns par rapport aux autres : nous n'avons pas considéré de hiérarchie entre chaque lien, mais seulement l'existence ou non d'un effet. De plus, la formulation et le regroupement des engagements sous des critères, ainsi que la distinction des propriétés des produits animaux en sept dimensions distinctes correspondent à des choix et donc à une analyse à travers un prisme pouvant être repris et modifié.

La très grande majorité des effets identifiés correspondent à des liens positifs entre l'engagement des CDC et les propriétés : 84% des effets recensés sont des liens positifs (« + » dans le tableau). On note que certains engagements (10% des effets recensés) induisent des effets qui ne sont pas tranchés ou contrastés (« +/- » dans le tableau) : ils peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs, ou alors des effets très légers ou pouvant varier selon la situation. Le critère du traitement thermique du lait se doit par exemple d'être nuancé dans ces effets : en effet, le lait cru peut avoir un rôle soit protecteur soit délétère pour la santé. De façon plus anecdotique (entre 1 et 4% des effets recensés), certains engagements ont des effets négatifs (« - » dans le tableau) : l'instauration de pâturage peut ainsi augmenter les risques de contamination, l'interdiction de l'ensilage joue négativement sur les propriétés technologiques du lait lors de la transformation fromagère, et l'autorisation du report, bien que marginal peut avoir des effets indésirables sur les propriétés organoleptique, sanitaire et d'image. La présence de lactosérum dans la ration, et notamment sa provenance, est très souvent indiquée dans les CDC, mais les effets réels de ces spécifications sont incertains (« ? » dans le tableau). Enfin il est à noter que la fréquence de traite n'a pas réellement d'effet sur les propriétés organoleptiques du lait (« 0 » dans le tableau).

On remarque que les critères classés avec un fort degré de précision ont en moyenne plus d'effets positifs sur l'ensemble des propriétés que lorsqu'ils ont un degré de précision moyen ou faible (2.8 versus 2.0 et 2.2). Autrement dit, les critères repris par la plupart des CDC correspondent à des spécifications avec de plus nombreux effets positifs sur les propriétés du fromage. Si l'on se penche sur le lien entre les effets des engagements et les différentes propriétés, on remarque que les principales propriétés touchées par les engagements des CDC AOP/IGP sont par ordre décroissant : organoleptique (76% des critères ont un impact positif sur cette propriété), puis technologique et d'image (respectivement 59 et 44%). Cette hiérarchie est identique à celle obtenue par l'analyse du CDC Prosciutto di Parma AOP, et similaire à celle du CDC Jambon de Bayonne IGP (qui mettait aussi en avant les propriétés nutritionnelles du jambon sec). Quel que soit la classe de degré de précision considérée, ce trio reste prédominant et toujours avec les propriétés organoleptiques majoritaires.

En conclusion, les engagements de l'ensemble des CDC de fromage AOP/IGP de la région Auvergne-Rhône-Alpes couvrent l'ensemble de la chaine de production, en mettant particulièrement en avant l'alimentation des animaux et les modalités d'affinage qui correspondent aux critères communs aux CDC. On remarque que la très grande majorité des effets sont positifs sur les propriétés des produits animaux, et qu'ils touchent principalement les propriétés organoleptiques, puis technologiques et d'image.

Tableau 2.8.12 Spécifications des CDC fromages AOP/IGP d'Auvergne-Rhône-Alpes, leur degré de précision et leurs liens avec les propriétés des produits animaux

Etape	N°	Critère	Spécifications	Degré de précision	Organoleptique	Sanitaire	Nutritionnelle	Usage	Technologique	Commerciale	Image
Exploitation	1	Habitat du cheptel	Hors-sol interdit : 5 Stabulation/Claustration permanente interdite : 4 NC : 11	Moyen		+ l'interdiction du hors-sol évite la concentration qui pose problème	+ (pâturage)				+ l'interdiction du hors-sol prévient l'image négative de l'élevage intensif
	2	Taille d'exploitation	Production limitée (5 000 Kg/vache/an, 6 000 Kg/vache/an, 800 Kg/chèvre/an, 7 000 L/ha/an) : 4 NC : 14	Faible		+ le seuil de production maximal limite intrants et effluents					+ le seuil de production maximal limite intensification production
	3	Chargement	Chargement global limité (entre 1 et 1,5 UGB/SAU) : 9 Surface pâturage requise (10, 20, 30 ares ou 1 ha/animal) : 6 Surface minimum/chèvre (bâtiment, pâture) : 4 NC : 4	Fort		+ le chargement encadré permet de limiter effluents					+ le chargement encadré limite intensification production
Cheptel	4	Race	Race(s) exclusives : 9 % race requis : 6 NC : 6	Moyen	+ la race joue sur la qualité du lait		+/- la race a un léger effet sur les profils d'AG et les vitamines		+ la race joue sur la transformation fromagère		+ s'appuie sur la réputation de certaines races
	5	Origine des individus	Provenant de l'aire géographique : 3 NC : 15	Faible							+ s'appuie sur la réputation de certaines races et leur lien à la région
Pâturage	6	Durée de pâturage	Durée minimum requise (120 à 180 j/an) : 12 Pâturage selon conditions (climatiques, enherbement) : 3 NC : 3	Fort	+ le pâturage impacte la couleur, flaveur	- le pâturage présente des risques de contamination	+ le pâturage améliore le profil d'AG et la teneur en antioxydants		en cas de pâturage: + coagulation lente mais ferme - teneur du lait en Ca réduite		+ image positive du pâturage

	7	Type de prairie	Composition de prairie précisée : 4 NC : 12	Faible	+ diversité de praire joue sur la texture et saveur		+ diversité de prairie joue sur profil AG				+ image positive du pâturage et de la biodiversité
Ration	8	Ration de base	A base d'herbe/fourrage : 18 Composition (%) minimum requise : 12 Saisonnalité mentionnée : 11 NC : 0	Fort	+ la ration à base d'herbe/fourrage impacte couleur, flaveur	+/- risques de contamination et parasitisme avec l'accès au pâturage, moins présent avec les fourrages	+ la ration à base d'herbe/fourrage améliore le profil AG et la teneur en antioxydants		ration à base d'herbe/fourrage: + coagulation lente mais ferme - teneur du lait en Ca réduite		+ image positive du pâturage
	9	Crucifère	Interdit en fourrage : 4 NC : 14	Faible	+ l'interdiction des crucifères évite leur effet délétère sur le goût						
	10	Affouragement en vert	Autorisé : 9 Distribution et hygiène précisée : 8 Interdit : 2 NC : 7	Moyen	+ effet similaire au pâturage		+ effet similaire au pâturage		+ effet similaire au pâturage		
	11	Ensilage (herbe)	Ensilage d'herbe interdit (ou non autorisé) : 10 Conditions de stockage à suivre : 10 Ensilage d'herbe autorisé : 6 dont caractéristiques autorisées spécifiées : 2 NC : 2	Fort	+ interdiction de l'ensilage évite son effet délétère sur le goût	+ interdiction de l'ensilage limite les risques de contamination	+ interdiction de l'ensilage améliore le profil d'AG		- ensilage augmente la teneur protéique et donc la coagulation		+ image d'intensification liée à l'ensilage
	12	Ensilage (maïs)	Ensilage de maïs interdit (ou non autorisé) : 10 Conditions de stockage à suivre : 10 Maïs grain/épi humide autorisé : 5 Ensilage de maïs autorisé : 3 dont caractéristiques autorisées spécifiées : 2 NC : 1	Fort	+ interdiction de l'ensilage évite son effet délétère sur le goût	+ interdiction de l'ensilage limite les risques de contamination	+ interdiction de l'ensilage améliore le profil d'AG		- ensilage augmente la teneur protéique et donc la coagulation		+ image d'intensification liée à l'ensilage de maïs
	13	Complémentaires et concentrés	Complémentaire en quantité limitée (max 1 800 Kg/vache/an, 390 Kg/chèvre/an etc…) : 16 Liste positive de concentrés autorisés : 9 NC : 0	Fort	+ nature et proportion des concentrés peuvent impacter le goût		+ la restriction des concentrés évite leur impact négatif sur le profil en AG		+ limitation des concentrés préserve le TB		+ + image d'intensification liée aux concentrés

	14	Lactosérum	Lactosérum doit être issu de l'exploitation : 11 Lactosérum autorisé sans restriction : 3 Délai de 24h pour utiliser le lactosérum : 3 Comme aliment liquide : 2 Pour abreuvement uniquement : 1 NC : 2	Fort	?	+ délai d'utilisation limité permet de limiter l'acidification et troubles digestifs	?		?		
	15	Alimentation de l'aire géographique	Fourrage/Fourrage grossier essentiellement de l'aire : 11 Ration/Foin/Fourrage/Fourrage grossier exclusivement de l'aire : 7 NC : 0	Fort	+ la provenance locale renforce le lien au terroir						+ image du lien au territoire
	16	Alimentation transgénique	Alimentation transgénique interdite : 16 NC : 2	Fort							+
Fumure	17	Apport de fumure minérale	Apport de fumure minérale limitée (33,5 à 60 unité/ha/an) : 4 NC : 14	Faible	+/- joue indirectement sur la flore des prairies	+ limite risque de contamination					+ sensibilité des citoyens aux effluents
	18	Origine des fumures organiques	Liste des types de fumure autorisés : 11 NC : 7	Moyen		+ limite risque de contamination					+ sensibilité des citoyens aux effluents
	19	Suivi analytique	Suivi analytique obligatoire : 9 NC : 9	Moyen		+ limite risque de contamination					+ sensibilité des citoyens aux effluents
	20	Conditions d'épandage	Conditions d'épandage encadrées : 11 NC : 7	Moyen		+ limite risque de contamination					+ sensibilité des citoyens aux effluents
Traite	21	Planning de traite	Planning de traite prévu (ex : min 8 h entre 2 traites) : 6 NC : 12	Moyen	0 pas d'impact sensoriel		+/- intervalle long augmente AG saturés		+ impact sur TB et TP	+ impact sur TB et TP	
	22	Hygiène de traite	Hygiène de traite limitée (par exemple trempage de la mammelle interdit) : 4 NC : 14	Faible	+ Hygiène de traite limitée protège flore naturelle	Hygiène de traite limitée: +/- effet protecteur de la flore naturelle, mais risque de flore pathogène accru			+ Hygiène de traite limitée maintient la flore initiale pour la transformations		

	23	Installation de traite	Vérification annuelle requise : 5 NC : 13	Faible		+ le suivi permet une meilleure maitrise sanitaire					
Collecte et stockage	24	Température stockage du lait	Stockge réfrigéré requis : 5 Température précisée (8°C, 4-14°C, 10°C) : 5 NC : 7	Moyen	+ réfrigération et maitrise de la température ont un impact positif	+ réfrigération et maitrise de la température ont un impact positif			+ réfrigération et maitrise de la température ont un impact positif		
	25	Modalités de collecte de lait	Fréquence de collecte minimum à respecter : 8 Dépotage des citernes dans l'aire : 2 Collecte séparée : 2 NC : 7	Moyen	+ le délai de collecte limité préserve les propriétés de la matière première	+ le délai de collecte limité réduit les risques sanitaires			+ le délai de collecte limité préserve les propriétés de la matière première		
	26	Délai pour stocker et utiliser le lait	Durée avant emprésurage/fabrication limitée : 15 Durée stockage du lait limitée (36 ou 48h) : 10 NC : 1	Fort	+ le délai d'utilisation limité préserve les propriétés de la matière première	+ le délai d'utilisation limité réduit les risques sanitaires			+ le délai d'utilisation limité préserve les propriétés de la matière première		
Fabrication	27	Matériel	Appareil de traitement thermique interdit : 8 Matériau demandé/autorisé : 6 NC : 8	Moyen	+ l'absence de traitement thermique préserve la flore naturelle typique	+ / - l'absence de traitement thermique procure protection allergène, mais risque contamination			+ l'absence de traitement thermique préserve la flore naturelle		
	28	Logistique et flux	Séparation d'autres fabrications : 5 Site de fabrication à 15 km max : 1 NC : 13	Faible	+ la logistique séparée préserve la différenciation du produit	+ la logistique séparée évite les contaminations (pathogènes ou non)			+ la logistique séparée préserve la différenciation du produit	+ garantie de l'intégrité du produit	+ garantie du maintien de la typicité
Lait	29	Traitement thermique du lait	Cru uniquement : 10 Cru ou traité thermiquement : 8 Spécificité fromage fermier au lait cru : 5 NC : 0	Fort	+ le lait cru préserve la flore naturelle typique	+ / - le lait cru procure protection allergène, mais risque contamination			+ le lait cru préserve la flore naturelle		+/- image du lait cru

	30	Standardisation MG et /ou MP	Standardisation protéique interdite : 11 Standardisation matière grasse autorisée : 9 Standardisation matière grasse interdite : 5 NC : 4	Fort	+ non standardiser maintient la typicité				+/- lait standardisé plus simple à transformer		
	31	Pré-maturation / Maturation primaire	Pré-maturation / Maturation primaire autorisée : 4 Avec des paramètres spécifiés : 3 NC : 12	Faible	+ la maturation permet le développement de saveur, texture typiques				+ la maturation permet le développement de saveur, texture typiques		
	32	Concentration du lait	Concentration du lait interdite : 7 NC : 11	Moyen	+ non concentrer maintient la typicité				+/- lait concentré plus simple à transformer		
Ingrédients	33	Ingrédients	Présure autorisée : 18 Ferment/Culture autorisé : 18 Chlorure de sodium (sel) autorisé : 17 Chlorure de calcium autorisé : 11 Colorants limités ou interdits : 4 Crème interdite : 2 NC : 0	Fort	+ le type d'ingrédient influe sur l'élaboration des caractéristiques du produit fini	+ limitation des additifs			+ le type d'ingrédient influe sur l'élaboration des caractéristiques du produit fini		+ limitation des additifs
Spécificité	34	Protection de la spécificité/typicité	Eléments conférant la typicité : 6 NC : 12	Faible	+ la typicité correspond à des attributs identifiables et distinguable (saveur, odeur, texture…)						+ bonne image de la typicité
	35	Maturation	Maturation autorisée : 4 dont paramètres spécifiés : 3 NC : 14	Faible	+ la maturation permet le développement de saveur, texture typiques				+ la maturation permet le développement de saveur, texture typiques		
Ensemencement	36	Provenance des ferments	Origine des ferments précisée : 6 Référence au groupement : 4 NC : 11	Moyen	+ le type de ferments influe sur le développement des caractéristiques attendues				+ le type de ferments influe sur le développement des caractéristiques attendues		

	37	Description des ferments	Genre du ferment (penicillium, geotrichum) : 4 Type de flore (mésophile, thermophile) : 3 NC : 11	Moyen	+ le type de ferments influe sur le développement des caractéristiques attendues				+ le type de ferments influe sur le développement des caractéristiques attendues		
Emprésurage	38	Provenance de la présure	Provenance précisée : 3 NC : 15	Faible	+ le type de présure influe sur le développement des caractéristiques attendues				+ le type de présure influe sur le développement des caractéristiques attendues		
	39	Procédure d'emprésurage	Température d'emprésurage : 16 Dose de présure : 3 Capacité maximum des cuves : 3 NC : 2	Fort	+ les conditions d'emprésurage précises permettent le développement des caractéristiques attendues				+ les conditions d'emprésurage précises permettent le développement des caractéristiques attendues		
Caillé	40	Durée de coagulation/caillage	Durée de coagulation spécifiée (de 18-35 min jusqu'à 18-36 h) : 8 NC : 10	Moyen	+ les conditions de caillage précises permettent le développement des caractéristiques attendues				+ les conditions de caillage précises permettent le développement des caractéristiques attendues		
	41	Tranchage du caillé	Taille de grain attendu spécifié : 12 Tranchage interdit : 2 Décaillage manuel ou mécanique : 2 Décaillage manuel pur : 1 NC : 4	Fort	+ le traitement du caillé permet le développement des caractéristiques attendues				+ le traitement du caillé permet le développement des caractéristiques attendues		+ image de la fabrication manuelle
	42	Brassage	Brassage mentionné : 9 Température de chauffage (de 38°C à 56°C) : 4 Type de grain à obtenir (coiffé, égoutté) : 4 NC : 9	Moyen	+ les conditions de brassage précises permettent le développement des caractéristiques attendues				+ les conditions de brassage précises permettent le développe-		

									ment des caractéristiques attendues		
	43	Délactosage / Lavage du grain	Délactosage interdit : 5 Délactosage limité : 1 NC : 12	Faible	+ /- délactosage permet d'éviter texture crayeuse, mais réduit la typicité				+ /- délactosage permet d'éviter post-acidification et texture crayeuse		
Moulage	44	Caractéristiques du moule	Dimensions imposées : 9 Forme du moule détaillée : 8 Matériau spécifié : 4 NC : 8	Moyen	+ le type de moule donne la forme, et influe sur les échanges entre le fromage et son environnement			+ le moule est lié à l'usage (individuel ou non) du fromage fini	+ le type de moule donne la forme		
	45	Procédure de moulage	Moulage manuel requis : 5 NC : 5	Fort	+ les conditions de moulage précises permettent le développement des caractéristiques attendues				+ les conditions de moulage précises permettent le développement des caractéristiques attendues		
Pressage	46	Procédure de pressage	Durée de pressage spécifiée (entre 30 min et 15 h) : 6 Retournements précisés : 4 Pressage avec un poids mentionné : 2 Pressage par empilement mentionné : 2 NC : 11	Moyen	+ les conditions de pressage impactent la texture				+ les conditions de pressage impactent la texture et le rendement		
	47	Durée de pressage	Durée de pressage spécifiée (entre 30min et 15h) : 6 NC : 12	Faible	+ les conditions de pressage impactent la texture				+ les conditions de pressage impactent la texture et le rendement		
	48	Modalités de pressage	Retournements précisés : 4 Pressage avec un poids mentionné : 2 Pressage par empilement mentionné : 2 NC : 11	Moyen	+ les conditions de pressage impactent la texture				+ les conditions de pressage im-		

									pactent la texture et le rendement		
	49	Caractéristique du produit obtenu	Extrait sec précisé : 1 pH du fromage précisé : 1 NC : 16	Faible	+ le pH et la teneur en eau jouent sur la texture et la flore				+ le pH et la teneur en eau jouent sur la texture et la flore		
Egouttage/ Maturation	50	Procédure d'égouttage / maturation	Retournements des fromages précisés : 10 Durée d'égouttage ou maturation : 9 Température de la salle : 6 NC : 6	Moyen	+ l'égouttage et la maturation jouent sur la texture et la saveur				+ l'égouttage et la maturation jouent sur la texture et le développement de la flore		
	51	Type du sel/saumure	Sel sec seul : 8 Saumure et/ou sel : 7 Caractéristique de la saumure (densité, saturation) : 4 Saumure seule : 3 NC : 0	Fort	+ le type de sel et sa quantité influent sur le développement de la flore	+ le taux de sel joue sur les flores indésirables	+ maitrise du taux de sel		+ le type de sel et sa quantité influent sur le rendement et le développement de la flore		+ image traditionnelle du salage
Salage/Saumurage	52	Modalités de salage/saumurage	Salage manuel précisé : 3 Salage interdit en cuve de fabrication : 3 Salage dans moule/cuveau individuel : 3 Salage dans bac : 1 Salage dans la masse non moulée : 1 NC : 11	Moyen	+ les conditions de salage précises permettent le développement des caractéristiques attendues				+ les conditions de salage précises influent sur le rendement et le développement de la flore		
Autres procédés	53	Piquage	Piquage à réaliser : 5 (sur 5 bleus) Dans un délai imparti : 4 NC : 13	Faible	+ piquage essentiel pour le développement des moisissures "bleues"				+ piquage essentiel pour le développement des moisissures "bleues"	+ nécessaire aux bleus	

	54	Pré-affinage/Ressuyage/Séchage	Conditions (température, hygrométrie) précisées : 9 Ressuyage mentionné : 6 Séchage mentionné : 5 Pré-affinage mentionné : 3 NC : 7	Moyen	+ les conditions de pré-affinages précises permettent le développement des caractéristiques attendues				+ les conditions de pré-affinage impactent le rendement fromager et le développement de la flore		
Affinage	55	Conditions d'affinage	Température d'affinage précisée : 18 Durée d'affinage précisée : 17 Hygrométrie d'affinage précisée : 14 NC : 0	Fort	+ les conditions d'affinages précises permettent le développement des caractéristiques attendues	+ maitrise du développement des moisissures			+ les conditions d'affinage impactent le rendement fromager et le développement de la flore	+ durée d'affinage est un critère de vente	+ durée d'affinage est un critère de choix à l'achat
	56	Matériaux autorisés	Affinage sur bois mentionné : 9 Antifongique interdit : 2 Affinage sous film interdit : 2 NC : 4	Fort	+ mesures pour maintenir la typicité	+/- matériaux potentiellement contaminés			+ les matériaux d'affinage influent sur le développement de la flore		+ image de la tradition de l'usage du bois
Conservation/ Conditionnement	57	Report	Report autorisé sous conditions (supérieur à -2°C, +4°C, 0°C) : 4 Report interdit (de caillé, fromage blanc) : 2 NC : 11	Moyen	- report autorisé impacte négativement	- report autorisé impacte négativement					- image négative du stockage/report
	58	Conservation	Conservation à température négative interdite du fromage en fabrication : 11 dont 1 interdit pour tous les produits Conservation sous atmosphère modifiée interdite (fromage frais et en affinage) : 9 NC : 6	Moyen	+ l'interdiction de conserver à température négative préserve les propriétés organoleptiques	+ / - l'interdiction de conserver à température négative peut avoir des impacts négatifs sur développement microbien					+ mauvaise image de la congélation
	59	Type de conditionnement	Type d'emballage précisé : 3 dont 2 individuellement pour protéger le fromage Délai pour découper/emballer : 2 Caractéristique (extrait sec min) attendu : 1 NC : 12	Faible	+ le type d'emballage est adapté au produit (fromage individuel, conservation…)			+ importance de l'emballage pour la consommation	+ protection physique du produit fini	+ type d'emballage impacte la valeur commerciale	+ l'image d'un produit passe par son emballage

Tableau 2.8.13 Critères ayant un lien positif (+) sur les propriétés des fromages selon le degré de précision (les pourcentages sont calculés par rapport au nombre de critères total)

Degré de précision	Critères		Organoleptique	Sanitaire	Nutritionnelle	Usage	Technologique	Commerciale	Image
Faible	Nombre	18	12	4	1	1	10	4	7
	Pourcentage	31%	20%	7%	2%	2%	17%	7%	12%
Moyen	Nombre	22	17	6	1	1	15	0	6
	Pourcentage	37%	29%	10%	2%	2%	25%	0%	10%
Fort	Nombre	19	16	8	6	0	10	1	13
	Pourcentage	32%	27%	14%	10%	0%	17%	2%	22%
Total	Nombre	59	45	18	8	2	35	5	26
	Pourcentage	100%	76%	31%	14%	3%	59%	8%	44%

2.8.4 Définition et application du cahier des charges de l'Agriculture biologique (AB) en Europe

La question de la variation dans l'application de l'Agriculture Biologique (AB) en Europe se pose d'autant plus que ce SIQO connaît un très fort développement et que son extension fait craindre une baisse des exigences.

2.8.4.1 Une réglementation fondée sur des objectifs qualitatifs

L'INAO définit l'AB comme étant « un mode de production qui allie les pratiques environnementales optimales, le respect de la biodiversité, la préservation des ressources naturelles et l'assurance d'un niveau élevé de bien-être animal» et la résume comme « un système de gestion durable pour l'agriculture »[14] ce qui traduit un cadrage flou (Rigby et Caceres, 2001).

L'agriculture biologique trouve ses fondements dans la critique du modèle agricole productiviste (Leroux, 2015). Le philosophe allemand Rudolf Steiner est souvent cité comme pionnier de l'agriculture biologique, lui qui a fondé la biodynamie en 1924, d'où est née la norme privée Demeter (originaire d'Allemagne). En Angleterre, l'agriculture organique prônée par Albert Howard aboutit à l'association *Soil Association* en 1967. L'agriculture organo-biologique portée par Hans et Maria Müller et Hans Rusch s'institutionnalise également en Suisse en 1946. Un peu plus tard (1960), ce sera au tour de l'agriculture naturelle définie par Masanobu Fukuoka au Japon et de la permaculture conceptualisée par les australiens Bill Mollison et David Holmgren dans les années 1970 (Padel, 2018). En France, l'association *Nature & Progrès* est à l'origine du premier cahier des charges techniques en 1972 et ouvre la voie d'une reconnaissance légale de l'AB dans la Loi d'orientation agricole de 1980 comme une « *agriculture n'utilisant pas de produits chimiques de synthèse* ». L'agriculture biologique exclut ainsi tout usage de produits agro-chimiques et préconise sur l'association polyculture-élevage. Ces différentes mouvances ont toutes contribué à la construction de l'agriculture biologique, tant du point de vue technique que conceptuel (Daniel, 2015) sur lequel s'appuie la réglementation. Le premier règlement européen légiférant l'AB date de 1991 (Commission européenne, 1991).

En France, 12 cahiers des charges avaient été définis pour les productions animales. Ils étaient restés en vigueur jusqu'à l'application du règlement européen spécifique aux productions animales biologiques n°1804/99, qui était jugé comme une norme a minima par les acteurs français. Ainsi en respect du principe de subsidiarité (le socle commun européen peut être complété ou plus strict au niveau national), le socle commun européen était complété en France par un « *Cahier des charges concernant le mode de production et de préparation biologique des animaux et des produits animaux définissant les modalités d'application du règlement CEE n°2092/91* » (Leroux *et al.*, 2009). Par la suite, dans un souci d'harmonisation, l'UE revoit son dispositif règlementaire et publie les règlements n°834/2007 et 889/2008 pour lesquels le principe de subsidiarité n'existe plus et qui deviennent donc la référence. Les standards détaillés dans ces règlements européens sont généralement repris et synthétisés par les acteurs sous forme de fiches ou de guides[15].

Leroux a décrit les principes de l'élevage biologique instaurés par la règlementation européenne. Ils concernent tout d'abord les animaux : les races doivent être appropriées et les animaux doivent provenir (naitre et être élevés) d'exploitations biologiques. Les exploitations ne doivent pas mélanger les animaux biologiques et non-biologiques (principe de non-mixité) sauf exception. Le respect des besoins de l'animal et de son bien-être est au cœur de l'élevage bio. Ainsi des densités maximales, et des conditions de logement sont à appliquer. Les règlements garantissent également l'accès au pâturage (quand les conditions le permettent) et à l'extérieur (sauf dérogations) ; en revanche l'attache ou l'isolement des animaux sont interdits (sauf exception) et il est préconisés d'éviter les mutilations La reproduction naturelle est la règle, même si l'insémination artificielle est autorisée. L'élevage hors sol est interdit afin de garantir le lien au sol. L'alimentation des animaux doit répondre et être adaptée à leurs besoins et provenir majoritairement de l'exploitation ou à défaut de la région. Les OGM sont bannis. Enfin, la santé animale privilégie la prophylaxie et les soins à base de plantes tandis que les médications allopathiques vétérinaires sont particulièrement contrôlées avec des délais d'attente accrus (Leroux *et al.*, 2009).

L'UE a d'ores et déjà adopté en 2018 de nouveaux règlements. Il s'agit du règlement (CE) 2018/848 (2018a) relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) n°834/2007 (2007) ainsi que du règlement d'exécution (CE) 2018/1584 (2018b) modifiant le règlement (CE) n°889/2008 (2008). Les changements concernent notamment le système de contrôle : en cas de 3 visites sans défaillance de la part de l'opérateur, les contrôles pourront être espacés de 24 mois (au lieu des contrôles annuels actuellement pratiqués). De plus la certification de groupe est créée. Cette révision modifiait également plusieurs points techniques pour les productions animales : 1) concernant le contrôle, celui-ci est espacés de 24 mois après 3 visites sans défaillance au lieu des contrôles annuels actuellement pratiqués ; il

[14] https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Agriculture-Biologique

[15] Par exemple : FNAB, Fiche cadre général de l'élevage. https://www.produire-bio.fr/cest-quoi-la-bio/le-cahier-des-charges/elevage/

devient possible d'avoir une certification de groupe ; 2) la cuniculture est intégrée dans le nouveau règlement ; 3) pour accroître le lien au sol, pourcentage de l'alimentation des bovins, ovins, caprins provenant de l'exploitation passera de 60% à 70% à partir de 2023, quand celle des porcs et des volailles devra atteindre 30% d'aliments produits sur place à partir de janvier 2021[16] au lieu de 20% jusqu'à maintenant.

Deux points suscitent particulièrement des débats : la taille des élevages et l'épandage des effluents. Dans le cas des poules pondeuses, l'évolution des termes pourrait en modifier l'interprétation : alors que « *chaque bâtiment avicole ne peut compter plus de 3 000 poules pondeuses* » selon l'actuel l'article 12.3 du règlement n°889/2008, le nouveau règlement n°2018-848 (point 1.9.4.4) énonce ainsi : « *le nombre total de poules pondeuses par compartiment de bâtiment avicole ne dépasse pas 3 000 individus* », ouvrant peut-être à des cloisons internes. Mais surtout, il n'est pas fait mention de taille maximale par exploitation, avec le risque d'une extension des exploitations par multiplication des bâtiments, à l'instar de ce qui s'observe en régime conventionnel. Par ailleurs, l'épandage des effluents provenant d'élevages dits industriels seront interdits mais la définition de ces élevages n'est pas explicite et laisse donc libre l'interprétation par les Etats[17]. Il est difficile de savoir si, globalement, ces changements renforcent ou amenuisent les exigences de l'AB d'autant plus que les modalités d'application doivent encore être négociées.

2.8.4.2 Applications et interprétations aux échelles nationales

Bien que le règlement n°834/2007 et son règlement d'application n°889/2008 fassent office de cahier des charges et n'autorisent pas de modification ou d'altération de la part des Etats membres, il existe toutefois des disparités et spécificités nationales voire régionales dans l'application des règlements européens. En France, un guide de lecture officiel publié par l'INAO recense tous les points pouvant être sujets à interprétation[18]. Il vise à éviter les différences de lecture entre les acteurs du secteur, notamment par les certificateurs. Pour autant cet outil n'est pas commun à tous les États membres. En Allemagne, la Öko-landbaugesetz (ÖLG - loi sur l'agriculture biologique) publiée en 2008 (et modifiée en 2016) précise les règles de contrôle et de surveillance. En Italie, les règlements européens sont complétés par un décret national (du 18 juillet 2018) publié par le ministère des politiques agricoles au Journal officiel. En Belgique, les législations diffèrent selon qu'on est en région flamande ou wallonne.

Mettre à plat les spécificités et écarts entre pays est particulièrement difficile et aucun organisme ne recense officiellement les décrets d'applications de l'AB européenne. Les informations ci-après sont issues d'un travail d'étudiants commandé par l'institut technique de l'aviculture (l'ITAVI). Cette analyse parue en 2010 comparait des filières avicoles biologiques au sein de l'UE à partir d'observations de terrain. Il pointait les points suivants :

La mixité entre animaux bio et non-bio d'une même espèce est interdite, mais il semblerait que les néerlandais autorisent des pondeuses bio et non-bio au sein d'une même exploitation à condition qu'elles soient différenciables par leur couleur.

La densité plafond autorisée dans les élevages au sol est fixée à 6 poules pondeuses/m², (annexe III du RCE n°889/2008) mais certains pays autorisent des densités supérieures quand il y a des volières (étages) augmentant mécaniquement la surface disponible par rapport à une même surface au sol. Au contraire, la France, la Belgique, le Danemark et les Pays-Bas ont précisé les densités (sol et extérieur), l'effectif par lot, l'accès au parcours pour les poulettes alors que ces critères ne figurent pas au niveau européen.

La définition des souches « à croissance lente » (article 12 du RCE n°889/2008, (2008)) reste à la discrétion des Etats membres, ce qui aboutit à une variabilité des souches utilisées et par conséquent des âges à l'abattage. Il est à noter que la France et l'Italie sont les pays respectant l'abattage tardif à 81 jours (ITAVI, 2010).

Un autre travail mené en 2018 par une organisation professionnelle wallonne, le Collège des Producteurs recensait des différences majeures dans l'encadrement de l'AB entres certains pays européens, principalement Belgique, France, Pays-Bas et Allemagne, les productions animales étant plus concernées que les cultures.

Les volets rapportés précédemment sur les volailles sont également pointés.

Les aliments du bétail proviennent de plus ou moins loin. L'article 14 du RCE n°834/2007 (2007) prévoit qu'ils ont été produits dans « *l'exploitation dans laquelle les animaux sont détenus ou d'autres exploitations biologiques de la même région* ».

---

[16] https://agriculture.gouv.fr/ce-que-prevoit-le-nouveau-reglement-bio-europeen

[17] AGRA Presse, Cazedes, F., 07/06/2019, Agriculture Biologique : Tensions autour de l'application du nouveau règlement. http://www.agra.fr/tensions-autour-de-l-application-du-nouveau-r-glement-art454513-39.html?Itemid=336

[18] INAO, Ministère de l'agriculture. Guide de lecture du RCE n°834/2007 et du RCE n°889/2008. Version de décembre 2018. https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQO/Agriculture-Biologique

Mais le périmètre régional est fixé à 300 km pour la Belgique wallonne par exemple, il correspond aux régions administratives en France, « ou à défaut le territoire national », et il s'étend à l'ensemble de l'Union Européenne dans les guides d'application de la Belgique flamande et des Pays-Bas.

Plus spécifiquement, les jeunes mammifères avant sevrage doivent être « *nourris au lait maternel, de préférence à d'autres laits naturels* » (article 20.1 du RCE n°889/2008). Certains pays, comme la Belgique wallonne interdisent les lacto-remplaceurs, alors qu'ils sont tolérés dans d'autres, comme la Belgique flamande et les Pays-Bas. La France les interdit sauf pendant la période de conversion en AB.

Le pâturage est largement prôné dans le règlement sur l'AB (n°834/2007 article 14.1) : « les animaux d'élevage bénéficient d'un accès permanent à des espaces de plein air, de préférence à des pâturages, chaque fois que les conditions climatiques et l'état du sol le permettent » et dans le règlement n°889/2008 article 20.2 « pour les herbivores, les systèmes d'élevage doivent reposer sur une utilisation maximale des pâturages, selon la disponibilité des pacages pendant les différentes périodes de l'année ». Cependant, l'Allemagne autorise le zéro-pâturage par dérogation du règlement européen au motif que la fauche est une pratique traditionnelle et culturelle[19]. Le qualificatif« conditions favorables » amène également à des interprétations variées ; au Danemark, par exemple, les vaches en AB ont accès au pâturage du 15 avril au 1er novembre pendant 6 h par jour minimum (Blanc, 2017).

En matière vétérinaires, le délai d'attente après traitement doit être « doublé par rapport au délai d'attente légal visé à l'article 11 de la directive 2001/82/CE ou, en l'absence de délai légal, est fixé à 48 heures », (article 24 du RCE n°889/2008). Mais un doute existe sur le délai lorsque le délai initial est nul : soit il est également nul, soit on considère qu'un délai nul revient à une absence de délai ce qui donne 48h à respecter, mais cette situation tend à s'harmoniser.

Variations dans l'application de la réglementation sur la transformation biologique

Si la règlementation européenne précise les pratiques d'élevage de manière qualitative certes mais détaillée, la transformation en revanche n'est guère approfondie. Le règlement n°834/2007 indique que la fabrication des aliments biologiques doit passer par « *des méthodes de transformation garantissant le maintien de l'intégrité biologique et des qualités essentielles du produit, à tous les stades de la chaîne de production* ». Kahl précise que la transformation AB se fonde sur l'autorisation de substances et procédés naturels et sur l'exclusion de ceux non respectueux du produit biologique. En revanche il n'y a pas d'exigence précise, ni même d'indicateur sur les procédés. Par exemple, l'usage d'OGM et d'ionisation sont interdits, mais tous les autres traitements peuvent être identiques à ceux mis en œuvre pour les produits standards (Kahl *et al.*, 2014).

Comme pour l'élevage, les interprétations des règlements européens peuvent varier au niveau de la transformation alimentaire. Deux exemples peuvent être évoqués : l'un dans le cadre de la transformation laitière (mentionné par l'ITAB) et l'autre dans celui de la charcuterie (relevé dans la législation italienne). Les résines échangeuses d'ions sont utilisées dans le traitement du lait afin de fournir des ingrédients laitiers entre autres pour la production de lait infantile. En France, ces résines sont classées dans la catégorie des auxiliaires technologiques. Or les résines échangeuses d'ions sont absentes de l'annexe VIII.B du règlement européen n°889/2008 qui liste de façon positive tous les auxiliaires technologiques autorisés. Par conséquent, elles sont exclues des traitements applicables aux produits biologiques, ce qui est précisé dans le guide de lecture émis par l'INAO : « *Les résines échangeuses d'ions sont des auxiliaires technologiques, non inscrites à l'annexe VIII –B du RCE 889/2008, elles ne sont pas autorisées en Bio* ». Pourtant dans d'autres Etats membres (Allemagne, Autriche), ces résines ne sont pas considérées comme des auxiliaires technologiques et ne sont donc pas interdites pour les produits biologiques. Ainsi dans son relevé de décisions émis le 20/09/2019, l'INAO prenait note de cet écart, mais confirmait l'interdiction en France tout en demandant à ce que la Commission européenne en soit informée[20]. Un second exemple concerne la transformation charcutière en Italie. Selon l'annexe VIII.A du règlement européen n°889/2008, les additifs E250 Nitrite de sodium ou E252 Nitrite de potassium sont autorisés pour les produits à base de viande et respectant des quantités maximales résiduelles (respectivement 50 mg $NaNO_2$/kg et 50 mg $NaNO_3$/kg). Mais en Italie, l'article 4 du décret du 18 juillet 2018 relatif à la production biologique va plus loin et impose que les opérateurs ne puissent utiliser ces additifs dans les jambons avec os et les culatelli qu'à condition d'avoir démontré auprès du ministère l'absence de méthodes alternatives.[21]

---

[19] Collège des Producteurs Wallonie, Mars 2018. *Différences d'application entre pays européens dont France et Belgique* http://www.collegedes-producteurs.be/site/index.php/2016-12-22-08-38-13/a-propos/notre-organisation

[20] INAO Comité nationale de l'AB, Séance du 20/09/2017, *Relevé des décisions prises.*

[21] Ministero delle politiche agricole alimentari, forestali e del turismo decreto 18 luglio 2018. Disposizioni per l'attuazione dei regolamenti (CE) n°834/2007 e n°889/2008 e loro successive modifiche e integrazioni, relativi alla produzione biologica e all'etichettatura dei prodotti biologici. Abrogazione e sostituzione del decreto n. 18354 del 27 novembre 2009. (Decreto n. 6793).

2.8.4.3 Les marques privées dans le giron de l'agrobiologie

La règlementation et la certification sont au cœur du concept de l'agriculture biologique. C'est le seul mode de production qui suit les mêmes principes généraux quel que soit les pays. La règlementation ne couvre cependant pas toutes les pratiques entrant dans le giron des méthodes agrobiologiques, ce qui suscite des déceptions chez certains protagonistes (Seufert *et al.*, 2017). Ainsi, en parallèle, de manière complémentaire ou en contrepoint de la législation AB, des marques privées ont diversifié l'offre de produits biologiques. Association de consommateurs et de producteurs fondée en 1964, Nature&Progrès devient une marque collective en 1993 et marque une distance avec la certification AB lors d'une campagne de boycott en 1995[22]. BioCohérence, au contraire, est une marque française soutenue par la Fédération Nationale de l'Agriculture Biologique[23]. Né en Allemagne, le mouvement Demeter[24] promouvant la biodynamie* a également créé une marque homonyme. Naturland[25] en Suisse, BioGarantie en Belgique sont d'autres exemples de marques basée sur les standards de l'AB. Elles ajoutent d'autres critères techniques (interdiction des nitrites) et sociaux (produits équitables[26]). Certaines marques se positionnent sur une région, telles BioBreizh ou AlsaceBio en France.

*Focus sur la Biodynamie

L'agriculture biodynamique, née au début du XXème siècle, suit les préceptes la philosophiques de l'anthroposophe Rudolf Steiner[27] (Turinek *et al.*, 2009). Il existe eu d'études sur ses performances, mais quelques-unes montrent les effets positifs des pratiques biodynamiques sur le microbiome, le carbone et l'azote du sol, d'autres sans qu'il y ait consensus scientifique (Reeve *et al.*, 2011). Une étude menée en 2019 concluait notamment que le lait issu d'élevages biodynamiques avait en moyenne un plus faible ratio oméga-6/oméga-3 que du lait conventionnel, ce qui représentait un intérêt nutritionnel (Baars *et al.*, 2019). D'autres auteurs soulignent l'absence de différences entre le lait issu de fermes biologiques, biodynamique ou de fermes où la ration est à base d'herbe et de pâturage (label « Weidemelk/Lait de pâturage » aux Pays-Bas) (Capuano *et al.*, 2014).

Afin d'illustrer la diversité des cahiers des charges appliqués, quelques critères relatifs à la production de volaille et à la transformation ont été comparés pour certains de ces cahiers des charges (Tableau 2.8.14). On observe ainsi que les marques privées peuvent se positionner de différentes façons selon les critères considérés :

Des critères peuvent faire l'objet d'un consensus entre les règlements européens et les marques privées, comme c'est le cas pour l'interdiction des OGM qui est commune à tous.

Les règlements européens peuvent mentionner un sujet sans pour autant proposer de critère d'application. Par exemple, les règlements européens donnent des indications sur le type de transformation alimentaire sans pour autant en interdire nommément alors que des marques privées sont plus explicites. Par exemple, les cahiers des charges des marques privées étudiées interdisent le traitement UHT pour le lait de consommation.

Les règlements européens peuvent suggérer ou conseiller un point sans pour autant l'imposer. Ainsi les règlements européens indiquent que l'ébecquage n'est pas systématique, alors que Nature&Progrès, Demeter et Naturland l'interdisent spécifiquement.

Enfin l'UE peut avoir défini des critères précis, mais les cahiers des charges privés sont plus restrictifs : l'AB requiert 20% minimum d'alimentation locale (ferme ou région) alors que Nature&Progrès nécessite 40% d'auto-approvisionnement et que BioCohérence impose 50% de production sur l'exploitation ou à 80 km maximum.

La pluralité des acteurs impliqués dans l'agriculture biologique mène ainsi à l'élaboration de différentes propositions au sein de de ce secteur. Cette construction de mouvements qui s'inscrivent dans la réglementation ou s'en éloigne par des marques privées, permet la mise en débat des controverses et participe au dynamisme de l'agriculture biologique (Pomeon *et al.*, 2014).

[22] https://www.natureetprogres.org/les-cahiers-des-charges-2/
[23] http://www.biocoherence.fr/bio-coherence/les-grands-principes/31-pour-des-pratiques-exigeantes-le-cahier-des-charges
[24] http://www.demeter.fr
[25] https://www.naturland.de/en/richtlinien/284-naturland-uk/naturland/naturland-standards.html
[26] https://biogarantie.be/avantages-biogarantie/
[27] MABD(Mouvement de l'agriculture biodynamique) https://www.bio-dynamie.org/biodynamie/presentation/

Tableau 2.8.14 Comparaison de spécification entre cahiers des charges AB et de marques privées, à partir de l'exemple de la production de volaille

	Signe ou marque	Agriculture biologique	Nature&Progrès	Biocohérence	Demeter	Naturland
	Mouvement	-	Agroécologie	Dimension sociétale	Biodynamie	Durabilité
	Localisation	Union Européenne	France	France	Allemagne (et international)	Allemagne
Critère	Référence	RCE n°834/2007 RCE n°889/2008	Cahier des charges *aviculture* 2002 corrigée Cahier des charges *Transformation alimentaire* 2016	Cahier des charges mai 2019	Cahier des charges - Productions végétales et animales Jan 2019 Cahier des charges - Transformation Jan 2019	Naturland standards processing 05/2019 Naturland standards on production 05/2019
Production animale	Race/Souche	Lors du choix des races ou des souches, il est tenu compte de la capacité des animaux de s'adapter aux conditions locales, de leur vitalité et de leur résistance aux maladies. Afin d'éviter le recours à des pratiques d'élevage intensives, les volailles doivent soit être élevées jusqu'à ce qu'elles atteignent un âge minimal, soit être issues de souches à croissance lente.	Races de volaille à développement rapide interdites, et privilégie les races rustiques et à défaut les souches « locales ».	Interdiction des races nécessitant une artificialisation du milieu et des pratiques. Choix des races basée sur la prévention des maladies et des mutilations	Il faut accorder la préférence aux races à croissance lente.	Les races à viandes extensives doivent être privilégiées
	Ration	Des fourrages grossiers, frais, secs ou ensilés sont ajoutés à la ration journalière des porcs et des volailles.	La ration de base comprend une proportion minimale de 70% de céréales, de protéagineux et oléagineux en graines entières, ou n'ayant subi que des traitements physiques, mécaniques, thermiques, sans adjonction de produits chimiques de synthèse.		Les gallinacés doivent avoir 20% de leur alimentation en grains entiers. Au minimum 5% de l'alimentation doit être donnée en grains entiers répandus sur le sol. Liste positive d'aliments autorisés.	Pour l'alimentation des poules pondeuses, une partie de la ration devrait être fournie sous forme de grains entiers, si possible sur le sol.
	Origine alimentaire	Les animaux d'élevage sont nourris avec des aliments biologiques. Au moins 20% des aliments proviennent de l'unité de production elle-même ou, si cela n'est pas possible, sont produits dans la même région en coopération	L'alimentation des animaux est constituée à 100% d'ingrédients sous mention Nature & Progrès ou à défaut issus de l'agriculture biologique Les éleveurs doivent produire au minimum 40% de la ration sur leur ferme	Aucune matière première végétale conventionnelle autorisée 50% minimum de la ration produits sur la ferme ou d'autres fermes Bio Cohé-	Seuls les aliments d'origine biologique certifiée peuvent être introduits Au moins 50% de l'alimentation (matière sèche) doit être produite sur le domaine ou en collaboration avec un autre domaine Demeter	Au moins 50% de la ration doit provenir de l'exploitation (ou d'une coopérative approuvée par Naturland).

		avec d'autres exploitations biologiques		rence locales (80 km maximum ou zone céréalière la plus proche)		
	Santé animale	Les produits phytothérapiques, les produits homéopathiques, les oligo-éléments sont utilisés de préférence aux médicaments vétérinaires allopathiques chimiques de synthèse ou aux antibiotiques. Il est possible de recourir à des médicaments vétérinaires allopathiques chimiques de synthèse ou à des antibiotiques sous la responsabilité d'un médecin vétérinaire. Traitements allopathiques hors antiparasitaires limités à 3 pour les animaux vivant plus de 12 mois, 1 pour les animaux vivant moins de 12 mois. Antiparasitaires allopathiques non limités	Seules sont autorisées les prescriptions de produits à base : de substances du règne végétal, animal ou minéral en dilution homéopathique, de plantes et de leurs extraits, d'oligo-éléments, de métaux, ainsi que, sur prescription du vétérinaire et avec avis de l'organisme certificateur, les vaccins. Toute prescription ou utilisation de substances autres que celles précitées entraîne automatiquement le déclassement de l'animal ou de la bande de volailles concernée.	Vaccination autorisée si zoopathie constatée. Détail de nombre de traitements autorisé: par exemple 0 traitement allopathique hors antiparasitaire pour les volailles de chair	Des méthodes de traitement naturelles doivent être utilisées en premier lieu. Les remèdes vétérinaires issus de la chimie de synthèse y compris les antibiotiques, doivent être administrés par le vétérinaire ou en suivant ses directives. Les antibiotiques ne peuvent être utilisés de façon systématique ou en traitement prophylactique.	En cas de maladie, les traitements naturels doivent être privilégiés. Les traitements routiniers et prophylactiques avec des produits chimiques de synthèse et des hormones ne sont pas autorisés. Dans le cas où les animaux se voient administrer plus de 3 traitements à base de médicaments vétérinaires allopathiques chimiques de synthèse ou d'antibiotiques en 12 mois, les produits de ces animaux ne peuvent plus être commercialisés sous la marque Naturland
	Mutilation	Les opérations telles que […] l'ébecquage ne sont pas effectuées systématiquement en agriculture biologique	Ebecquage, désonglage, désailage strictement interdites	Les mutilations doivent être évitées autant que possible, via le choix de races appropriées, la gestion du troupeau et notamment de sa taille et des bâtiments adaptés.	Il est interdit de couper les becs.	Le coupage ou l'épointage de parties du corps (becs et ailes) de la volaille sont interdits
	Chargement et densité	Volailles de chair (dans des installations fixes) 10/m² avec un maximum de 21 kg de poids vif/m² en intérieur et 4 ²/poulet en extérieur (maximum 170 Kg d'azote par an/ha SAU)	Le chargement est limité à 1 UGB/Ha de SAU, toutes espèces confondues. Les densités maximales sont indiquées, par exemple: poulet de chair = 10/m² de bâtiments et 4 m²/animal parcours	Il est vivement recommandé de ne pas dépasser 2 UGB/ha de chargement instantané (à l'instant T).	Taux de chargement : 2 UGB./ha maximum et 0,2 UGB/ha minimum. Les unités de fumure déterminent le taux de chargement : La quantité totale d'azote ne doit pas dépasser 112 kg N/ha	La densité d'occupation maximale des poulaillers de poulets d'engraissement ne doit pas dépasser 10 oiseaux/m² ou 21 kg de poids vif/m² (à l'intérieur) ou 4/m² à l'extérieur. Le chargement est basé sur la fertilisation autorisée, par exemple maximum 280 poulets de chair/ha

	Infrastructure	Chaque bâtiment avicole ne peut compter plus de 4 800 poulets. La surface totale utilisable des bâtiments avicoles pour volailles de chair de toute unité de production ne peut dépasser 1600 m 2	Chaque bâtiment avicole ne compte pas plus de 2 000 poulets.	Surface totale des bâtiments limitée à 1 600 m²		Max 4 800 poules/bâtiment avicole.
	Age à l'abattage	Lorsque l'opérateur n'utilise pas de souches de volaille à croissance lente, l'âge minimal d'abattage est 81 jours pour les poulets;	Poulet=min 91 j	Poulet min 81 j	Poulet min 81 j	Poulet min 81 j
	Abattoir	la durée du transport des animaux d'élevage est réduite au minimum	les élevages doivent être situés à moins de 100 km de l'abattoir ou à moins de 2 heures de transport de celui-ci.	Transport des animaux limité à 8h consécutives	Les transports devraient être courts, si possible n'excédant pas 200 km.	le temps de transport ne doit pas dépasser les 4 heures et la distance de transport les 200 km.
	Abattage	Toute souffrance, y compris la mutilation, est réduite au minimum pendant toute la durée de vie de l'animal, y compris lors de l'abattage	La puissance du courant pour étourdir les volailles doit être d'au moins 120 mini ampères. La saignée doit être la plus complète possible, réalisée dans un temps minimum de 1'35''	Etourdissement systématique		
Transformation	Interdictions	OGM et ionisation interdits	OGM et ionisation interdits	OGM interdit, avec demande d'attestation	OGM et nanoparticules, ainsi que l'irridiation sont interdits	OGM et nanoparticules, ainsi que l'ionisation interdits
	Procédés (ex. du lait)	Exclure les substances et méthodes de transformation susceptibles d'induire en erreur sur la véritable nature du produit; faire preuve de précaution lors de la transformation des denrées alimentaires, en utilisant de préférence des méthodes biologiques, mécaniques et physiques	Interdiction de standardisation (protéine, lipide), UHT pour le lait de consommation	La stérilisation UHT est autorisée	L'utilisation de procédés thermiques comme la stérilisation UHT ou ESL (Extended Shelf Life) est interdite. Le lait ne doit pas être homogénéisé.	Stérilisation du lait interdite

	Ingrédients	Produits contenant au minimum 95% d'ingrédients bio,	100% des ingrédients d'origine agricole rentrant dans la fabrication doivent être par ordre de préférence : - sous mention Nature & Progrès, - Demeter, Simples, Bio Cohérence - Certifiés Agriculture Biologique	La totalité (100%) des ingrédients d'origine agricole sont biologiques. En principe, les ingrédients d'origine agricole entrant dans la composition des produits transformés sont issus de la marque Bio Cohérence. les produits transformés (hors mono-produits) sont composés, pour leur part d'origine agricole, de 75% min (de 50% minimum d'ingrédients respectant le présent cahier des charges).	Seuls des produits agricoles (y compris animaux) issus de domaines en biodynamie sous contrat avec l'association Demeter France, et des auxiliaires et additifs certifiés Demeter peuvent être utilisés pour la transformation	Les produits certifiés Naturland contiennent des ingrédients certifiés Naturland. En cas d'indisponibilité, l'approvisionnement doit suivre dans l'ordre les priorités suivantes : certifiés par Naturland, certification reconnue par Naturland, approbation temporaire par Naturland, produits biologiques de façon temporaire, et enfin max 5% de produits conventionnels
	Additif	E250 Nitrite de sodium ou E 252 Nitrate de potassium : autorisés pour les produits à base de viande, mais limités (dose indicative d'incorporation pour E250, $NaNO_2$= 80 mg/kg ou E 252, $NaNO_3$ = 80 mg/kg) quantité maximale résiduelle pour E250, $NaNO_2$= 50 mg/kg ou E 252, $NaNO_3$ = 50 mg/kg)	Sels de nitrite interdits	Les nitrates et nitrites (E250, E252) sont interdits	La salaison avec utilisation de sel nitrique, de salpêtre (E 252), d'acide ascorbique (E 300), de glucono-delta-lactone (E 575) ou d'acides alimentaires est interdite.	E250 Nitrite de sodium autorisé mais limité (80 mg/kg viande pour la saucisse non cuite, 40 mg/kg viande pour la saucisse cuite) E252 Nitrate de potassium autorisé pour saucisse non cuite avec maturation de plus de 4 semaines à moins de 18°C (max 80 mg/kg)

2.8.4.4 Les défis du changement d'échelle de l'AB

L'agriculture biologique croit tant en production que consommation. A titre d'illustration, le nombre d'exploitations certifiées AB a triplé en France au cours des 10 dernières années. La mutation de l'AB est concomitante de transitions importantes des systèmes alimentaires conventionnels dans un contexte de forte demande sociétale pour le développement d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement et de la santé humaine. Toutefois le développement à grande échelle de l'AB, qui a fait l'objet de prospectives au cours des dernières années, présente des tensions.

L'expansion de l'AB amène à s'interroger sur son devenir et les possibles scénarios de son développement. En effet, la filière AB fait face à l'évolution de son échelle d'activité et à l'émergence de nouvelles formes d'AB. Des questions se posent ainsi au sujet de l'équilibre entre échelles artisanale et industrielle, distribution en circuit court ou en circuit plus long, approvisionnement au niveau local, national ou international. Le concept de « conventionnalisation » de l'AB rend compte du rapprochement de ses pratiques de celles du secteur conventionnel, observé à différents niveaux : les systèmes de production et pratiques agronomiques mis en œuvre, les attentes et comportements des consommateurs d'AB, le développement des produits AB dans des filières conventionnelles ou encore les motivations plus économiques des nouveaux acteurs de l'AB par rapport aux pionniers (Pomeon *et al.*, 2014). Ces évolutions soulèvent de nombreuses questions, sur les conditions d'un développement qui ne compromette pas les valeurs véhiculées par l'AB, sur la complexité de la coexistence des systèmes de production AB et conventionnels, et le risque de confusion, à l'avenir, entre « conventionnel à tendance de naturalité » et « agriculture biologique ».

Un autre enjeu impliqué par la croissance du secteur de l'AB est la gestion des ressources et par voie de conséquence à la place de l'élevage. La réduction des intrants pourrait être facilitée par une plus large utilisation de la diversité génétique domestique et la sélection de races animales et de variétés végétales adaptées aux productions AB, et par des innovations en santé animale et végétale (bio-contrôle…) et une valorisation accrue des régulations biologiques. L'augmentation de la demande en produits biologiques pose la question de l'approvisionnement, notamment pour les produits animaux. En effet, en France la viande fraiche et transformée provient à 97% du territoire national, mais l'alimentation des animaux peut faire appel aux importations ou à des dérogations à la règle de production locale de fourrages, ce qui incite à questionner la notion d'autonomie nationale. Enfin les productions AB requièrent de la matière fertilisante certifiée. L'élevage est donc crucial pour le bouclage des cycles (N, P, C…). La localisation et la répartition des élevages sur le territoire ainsi que la distribution des effluents sont donc amenés à évoluer afin de répondre aux nouvelles demandes[28].

La transformation représente un défi important. En effet, la variabilité de la matière première AB requiert une adaptation des procédés technologiques de transformation et de conservation, y compris d'emballage. Il s'agit d'investir dans l'innovation de procédés compatibles à la fois avec les engagements de l'AB et les attentes des consommateurs, qui tendent à rechercher des produits biologiques plus « classiques » (prêts à consommer…) et standardisés, et de parvenir à mobiliser tous les opérateurs de la filière. Enfin, pour assurer la préservation de la qualité des produits certifiés AB, la traçabilité, le contrôle ainsi que des approches multicritères devront être maintenus ou développés. Le changement d'échelle de l'AB représente ainsi de nombreux défis : il concerne la totalité des systèmes agri-alimentaires, de la production à la consommation et aux politiques publiques.

CONCLUSIONS

De par leur définition règlementaire et leur objectif de visibilité et de différenciation des produits, les cinq SIQO reconnus en France s'engagent tous sur les propriétés d'image et chacun développe par ailleurs un lien privilégié avec une ou plusieurs des autres propriétés constitutives de la qualité. Les AOP et IGP sont explicitement liées aux propriétés organoleptiques, au travers de leur typicité, tandis que l'AB met en avant des propriétés sanitaires. Bien que toutes les propriétés constitutives de la qualité ne soient pas explicitement visées dans les définitions règlementaires, l'étude de cahiers des charges (SIQO de jambon sec, LR gros bovins, AOP/IGP fromages Auvergne Rhône Alpes) montre que les engagements pris par ces SIQO ont un lien avec toutes ces propriétés, mais dans des proportions variables selon les cas.

Le LR présente la particularité d'expliciter son objectif de « qualité supérieure » et d'en indiquer les éléments justificatifs. L'analyse des cahiers des charges LR gros bovins montrent que les engagements appliqués au cheptel (ex : accès au pâturage et respect du bien-être animal lors du transport) et les tris successifs (sur le type d'animal, les caractéristiques de la carcasse et de la viande éligibles à labellisation) permettent de construire les propriétés organoleptiques de la viande LR, et ce tout au long de la chaine d'élaboration. Les fromages AOP et IGP, quant à eux, s'appuient sur quatre grands piliers pour justifier le

[28] Rencontre INRA au SIA, 25 février 2019 L'extension de l'agriculture biologique : quels enjeux et comment l'anticiper dans une vision de long terme ? https://www6.inrae.fr/comite_agriculture_biologique/Accueil/Actualites/SIA-2019

lien entre l'aire géographique et la qualité du produit : les conditions pédoclimatiques, les pratiques d'élevage, celles de transformation, et l'histoire. Les engagements des cahiers des charges des fromages AOP/IGP d'Auvergne-Rhône-Alpes sont favorables aux différentes propriétés qualitatives du produit. Les critères les plus partagés entre ces cahiers des charges sont ceux qui sont essentiels à la construction de l'identité, et donc à la typicité du fromage (provenance de l'alimentation, traitement thermique du lait…). Enfin si l'AB est régie par un règlement européen, il existe des lectures à l'échelle nationale, comme les souches et l'âge à l'abattage pour les volailles. La croissance de l'AB fait face au développement parallèle de marques privées à aspiration écologique ainsi qu'à des enjeux relatifs aux transformations d'échelles du secteur (évolution des systèmes, gestion des ressources, implication de la transformation agro-alimentaire).

Références bibliographiques

AFNOR, 1996. Norme française NF V46-001 - Viandes de gros bovins : conditions de valorisation du potentiel de tendreté.

Baars, T.; Wohlers, J.; Rohrer, C.; Lorkowski, S.; Jahreis, G., 2019. Patterns of Biodynamic Milk Fatty Acid Composition Explained by A Climate-Geographical Approach. *Animals*, 9 (3). http://dx.doi.org/10.3390/ani9030111

Bastien, D., 2004. Suspension pelvienne : Un impact important sur la tendreté des gros bovins. *Viandes & Produits carnés*, 24 (2): 51-54.

Blanc, M., 2017. *Analyse des filières laitières biologiques européennes*. Mémoire (Ingénieur). AgroParisTech, Paris. 75 p.

Bretschneider, G., 2005. Effects of age and method of castration on performance and stress response of beef male cattle: A review. *Livestock Production Science*, 97 (2-3): 89-100. http://dx.doi.org/10.1016/j.livprodsci.2005.04.006

Capuano, E.; Boerrigter-Eenling, R.; Elgersma, A.; van Ruth, S.M., 2014. Effect of fresh grass feeding, pasture grazing and organic/biodynamic farming on bovine milk triglyceride profile and implications for authentication. *European Food Research and Technology*, 238 (4): 573-580. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-013-2137-0

Casabianca, F., 2018. Les viandes bovines sous signe de qualité et d'origine. In: Ellies-Oury, M.P.; Hocquette, J.F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation* Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Sciences et techniques agroalimentaires), Chapitre 9, 143-163.

Commission européenne, 1991. Règlement (CE) n° 2092/91 du Conseil, du 24 juin 1991, concernant le mode de production biologique de produits agricoles et sa présentation sur les produits agricoles et les denrées alimentaires. *JOUE L 198 du 22/07/1991 p. 0001 - 0015*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:31991R2092

Commission européenne, 1998. Directive 98/58/CE du Conseil du 20 juillet 1998 concernant la protection des animaux dans les élevages. *JOUE L 221 du 08.08.1998, p. 23–27*.

Commission européenne, 2007. Règlement (CE) n°834/2007 du Conseil du 28 juin 2007 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques et abrogeant le règlement (CEE) n°2092/91. *JOUE L 189 du 20.07.2007, p. 1–23*.

Commission européenne, 2008. Règlement (CE) n°889/2008 de la Commission du 5 septembre 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n°834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles. *JOUE L 250 du 18.9.2008, p. 1–84*.

Commission européenne, 2009. Règlement (CE) n°1099/2009 du Conseil du 24 septembre 2009 sur la protection des animaux au moment de leur mise à mort (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 303 du 18.11.2009, p. 1–30*.

Commission européenne, 2018a. Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) no 834/2007 du Conseil. *JOUE L 150 du 14.6.2018, p. 1–92*.

Commission européenne, 2018b. Règlement d'exécution (UE) 2018/1584 de la Commission du 22 octobre 2018 modifiant le règlement (CE) n° 889/2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n° 834/2007 du Conseil relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques en ce qui concerne la production biologique, l'étiquetage et les contrôles (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.). *JOUE L 264 du 23.10.2018, p. 1–12*.

Daniel, Y., 2015. *Rapport d'information déposé par la commission des affaires européennes sur les enjeux de la production biologique dans l'Union européenne*. Paris: Assemblée nationale. Commission des Affaires européennes 96 p. http://www.assemblee-nationale.fr/14/pdf/europe/rap-info/i3102.pdf

Duckett, S.K.; Neel, J.P.S.; Lewis, R.M.; Fontenot, J.P.; Clapham, W.M., 2013. Effects of forage species or concentrate finishing on animal performance, carcass and meat quality. *Journal of Animal Science*, 91 (3): 1454-1467. http://dx.doi.org/10.2527/jas2012-5914

ITAVI, 2010. *Analyse comparée des dynamiques des filières avicoles biologiques au sein de l'Union européenne : Rapport de synthèse*. Paris: France Agrimer ; Ministère de l'agriculture et de la pêche, (Etude réalisée avec la participation financière du CASDAR dans le cadre du projet AVIBIO et de FranceAgriMer), 43 p. http://www.itab.asso.fr/downloads/com-elevage/magdelaine.pdf

Kahl, J.; Alborzi, F.; Beck, A.; Bugel, S.; Busscher, N.; Geier, U.; Matt, D.; Meischner, T.; Paoletti, F.; Pehme, S.; Ploeger, A.; Rembialkowska, E.; Schmid, O.; Strassner, C.; Taupier-Letage, B.; Zalecka, A., 2014. Organic food processing: a framework for concept, starting definitions and evaluation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94 (13): 2582-2594. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6542

Leroux, B., 2015. L'émergence de l'agriculture biologique en France: 1950-1990. *Pour*, (3): 59-66. http://dx.doi.org/10.3917/pour.227.0059

Leroux, J.; Fouchet, M.; Haegelin, A., 2009. Organic breeding: from the French public standard to European regulation.

Productions Animales, 22 (3): 151-160. https://www6.inra.fr/productions-animales_eng/content/download/5705/80843/version/1/file/Prod_Anim_2009_22_3_02.pdf

Martins, L.T.; Goncalves, M.C.; Tavares, K.C.S.; Gaudencio, S.; Neto, P.C.S.; Dias, A.L.G.; Gava, A.; Saito, M.E.; Oliveira, C.A.; Mezzalira, A.; Vieira, A.D., 2011. Castration methods do not affect weight gain and have diverse impacts on the welfare of water buffalo males. *Livestock Science*, 140 (1-3): 171-176. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2011.03.026

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2013. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Rigotte de Condrieu". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 48 du 21-11-2013 au 28-11-2013*. 20 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014a. Cahier des charges de l'appelation protégée « Fourme d'Ambert ». *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°27 du 26-06-2014 au 03-07-2014*.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014b. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Charolais". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 28 du 03-07-2014 au 10-07-2014*. 14 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014c. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Fourme de Montbrison". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 27 du 26-06-2014 au 03-07-2014*. 12 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014d. Cahier des charges de l'appellation d'origine protégée "Bleu de Gex Haut-Jura" ou "Bleu de Septmoncel". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 27 du 26-06-2014 au 03-07-2014*. 8 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2014e. Cahier des charges de l'indication géographique protégée "Saint-Marcellin". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 5 du 23-01-2014 au 30-01-2014*. 19 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015a. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Beaufort". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°2 du 01-01-2015 au 08-01-2015*. 18 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015b. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Chevrotin". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 24 du 04-06-2015 au 11-06-2015*. 11 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015c. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Reblochon" ou "Reblochon de Savoie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 19 du 30-04-2015 au 07-05-2015*. 19 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2015d. Cahier des charges de l'indication géographique protégée "Tome des Bauges". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°14 du 14-04-2015*. 10 p. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/document_administratif-e0ce815f-32cb-4e80-8710-d48016527e19/telechargement

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016a. Cahier des charges de l'appellation d'origine protégée "Picodon". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 10 du 25-02-2016 au 03-03-2016*. 32 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016b. Cahier des charges de l'indication géographique protégée « Jambon sec des Ardennes » / « Noix de Jambon sec des Ardennes » homologué par l'arrêté du 7 janvier 2016 relatif à la modification du cahier des charges de l'indication géographique protégée « Jambon sec des Ardennes » / « Noix de Jambon sec des Ardennes » , JORF du 19 janvier 2016. *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°3 du 0303--2016*. 19 p. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/document_administratif-13a01b14-114f-495d-8afa-4ab2ed4f17f9/telechargement

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2016c. Cahier des charges de l'indication géographique protégée « Jambon d'Auvergne » associé au règlement d'exécution (UE) n° 2016/291 de la Commission du 18 février 2016. *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°10 du 0303--2016*. 17 p. https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/document_administratif-6ab7284f-a33b-4cea-b34a-987f998bd8a2/telechargement

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017a. Arrêté fixant les conditions de production communes relatives à la production en label rouge "gros bovins de boucherie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°31 du 27-07-2017 au 03-08-2017*. 25 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017b. Arrêté fixant les conditions de production communes relatives à la production en label rouge "porc". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°31 du 27-07-2017 au 03-08-2017*. 27 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017c. Arrêté fixant les conditions de production communes relatives à la production en label rouge "produits de charcuterie / salaison pur porc". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°31 du 27-07-2017 au 03-08-2017*. 35 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017d. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Bleu d'Auvergne". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°43 du 19-10-2017 au 26-10-2017*. 18 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017e. Cahier des charges de l'appellation d'origine "Bleu du Vercors-Sassenage".

Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 46 du 09-11-2017 au 16-11-2017. 11 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017f. Cahier des charges de l'indication géographique protégée "Emmental de Savoie. *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 39 du 21-09-2017 au 28-09-2017*. 18 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017g. Cahier des charges de l'indication géographique protégée "Tomme de Savoie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 39 du 21-09-2017 au 28-09-2017*. 19 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017h. Cahier des charges du label rouge nºLA 01/99 "Viande et abats frais et surgelés de gros bovins fermiers de race Aubrac". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-16.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017i. Cahier des charges du label rouge nºLA 02/74 "Viande et abats frais et surgelés de gros bovins de race charolaise". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017j. Cahier des charges du label rouge nºLA 02/94 "Viande fraîche de gros bovins de boucherie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017k. Cahier des charges du label rouge nºLA 03/86 "Viande fraîche de gros bovins fermiers". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017l. Cahier des charges du label rouge nºLA 03/89 "Viande, abats et viande hachée, frais et surgelés, de gros bovins de race charolaise". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-19.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017m. Cahier des charges du label rouge nºLA 05/11 "Viande fraîche de gros bovins de race Blonde d'Aquitaine". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-16.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017n. Cahier des charges du label rouge nºLA 07/08 "Jambon sec supérieur". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-15.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017o. Cahier des charges du label rouge nºLA 08/04 "Viande et abats frais de gros bovins de race Salers". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-16.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017p. Cahier des charges du label rouge nºLA 09/02 "Viande et abats frais de gros bovins de race Blonde d'Aquitaine". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017q. Cahier des charges du label rouge nºLA 11/89 "Viande et abats frais et surgelés de gros bovins de race charolaise". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-16.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017r. Cahier des charges du label rouge nºLA 12/97 "Viande fraîche de gros bovins de boucherie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017s. Cahier des charges du label rouge nºLA 16/93 "Viande fraîche de gros bovins fermiers". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017t. Cahier des charges du label rouge nºLA 17/91 "Viande et abats, frais et surgelés de gros bovins de race blonde d'Aquitaine". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017u. Cahier des charges du label rouge nºLA 18/91 "Viande et abats frais de gros bovins de boucherie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-14.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017v. Cahier des charges du label rouge nºLA 18/97 "Viande et abats frais de gros bovins de race gasconne". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-18.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017w. Cahier des charges du label rouge nºLA 22/88 "Viande fraîche et surgelée de gros bovins de race limousine". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-12.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017x. Cahier des charges du label rouge n°LA 26/05 "Viande fraîche de gros bovins de race Parthenaise". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-13.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017y. Cahier des charges du label rouge n°LA 29/01 "Viande hachée et surgelée de gros bovins de boucherie". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 36 du 31-08-2017 au 07-09-2017*. 1-15.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018a. Cahier des charges de l'appellation d'origine protégée "Saint-Nectaire". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 4 du 18-01-2018 au 25-01-2018*. 21 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018b. Cahier des charges de l'indication géographique protégée "Abondance". *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n°37 du 06-09-2018 au 13-09-2018*. 18 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018c. Cahier des charges de l'indication géographique protégée « Jambon de Bayonne ». *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 35 du 23-08-2018 au 30-08-2018*. 22 p.

Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2019. Cahier des charges de l'appellation d'origine protégée « Cantal » ou « Fourme de Cantal ». *Bulletin officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, n° 3 du 10-01-2019 au 17-01-2019*

Padel, S., 2018. Setting and reviewing standards for organic farming. In: Koepke, U., ed. *Improving Organic Crop Production*. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Chapter 13, 345-364. http://dx.doi.org/10.19103/AS.2017.0029.14

Pomeon, T.; Desquilbet, M.; Monier-Dilhan, S., 2014. Positionnement critique et agriculture biologique: une lecture à partir des standards privés de l'AB. *8. Journées de Recherches en Sciences Sociales, Société Française d'Economie Rurale, 11-12 décembre 2014*. Grenoble, 25 p.

Reeve, J.R.; Carpenter-Boggs, L.; Sehmsdorf, H., 2011. Sustainable agriculture: A case study of a small Lopez Island farm. *Agricultural Systems*, 104 (7): 572-579. http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2011.04.006

République Française, 2018. Loi n°2018-938 du 30 octobre 2018 pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous. *JORF n°0253 du 1 novembre 2018*.

Rigby, D.; Caceres, D., 2001. Organic farming and the sustainability of agricultural systems. *Agricultural Systems*, 68 (1): 21-40. http://dx.doi.org/10.1016/s0308-521x(00)00060-3

Roche, B.; Dedieu, B.; Ingrand, S., 2000. Analyse comparative des cahiers des charges Label Rouge gros bovins de boucherie. *Rencontres Recherches Ruminants*, 7: 263-266.

Seufert, V.; Ramankutty, N.; Mayerhofer, T., 2017. What is this thing called organic? - How organic farming is codified in regulations. *Food Policy*, 68: 10-20. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.12.009

Turinek, M.; Grobelnik-Mlakar, S.; Bavec, M.; Bavec, F., 2009. Biodynamic agriculture research progress and priorities. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 24 (2): 146-154. http://dx.doi.org/10.1017/s174217050900252x

Union Européenne, 2008. Règlement (CE) n°543/2008 de la Commission du 16 juin 2008 portant modalités d'application du règlement (CE) n°1234/2007 du Conseil en ce qui concerne les normes de commercialisation pour la viande de volaille. *JOUE L 157 du 17.6.2008, p. 46–87*.

Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012R1151

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants

Fichier 3 : Authentification analytique

Auteurs : Elisabeth Baeza-Campone et Sophie Prache (coordination), Joël Gautron, Bénédicte Lebret.

Experts ponctuels : Isabelle Cassar-Malek, Véronique Verrez-Bagnis, Mauro Coppa.

Sommaire

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants 611

2.9 Authentification analytique de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits animaux 612

2.9.1 Authentification des processus utilisés au cours de la chaine alimentaire 613

Méthodes basées sur les protéines 633

2.9.2 Authentification de l'origine 654

2.9.3 Exemples d'application 658

Conclusions 662

Références bibliographiques 663

2.9 Authentification analytique de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits animaux

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Authentification
407 références ont été utilisées dans la section **'Authentification'** pour couvrir **tous les produits étudiés dans l'expertise**, avec à la fois et un **angle orienté sur les objectifs de l'authentification** (dans quelle mesure peut-on authentifier les conditions de production, de transformation et de conservation du produit, ainsi que son origine, en termes d'espèce, de race/souche et d'origine géographique ?) et un **angle méthodologique**. **Un peu plus de la moitié des références (219) datent de moins de 10 ans.** Ces références sont essentiellement des **articles scientifiques (95%),** dont **98% sont référencés dans le Web of Science.**
Les 18 auteurs les plus cités (plus de 10 fois) sont espagnols, français, irlandais, italiens et portugais ; les **auteurs sont donc essentiellement européens**, mais ils font également état de **recherches menées au-delà de l'Europe**. Parmi ces 18 auteurs, il y a 5 scientifiques français de l'INRAE (19% des références). Ces 5 scientifiques ont des compétences variées (différentes filières - produits laitiers ou carnés-, différents composés d'intérêt pour l'authentification ou méthodologiques), mais le **taux d'autocitations** (proportions de publications dont un des auteurs est expert de cette ESCo) **est limité** (10%). Les auteurs irlandais (3, 13% des références) sont du Teagasc et de l'University College Dublin, ils travaillent de longue date sur cette question sur la viande bovine. Les deux auteurs italiens (5% des références) sont des zootechniciens, l'un spécialiste des produits laitiers (Université de Turin), l'autre de la viande ovine (Université de Catane). Ils ont des collaborations de longue date avec les scientifiques français, l'un d'entre eux (M. Coppa) a d'ailleurs été sollicité comme expert ponctuel de cette expertise. Les auteurs espagnols (7 de l'Université Complutense de Madrid, 27% des références) et portugais (Université de Porto) travaillent sur l'authentification de l'espèce animale dont est issu le produit et sur les méthodes de détection de mélanges frauduleux (adultération).
Il y a 15 **revues principales**. Il s'agit de revues **généralistes** de bonne notoriété **en sciences des aliments** (Food Chemistry, Meat Science, JAFC) du domaine des **sciences animales** (JDS, Animal) et du **contrôle** (Food Control), avec aussi quelques revues plus orientées sur les méthodes.

Lorsque l'on cherche à authentifier un processus d'élaboration ou l'origine d'un produit, on pose une question : ce produit est-il conforme à ce qu'il devrait être ? Il n'y a que deux réponses possibles : oui ou non. L'authentification repose donc sur un ensemble de procédés par lesquels on vérifie qu'un produit est conforme à ce qu'il devrait être (Dennis, 1998). L'authentification peut concerner les différentes phases de l'élaboration du produit : le système d'élevage des animaux, dont l'alimentation, les procédés de transformation (par exemple le salage) et de conservation (produit décongelé vendu frauduleusement en tant que produit frais par exemple) et son éventuelle adultération (par exemple, ajout de viande de cheval dans un produit normalement à base de viande de bœuf dans la crise des lasagnes à la viande de cheval, espèce de poisson vendue à la place d'une autre, mélange d'espèces de thonidés dans une conserve de thon) et l'origine (origine géographique, race/souche animale, poisson sauvage/poisson d'élevage).

Les signes de qualité ou indications relatifs au mode d'élevage des animaux et/ou de transformation des produits (agriculture biologique, Label Rouge, plein air, alimentation à l'herbe, etc.) ou à l'origine (AOP, IGP) portent des valeurs particulières pour les consommateurs (naturalité, respect du bien-être animal et de l'environnement, entretien des paysages, qualité des produits, valorisation de territoires, maintien de savoir-faire, etc.). Les acteurs de la chaîne alimentaire cherchent ainsi à valoriser l'aspect 'traditionnel', 'naturel' ou 'durable' de certains systèmes d'élevage et/ou des qualités nutritionnelles supérieures de ces produits (voir sections précédentes du Chapitre 2). Certains signes de qualité s'engagent en effet sur des conditions spécifiques de production, lesquelles ont des effets importants sur la composition, donc les propriétés organoleptiques et nutritionnelles des produits, voire sanitaires, ainsi que sur la durabilité du système d'élevage. On peut citer par exemple : la valorisation d'une certaine proportion d'herbe dans l'alimentation des vaches laitières aux Pays Bas, l'engagement d'au moins 80% d'herbe dans la viande bovine et ovine produite en Irlande pour le marché américain (Bord Bia, 2017) cité par Monahan *et al.* (2018), voire la mention « 100% grass-fed » aux Etats-Unis. Pour l'œuf et les ovoproduits, le système d'élevage est la préoccupation première avec une diminution forte et rapide des systèmes conventionnels pour des systèmes avec parcours extérieur ; les souches génétiques utilisées étant les mêmes dans tous ces systèmes, on recherche donc des marqueurs du système d'élevage. Les éleveurs qui s'engagent sur des conditions spécifiques de production (à travers des cahiers des charges, par exemple) cherchent aussi à se protéger de contrevenants qui pourraient se mettre en position économique favorable en tirant avantage de la plus-value des produits sous signe de qualité mais sans en subir les contraintes correspondantes.

Il y a également des enjeux importants d'authentification lorsque les produits sont transformés. Se posent les questions de l'espèce animale (voire de la race ou du croisement), de l'origine et de la proportion des différents ingrédients utilisés

(exemple sur l'origine du sel pour le salage des jambons secs qui peut constituer un élément d'authentification) et de l'addition frauduleuse d'ingrédients non déclarés (Montowska et Pospiech, 2012a). Pour les viandes et produits de porc, par exemple, certaines charcuteries AOP sont élaborées à partir de porcs de races spécifiques (races locales) élevées en systèmes extérieurs voire extensifs : l'enjeu est alors de garantir l'origine génétique, comme les conditions de production (alimentation) des animaux.

En ce qui concerne le poisson et ses produits transformés, les questions essentielles concernant le contrôle des pêches (et de la pêche illicite non-déclarée et non-réglementée (INN), ou pêche illégale) et l'authentification tout au long de la chaine d'approvisionnement, sont : quelle est l'espèce ? où a-t-elle été capturée ? est-ce un poisson sauvage ou d'élevage ? s'agit d'un individu qui se serait échappé d'un élevage ? [1] (Commission européenne, 2003)

En regard de la plus-value potentielle et du surcoût des produits bruts ou transformés, les producteurs et les consommateurs s'inquiètent donc des risques potentiels de fraude (Primrose *et al.*, 2010), d'où le développement de méthodes analytiques, qui au-delà des contrôles par visite (autocontrôles ou contrôles par des organismes indépendants) ou des documents assurant la traçabilité des matières premières (voir Chapitre 1), permettent de garantir qu'un produit est conforme à ce qui est annoncé sur l'étiquette et/ou aux engagements pris dans un cahier des charges.

2.9.1 Authentification des processus utilisés au cours de la chaine alimentaire

2.9.1.1 Conditions et/ou modes de production de l'animal

Un grand nombre de méthodes analytiques a trouvé des applications pour authentifier les conditions de production des produits animaux, notamment l'alimentation des animaux dont sont issus ces produits, voire le mode ou la méthode de production (biologique vs. conventionnel ; œufs issus de poules élevées en plein air vs. en bâtiments ; poisson sauvage vs. d'élevage) : la composition en acides gras, les composés volatils (tels que les terpènes et les composés phénoliques), les caroténoides, les stéréoisomères de la vitamine E et les isotopes stables de certains éléments. Il est maintenant bien établi que ces constituants des produits sont influencés par l'alimentation de l'animal et que leur analyse dans le produit peut donc être utilisée pour authentifier ces conditions d'alimentation. Plus récemment, la recherche d'indicateurs d'authentification s'est portée sur l'identification de biomarqueurs protéiques de pratiques d'élevage. Par ailleurs, comme la composition des produits détermine leurs propriétés optiques, celles-ci peuvent également être utilisées comme 'signature' d'un régime ou d'un mode de production. Enfin, des approches moléculaires de génomique fonctionnelle ont utilisé les différences d'expression des gènes en fonction des conditions d'élevage pour authentifier celles-ci. Les principales méthodes analytiques utilisées à des fins d'authentification des conditions de production, notamment de l'alimentation, sont la chromatographie (CPG, HPLC), la spectrométrie de masse des rapports isotopiques (SMRI), et les méthodes spectrales (spectrométrie dans le visible, le proche infra-rouge, de fluorescence, Raman).

Discrimination de régimes alimentaires et de systèmes de production contrastés

A partir de traceurs moléculaires et d'isotopes stables

Traceurs moléculaires

Les relations entre l'alimentation des animaux et la teneur de leurs produits en composés tels que les acides gras (AG), les pigments caroténoïdes et la vitamine E sont bien établies (voir section précédentes de ce chapitre). L'alimentation de l'animal a un effet important sur ces teneurs et en conséquence sur les qualités nutritionnelles et sensorielles des produits ; le principe ici est d'utiliser ces différences de composition des produits pour authentifier l'alimentation de l'animal.

a) Composition en acides gras des lipides des produits

Les AG du lait ont une double origine : 60% (≥ 18 atomes de carbone) proviennent de l'alimentation ou de la mobilisation des tissus adipeux et 40% (AG à chaîne courte et moyenne, ≤ 16 atomes de carbone) proviennent de la synthèse de novo mammaire (Chilliard *et al.*, 2007). Les AG impairs et/ou ramifiés représentent une faible part des AG du lait et sont synthétisés par la microflore bactérienne du rumen. Les AG polyinsaturés (AGPI, principalement acides linoléique, LA, et linolénique, ALA)

[1] Un règlement européen régit l'étiquetage des produits issus de la mer et de l'aquaculture. Le règlement (CE) n°1379/2013 du 11 décembre 2013 indique les précisions obligatoires à apporter à la connaissance du consommateur : la dénomination commerciale de l'espèce de poisson et son nom scientifique, la méthode de production (« pêché », « pêché en eaux douces » ou « élevé ») et la zone de pêche ou le pays d'élevage. Le pays d'élevage correspond au pays dans lequel « le produit a atteint plus de la moitié de son poids final ou est resté plus de la moitié de la période d'élevage ». Pour les produits pêchés en eaux douces, la mention des eaux d'origine (nom du fleuve, lac, étangs) dans le pays de provenance doit être indiquée. Les autres mentions obligatoires sont la catégorie de l'engin de pêche et la mention « décongelé ». Des dérogations sont cependant permises (par exemple pour les denrées utilisées comme ingrédient dans une salade composée).

d'origine alimentaire subissent une biohydrogénation ruminale liée à l'activité microbienne, produisant des intermédiaires de la biohydrogénation ruminale (isomères cis et trans des C18:1, C18:2 et C18:3) et l'acide stéarique. Les AGPI n'étant pas synthétisés par les tissus des ruminants, leur concentration dans les tissus et produits dépend des quantités absorbées dans l'intestin, et donc des quantités ayant échappé à l'étape de digestion ruminale. Les différentes composantes de la ration (nature et mode de conservation du fourrage, rapport fourrage/concentré, teneur en amidon de la ration) et la supplémentation lipidique (nature, modalités d'apport, dose et durée de la supplémentation) sont les principaux facteurs alimentaires capables de modifier le métabolisme ruminal des AGPI et par conséquent d'influencer le profil des AG quittant le rumen (Chilliard *et al.*, 2007). Ces mêmes facteurs modifient en partie la synthèse bactérienne dans le rumen des AG mineurs à chaîne impaire et/ou ramifiée (Vlaeminck *et al.*, 2006). L'ensilage de maïs, les céréales ou les concentrés et les graines oléagineuses telles que le soja et le tournesol sont riches en LA, tandis que l'herbe verte et les graines de lin sont les principales sources d'ALA. Le fanage réduit les concentrations des AG totaux et de l'ALA dans l'herbe, les modifications dues à l'ensilage étant intermédiaires (Chilliard *et al.*, 2007). La combinaison des différents facteurs alimentaires induit des variations assez importantes dans la composition du lait en AG. Ainsi, l'herbe pâturée à un stade précoce conduit à des laits plus riches en C18:1cis9 et en acide ruménique (principal isomère des acides linoléiques conjugués dans le lait) et plus pauvres en LA que des rations riches en concentré ou à base d'ensilage de maïs (Ferlay *et al.*, 2006). Les AGPI et les intermédiaires de leur biohydrogénation ruminale, de même que les AG mineurs d'origine bactérienne, sont ainsi susceptibles d'apporter des informations intéressantes pour tracer l'alimentation des animaux.

L'analyse des AG du lait a été utilisée pour distinguer i) les régimes à base d'herbe *vs.* à base de maïs, ii) les régimes à base d'herbe fraîche vs. d'herbe conservée (foin, enrubannage, ensilage), iii) la nature de la prairie pâturée (temporaire vs. permanente) et iv) les produits laitiers issus d'un mode de production biologique vs. conventionnel.

En comparant des laits de citerne issus de fermes où les troupeaux étaient nourris avec plus de 30% ou moins de 25% d'ensilage de maïs. Engel *et al.* (2007) ont montré que les AG étaient les composés traceurs qui présentaient le meilleur pouvoir discriminant. L'intérêt des AG a été confirmé dans des études comparant des laits produits par des troupeaux nourris avec de l'ensilage de maïs vs. de l'ensilage d'herbe (Gaspardo *et al.*, 2010) ou de l'ensilage d'herbe *vs.* au pâturage (Mitani *et al.*, 2016). Dans les fromages, des résultats similaires ont été obtenus par Giaccone *et al.* (2016) et par Segato *et al.* (2017) en comparant plusieurs types de régimes (foin vs. ensilage de maïs vs. pâturage). Coppa *et al.* (2015a) ont confirmé que l'analyse de la composition en AG du lait permettait de discriminer les types d'alimentation d'un grand nombre de fermes en Europe lorsque les régimes sont contrastés ; en revanche, lorsque les régimes sont moins contrastés (régimes mixtes où aucun fourrage n'est dominant), le pouvoir de discrimination des AG se réduit significativement (91% vs. 84% d'échantillons bien classés). Par ailleurs, plusieurs études ont montré que la nature botanique des prairies (temporaire vs. permanente diversifiée) modifiait de façon substantielle le profil en AG du lait (Collomb *et al.*, 2002 ; Coppa *et al.*, 2015c). Néanmoins, compte tenu de la variabilité du profil en AG selon le stade phénologique de l'herbe, sa composition botanique et la conduite du pâturage (Coppa *et al.*, 2015b), il est difficile de calibrer des méthodes de discrimination entre types de prairies qui soient répétables au cours de l'année et fiables à grande échelle.

L'analyse en AG a été aussi utilisée pour discriminer des produits laitiers bio vs. conventionnels (lait : (Butler *et al.*, 2008 ; Butler *et al.*, 2011b ; Slots *et al.*, 2009 ; Stergiadis *et al.*, 2015 ; Stergiadis *et al.*, 2012) ; beurre : (Pustjens *et al.*, 2017)). En effet, les systèmes d'élevage bio sont souvent caractérisés par une gestion du système fourrager plus extensive, basée sur l'utilisation de l'herbe, notamment pâturée, ce qui conduit à des profils en AG différents de ceux de produits issus de systèmes conventionnels intensifs, basés sur une utilisation importante de l'ensilage (et de l'ensilage de maïs en particulier) et de concentrés. Cependant, lorsque lorsque les conditions d'alimentation sont proches dans les 2 modes de production, les profils en AG ne permettent plus cette discrimination (Schwendel *et al.*, 2017; Stergiadis *et al.*, 2015).

Sur la viande de ruminants, l'analyse des AG a été utilisée pour distinguer i) les régimes à base d'herbe vs. à base de concentré et ii) la nature de la prairie pâturée (graminées vs. légumineuses) pour les animaux finis à l'herbe.

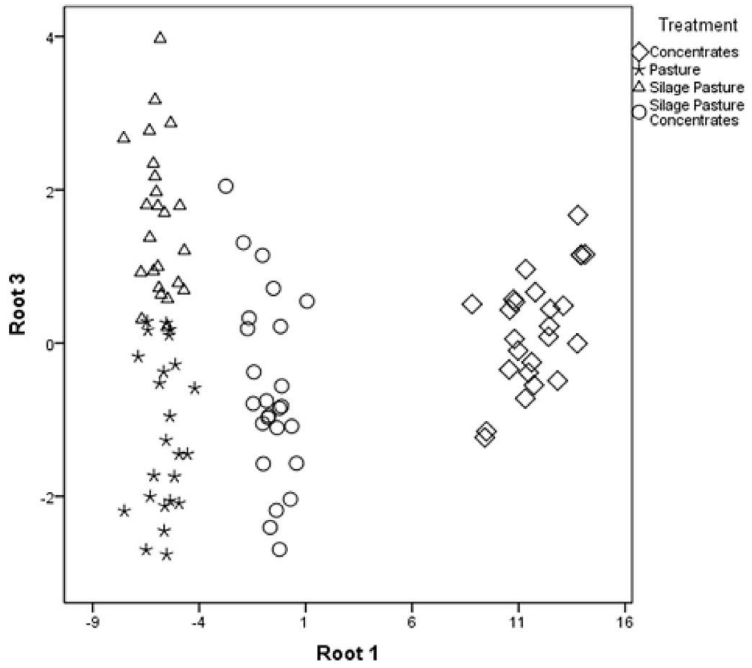


Figure 2.9.1. Analyse discriminante réalisée à partir de l'analyse de la composition en acides gras des lipides de la viande de bovins alimentés selon 4 modalités.

Légende :
Pâturage pendant 1 an (étoiles) *vs.* ration concentrée à base d'orge pendant 1 an (losanges) vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois (triangles) vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois avec une complémentation avec un concentré à base d'orge à raison de 50% de la ration (ronds) (Monahan *et al.*, 2018).

Sur la viande ovine, Aurousseau *et al.* (2004) ont montré que la mesure du profil en acides gras (AG) permettait de discriminer sans erreur les agneaux engraissés à l'herbe des agneaux engraissés en bergerie avec une ration à base de concentré. Sur la viande bovine également, Alfaia *et al.* (2009) ont pu discriminer sans erreur 4 modalités d'alimentation (pâturage vs. ration à base d'orge à l'étable vs. pâturage puis finition à l'étable pendant 2 ou 4 mois avec une ration à base d'orge). De même, une étude irlandaise a montré que la composition en AG pouvait permettre de discriminer avec une fiabilité de 92,9% la viande de bovins alimentés selon 4 modalités : pâturage pendant 1 an vs. ration concentrée à base d'orge pendant 1 an vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois avec une complémentation avec un concentré à base d'orge à raison de 50% de la ration (Figure 2.9.1) (Monahan *et al.*, 2018). Les échantillons mal classés provenaient d'animaux exclusivement au pâturage, qui étaient considérés comme ayant consommé de l'herbe ensilée puis pâturée. L'erreur de classification n'était donc pas majeure si l'objectif était d'authentifier l'origine herbagère de la viande, et lorsque les animaux ayant consommé uniquement de l'herbe (pâturée ou ensilée) étaient regroupés, tous les échantillons étaient bien classés.

Sur de la viande de veaux élevés selon les cahiers des charges IGP et AOP, Monteiro *et al.* (2012) ont bien classé 82 à 87% des échantillons. Pour de la viande bovine produite selon un système de production 'traditionnel' ou biologique, Dias *et al.* (2008) ont obtenu une proportion d'échantillons bien classés de 100% (mais sans réaliser de validation croisée). Ces études et celle de Moloney *et al.* (2018) montrent que le profil en AG peut aussi être utilisé pour distinguer de la viande bovine produite à partir d'animaux alimentés sur des prairies de natures différentes (par exemple, prairies de graminées vs. graminées + trèfle blanc, (Moloney *et al.*, 2018)).

Il faut signaler une possible source de confusion et donc une limite à l'utilisation du profil en AG comme indicateur d'une production à base d'herbe : certaines sources d'AG autres que l'herbe, par exemple les graines de lin, peuvent donner des teneurs en C18:3 n-3, C18:2 n-6 et CLA dans les produits similaires à celles obtenues à l'herbe (Shingfield *et al.*, 2013). Malgré cela, Hurtaud *et al.* (2014) ont montré que de petites différences en AG (isomères de C18:1 notamment, + 0,25 g/100 g AG) étaient suffisantes pour distinguer le lait issu du pâturage du lait issu d'une ration d'ensilage de maïs supplémentée avec des graines de lin (Figure 2.9.2).

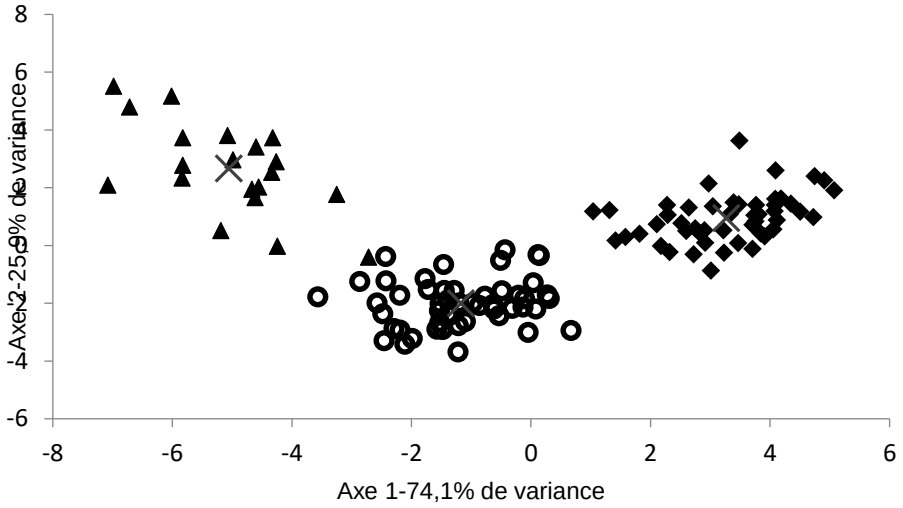


Figure 2.9.2. Analyse discriminante réalisée sur des échantillons de lait issus de vaches alimentées selon 3 modalités.

Légende :

« Pâture » (triangles) : plus de 70% d'herbe fraîche dans la ration durant la saison de pâturage et plus de 70 de foin ou d'ensilage d'herbe dans la ration durant la phase de stabulation hivernale ; « Maïs » (ronds) : plus de 35% d'ensilage de maïs dans la ration (saison de pâturage) et plus de 60% d'ensilage de maïs dans la ration (phase de stabulation hivernale) ; « Maïs + graines de lin » (losanges) : ration similaire à « Maïs » + 3% de graines de lin extrudes. Adapté de Hurtaud *et al.* (2014).

Sur la viande de porc, Oliveira *et al.* (2015) ont obtenu un excellent niveau de discrimination (100%) entre de la viande biologique vs. non biologique issue d'élevage conventionnel ou sur parcours à partir de l'analyse des AG. Selon cette étude, le profil en AG conduit à un meilleur taux de prédiction d'appartenance à la catégorie de viande (bio / parcours/ conventionnel) que le profil en composés volatils ou non volatils (voir 2.9.1.d). Ces très bons résultats peuvent s'expliquer par la très bonne association entre la composition de la ration et le prodil en AG des tissus chez les monogastriques, où les AGPI alimentaires peuvent être déposés directement dans les tissus sans modification biochimique, contrairement aux ruminants (Nurnberg *et al.*, 1998).

Chez les volailles, l'analyse des AG de la viande ne permet plus la distinction des systèmes de production. Avant 2001, un critère de démarcation de la qualité nutritionnelle des poulets Label Rouge par rapport aux poulets standards était une proportion d'AGPI dans la viande plus importante (30,9 *vs.* 27,2% dans les aiguillettes, (Girad *et al.*, 1993). L'alimentation des poulets Label Rouge ne contenait que des huiles végétales comme exigé par le cahier des charges alors que celle des poulets standards contenait une proportion non négligeable de matières grasses d'origine animale. Depuis 2001, le remplacement des matières grasses d'origine animale (suif et saindoux) par des huiles végétales (colza, soja ou lin) dans l'alimentation des volailles a eu pour effet d'accroitre la proportion d'AGPI dans leur viande. A présent, ce sont les poulets standards qui présentent une viande plus riche en AGPI que les poulets Label Rouge (30,02 *vs.* 21,21% dans le filet, (Chartrin *et al.*, 2005)), du fait d'un apport alimentaire plus important (teneur en lipides des régimes pour poulets standards plus élevée que celle des régimes pour poulets Label Rouge) et d'une teneur en lipides de la viande plus importante également (1,25 *vs.* 1,18%, (Chartrin *et al.*, 2005)). Enfin, il faut signaler la démarche « bleu, blanc, cœur » basée sur l'enrichissement des produits animaux en ALA, la teneur étant définie à l'avance puis contrôlée dans les produits.

A partir d'œufs prélevés en ferme aux Pays Bas (œufs issus de poules bio, en plein air et en cages), une étude a réussi à bien classer 92% et 87,5% des œufs biologiques *vs.* conventionnels à partir du profil en AG du jaune (Tres *et al.*, 2011). Toutefois, dans la mesure où le système d'élevage n'est pas associé à un apport spécifiquement défini en termes de lipides, les différences observées présentent le risque d'être ponctuelles et non reproductibles d'un élevage à un autre au sein d'un même mode d'élevage, et ainsi de manquer de généricité.

Chez le poisson, il a été proposé que la teneur en lipides de la chair et l'analyse de leur composition en AG pourraient être utilisées pour distinguer le poisson sauvage du poisson d'élevage. Les poissons d'élevage présentent en général une teneur plus élevée en lipides et un profil en AG différent, ainsi qu'une valeur du rapport n-6/n-3 plus élevée résultant de l'incorporation et de l'accumulation des AG présents dans le régime alimentaire (huiles végétales dans les aliments pour poisson d'élevage). La majorité des études montrent des différences significatives pour l'acide linoléique, l'acide arachidonique, le DHA et l'EPA (Ferreira *et al.*, 2010 ; Lenas *et al.*, 2011 ; Ottavian *et al.*, 2012; Sharma *et al.*, 2010 ; Simat *et*

al., 2012). En utilisant des analyses multivariées, Fasolato *et al.* (2010) ont ainsi montré qu'il était possible de différencier le bar sauvage *vs.* d'élevage, avec 1 seul échantillon mal classé sur 39, soit 97,4% d'échantillons bien classés. De même, une étude a montré qu'il serait possible de distinguer le caviar issu d'esturgeons sauvages *vs.* d'esturgeons d'élevage par l'analyse de leur composition en AG du fait de la différence d'alimentation (Gessner *et al.*, 2008). Néanmoins ces auteurs notent qu'il n'est pas facile d'authentifier les esturgeons d'aquaculture si les poissons ont été nourris avec des sources alimentaires « naturelles ». Il faut aussi signaler une très grande variabilité dans la composition des ingrédients utilisés dans les aliments pour poissons, et notamment des huiles de poisson. Gessner *et al.* (2008) ont suggéré, pour pallier le problème dans le cas précis du caviar, d'incorporer à l'aliment des esturgeons d'élevage des AG spécifiques qui permettraient de « marquer » le caviar provenant d'esturgeons d'aquaculture. Cette addition de « marqueurs » dans les aliments pour tracer les poissons d'élevage ne semble cependant pas très réaliste pour être appliquée à l'échelle mondiale. De même que l'hétérogénéité de la composition des aliments conduit à une hétérogénéité de la composition en AG des poissons d'élevage, les poissons sauvages montrent aussi une très grande variabilité dans leurs profils en AG selon la saison, le régime alimentaire et la zone de pêche. Tout ceci concourt à utiliser avec précaution la seule composition en AG pour différencier le poisson sauvage du poisson d'élevage.

b) Stéréoisomères de la vitamine E

L'analyse des stéréoisomères de la vitamine E dans les produits animaux peut renseigner sur les sources de vitamine E alimentaire -naturelle ou synthétique- (Meglia *et al.*, 2006). Röhrle *et al.* (2011a) ont ainsi montré que le stéréoisomère RRR dominait dans la viande de bovins alimentés à l'herbe (vitamine E naturelle), alors que les 8 stéréoisomères étaient présents dans la viande d'animaux alimentés avec des concentrés et recevant un complément de vitamine E synthétique. De même, le lait produit à l'herbe contient plus de stéréoisomère RRR que le lait produit avec des fourrages conservés (Butler *et al.*, 2011a).

c) Caroténoïdes

Les caroténoïdes forment le principal groupe de pigments naturels ; la lutéine est le seul stocké dans le tissu adipeux des ovins, les bovins accumulant également (et surtout) le ß-carotène (Prache *et al.*, 2003a ; Rohrle *et al.*, 2011b). Les ruminants ne stockent pas la zéaxanthine, caroténoïde majoritaire du maïs (elle est en revanche stockée par les volailles). La concentration de ces pigments dans les tissus et produits est liée à la quantité de caroténoïdes ingérée par l'animal (Calderon *et al.*, 2007 ; Dian *et al.*, 2007b). L'herbe verte est très riche en ces pigments ; leur teneur dans le fourrage diminue avec le séchage et la durée de conservation en liaison avec le degré d'exposition à la lumière, car ces pigments sont photodégradables. Les teneurs observées dans l'ensilage pré-fané sont d'environ 60% (à 28% de MS) à 30% (à 35% de MS) de celles observées initialement dans l'herbe verte : elles sont d'environ 30% pour l'enrubannage et 20% pour le foin (Noziere *et al.*, 2006). La plupart des aliments concentrés sont très pauvres en lutéine et ß-carotène.

C'est pourquoi ces pigments ont été proposés, chez les ruminants, pour <u>discriminer une alimentation à l'herbe d'une alimentation à base de concentré ou d'ensilage de maïs</u> (Prache et Theriez (1999) pour la viande ovine ; Rohrle *et al.* (2011b) pour la viande bovine ; Noziere *et al.* (2006) ; Engel *et al.* (2007) ; Stergiadis *et al.* (2012) sur le lait de vache). Ces pigments ont également été utilisés pour distinguer les produits laitiers <u>bio vs. conventionnels</u> (Butler *et al.*, 2008 ; Butler *et al.*, 2011b ; Slots *et al.*, 2009 ; Stergiadis *et al.*, 2015; Stergiadis *et al.*, 2012). La teneur du lait en caroténoïdes est en général nettement supérieure en système bio *vs.* conventionnel pendant la saison de pâturage, en lien avec les différences de proportion d'herbe fraîche dans la ration (plus faible voire nulle en conventionnel). Cependant, ces différences ne sont pas systématiques, car certains systèmes conventionnels peuvent être très herbagers. Par ailleurs, pendant la phase d'alimentation hivernale en stabulation, on n'observe plus de différences dans la teneur en caroténoïdes, car les systèmes bio utilisent alors généralement du foin pour l'alimentation des vaches.

Dans ces études, les caroténoïdes sont dosés directement par HPLC ou indirectement à partir du spectre de réflectance du tissu adipeux, du lait ou du fromage. Prache et Thériez (1999) ont montré que les caroténoïdes, mesurés sur le plasma ou via le spectre de réflectance du tissu adipeux, permettaient de discriminer la <u>viande d'agneaux</u> d'herbe de celle d'agneaux de bergerie. Ils ont proposé de calculer un index spectrocolorimétrique (IS) à partir du spectre de réflectance dans la zone d'absorption de la lumière par les caroténoïdes, index qui permet de quantifier l'intensité de la « signature » de ces pigments et donc d'estimer leur concentration ((Prache *et al.*, 2003a) ; Figure 2.9.3). Ce procédé simple, portable, rapide et peu coûteux a été étendu à la viande bovine et aux produits laitiers (Noziere *et al.*, 2006 ; Prache *et al.*, 2007; Serrano *et al.*, 2006). Ces résultats et ce procédé ont ensuite été confirmés sur des bases de données plus importantes comportant plusieurs races d'ovins (Prache *et al.*, 2018), ainsi que dans d'autres pays (Irlande, Espagne et Italie) et sur différents produits laitiers et carnés. En Irlande, par exemple, la même analyse du spectre de réflectance a permis de discriminer la viande de bovins nourris pendant 12 mois à l'herbe ou avec un concentré à base d'orge (Rohrle *et al.*, 2011b).

Il faut préciser que l'enrichissement en caroténoïdes différant entre dépôts adipeux, la fiabilité de la discrimination dépend du site de la mesure (Dian *et al.*, 2007b). De plus, à même niveau d'ingestion de caroténoïdes, il peut y avoir des différences entre races dans l'intensité de la signature de ces pigments dans le tissu adipeux (Macari *et al.*, 2017). Malgré ces différences, une étude récente sur plus de 1 000 agneaux de 3 races montre que l'on perd peu de fiabilité de discrimination entre agneaux d'herbe et de bergerie si l'on regroupe les données des 3 races par rapport à un traitement par race (Prache *et al.*, 2018). Concernant le lait, la teneur en caroténoïdes du lait de vaches au pâturage est assez variable au cours de la saison (Calderon *et al.*, 2006 ; Stergiadis *et al.*, 2015). Elle diminue nettement avec le stade de maturité de l'herbe, pouvant même atteindre des niveaux proches de ceux obtenus avec des vaches nourries au foin, surtout si ce dernier est séché en grange (Noziere *et al.*, 2006). Elle dépend aussi de la conduite du pâturage et de la nature botanique des prairies (Calderon *et al.*, 2006 ; Marino *et al.*, 2014). Cette importante variabilité génère ainsi un bruit de fond qui limite l'utilisation des seuls caroténoïdes pour l'authentification à grande échelle de l'origine herbagère du lait. Un autre point de vigilance doit être signalé : il est possible d'ajouter des caroténoïdes dans la ration des animaux à l'auge (en utilisant par exemple du concentré de luzerne, (Macari *et al.*, 2017). Ces limites et sources de biais concernent cependant la plupart des composés marqueurs de l'alimentation à l'herbe.

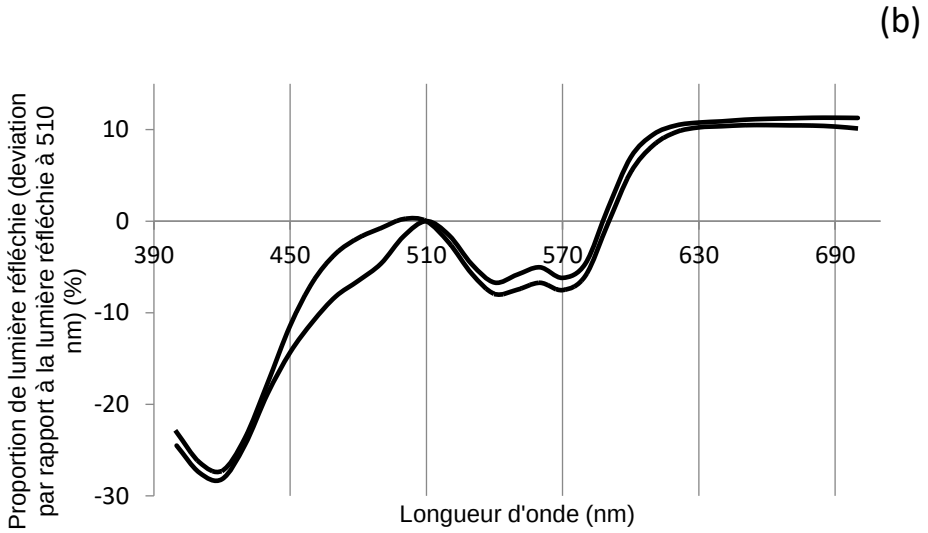


Figure 2.9.3. Spectre de réflectance moyen du tissu adipeux périrénal d'agneaux de race Romane alimentés au pâturage (trait plein) ou en bergerie avec une ration à base de concentré (trait pointillé). L'index spectrocolorimétrique (IS) est la valeur absolue de la surface comprise entre la courbe et l'axe X dans la zone 450 à 510 nm, zone d'absorption de la lumière par les pigments caroténoïdes. Cet index, plus élevé chez les agneaux d'herbe que les agneaux de bergerie, est une estimation indirecte de la teneur du tissu adipeux en pigments caroténoïdes (Huang *et al.*, 2015b).

Chez les volailles, l'analyse des pigments caroténoïdes pour différencier les poulets élevés avec ou sans accès à un parcours est peu informative, car les aliments sont souvent supplémentés en pigments caroténoïdes afin de colorer la peau en jaune, en particulier dans les systèmes alternatifs. Ces pigments liposolubles peuvent aussi être apportés par différentes matières premières qui rentrent dans la composition des aliments tels que le maïs ou les micro algues.

Le profil en caroténoïdes du jaune d'œuf a été utilisé avec succès pour reconnaître le mode d'élevage dont les œufs sont issus (bio, plein air et cages, 100%, 100% et 84% d'œufs bien classés ; (van Ruth *et al.*, 2011). Les œufs bio présentent une teneur supérieure en lutéine/zéaxanthine et inférieure en cantaxanthine par rapport aux œufs de poules en plein air ou en cages ; les œufs de poules en plein air présentent des teneurs plus faibles en bêta-cryptoxanthine et citranaxantine que les œufs de poules en cage. Cette méthode a ensuite été testée à grande échelle sur des œufs produits en Europe, ainsi qu'au Canada, en Israel, Norvège et Turquie (van Ruth *et al.*, 2013). Dans les pays européens, cette méthode a permis de bien classer les œufs bio de 39 fermes sur 40 (98%) et les œufs conventionnels de 27 fermes sur 29 (93%). Pour les élevages hors-Europe, seulement 17 des 25 fermes biologiques ont été bien classées (68%), des erreurs de classification ayant été observées en Turquie. Les caroténoïdes, responsables de la couleur du jaune, dépendent de l'alimentation de la poule. Les poules ne transfèrent pas le bêta-carotène, mais les xanthophylles (Nys, 2000). Leur transfert dans les tissus cibles (graisse, jaune d'œuf) dépend de la nature du caroténoïde et de sa structure (forme cis ou trans). Les principales sources naturelles sont le maïs, la luzerne et les extraits de fleurs (soucis, tagètes) pour le jaune, le paprika pour le rouge (Nys, 2000). Les formes de synthèse ou issues d'extraits de plantes sont saponifiées puis encapsulées pour les protéger. Le système d'élevage peut affecter le

profil en caroténoïdes s'il est associé à un apport (ou interdiction d'apport) particulier alimentaire. Par exemple, la cantaxanthine est interdite en élevage biologique, ce qui explique que les œufs bio présentent des teneurs plus faibles en ce pigment. Par ailleurs, les poules ayant un accès à un parcours extérieur ingèrent de l'herbe, source de pigments (Hammershoj et Johansen, 2016). Toutefois, la lutéine apportée par l'herbe peut aussi être fournie par du maïs (utilisé dans tous les types de productions). C'est pourquoi, dans la littérature, les résultats concernant l'influence du système d'élevage sur la composition de l'œuf, dont la couleur du jaune, sont inconstants et très variables (Dvorak *et al.*, 2010 ; Nys *et al.*, 2018)

Chez le poisson, les caroténoïdes sont présents dans la peau, les yeux, le foie, la chair, les œufs, les gonades et la laitance. La couleur de la chair du saumon et de la truite est principalement due à l'astaxanthine (naturelle et de synthèse) qui peut être ajoutée dans les aliments pour les salmonidés. Toutefois, l'utilisation de l'astaxanthine est règlementée pour l'alimentation des poissons en aquaculture biologique : elle doit provenir principalement de sources organiques, telles que les coquilles de crustacés élevés eux-aussi en élevage bio, pour être utilisée dans le régime alimentaire du saumon et de la truite ; si des sources organiques ne sont pas disponibles, des sources naturelles, telles que la levure Phaffia, peuvent être utilisées ; les pigments synthétiques ne sont pas autorisés. Dans une étude réalisée sur 58 saumons fumés ou marinés, Molkentin *et al.* (2015) ont montré que l'analyse du profil des isomères libres de l'astaxanthine permettait de distinguer clairement le saumon d'élevage conventionnel (astaxanthine de synthèse dans l'alimentation) du saumon sauvage (astaxanthine naturelle dans l'alimentation) ; quant au saumon d'élevage bio, il présente des profils variables qui ne permettent pas toujours de l'authentifier.

d) Composés volatils

Les composés volatils du lait et de la viande ou des produits transformés sont extraits par la technique d'espace de tête puis analysés par le couplage de la chromatographie en phase gazeuse et de la spectrométrie de masse (Engel et Ratel, 2018). Parmi les composés volatils de la viande et des produits laitiers, les AG à chaîne ramifiée, les lactones, les aldéhydes, les indoles, la 2,3-octanedione, les terpènes et les composés soufrés sont les plus influencés par la ration (en particulier alimentation à l'herbe vs. au concentré (Vasta et Priolo, 2006) et vs. les fourrages conservés (Abilleira *et al.*, 2011; Croissant *et al.*, 2007). Certains de ces composés peuvent être des constituants volatils de la ration qui sont directement incorporés dans les tissus (terpènes) ; d'autres, comme le scatol et l'indole, sont issus du métabolisme de l'animal ; d'autres, enfin, comme certains composés soufrés ou certains produits d'oxydation des lipides, sont générés lors de la cuisson de la viande ou du chauffage du lait en cuve pendant les traitements thermiques ou la fabrication fromagère. Les phénomènes de protéolyse et de lipolyse qui se produisent naturellement lors de l'élaboration du jambon sec conduisent à la production de nombreux composés volatils qui concourent à l'élaboration des caractéristiques sensorielles des produits : alcanes, aldéhydes, cétones, alcools, esters… Leur nature et proportion relative dépend notamment de la composition biochimique (notamment le profil en AG) de la viande et du tissus gras et des conditions d'élaboration du produit (Andres *et al.*, 2005; Gandemer, 2002).

Chez les ruminants, l'analyse des composés volatils dans les produits a été utilisée pour distinguer i) les régimes à base d'herbe vs. de concentré (notamment pour la viande) ii) les régimes à base d'herbe fraîche vs. d'herbe conservée (foin, enrubannage, ensilage), notamment pour les produits laitiers et ii) la nature de la prairie pâturée (riche vs. pauvre en biodiversité), notamment pour les produits laitiers.

Coppa *et al.* (2011) ont identifié 8 composés qui discriminent le lait issu de vaches au pâturage de celui issu de vaches nourries avec du foin. De même, Bergamaschi *et al.* (2015) et Faulkner *et al.* (2018) ont relevé des différences de profil en composés volatils du lait de vaches ayant consommé ou pas de l'ensilage. De plus, comme les régimes alimentaires sont souvent différents entre systèmes d'élevage biologique vs conventionnels, certains auteurs ont pu identifier des composés volatils dans le lait permettant de discriminer lait bio vs conventionnel (Liu *et al.*, 2018). Cependant, comme cette discrimination est liée à des différences dans le régime alimentaire plutôt qu'au mode de production stricto sensu, elle est beaucoup moins fiable quand les conditions d'alimentation sont proches entre systèmes bio et conventionnels (saison de pâturage et systèmes herbagers).

Vasta *et al.* (2007) ont également identifié 33 composés volatils significatifs (à partir d'un total de 114 présents dans la viande) qui pouvaient contribuer à discriminer la viande d'agneaux au pâturage de celle d'agneaux alimentés au concentré. Dans une comparaison de 4 modalités d'alimentation de bovins (pâturage pendant 1 an vs. ration concentrée à base d'orge pendant 1 an vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois + un concentré à base d'orge à raison de 50% de la ration), Vasta *et al.* (2011) ont identifié 4 composés (scatol, 3-undecanone, alcool cuminique et 2 methyl-1-butanol) permettant de discriminer la viande des animaux nourris uniquement avec de l'herbe de celle issue d'animaux recevant du concentré (Figure 2.9.3). Le Germacrene D, en particulier, un terpenoïde, était un bon marqueur de l'alimentation à l'herbe. A partir de la mesure de la 2,3-octanedione, du scatol et

des terpènes dans le tissu adipeux, Serrano *et al.* (2011) ont discriminé sans erreur la viande de veaux allaités et complémentés soit avec du foin, soit avec de l'herbe fraîche coupée, soit avec de l'herbe fraîche pâturée. Au-delà de l'alimentation à l'herbe, les terpènes ont également été proposés comme marqueurs du pâturage de prairies permanentes riches en dicotylédones (Abilleira *et al.*, 2011; Agabriel *et al.*, 2007).

Il faut toutefois signaler que l'enrichissement en composés volatils dans les lipides des ruminants n'est pas uniforme entre les différentes fractions lipidiques, et qu'ainsi la sélection d'une fraction lipidique particulière peut être importante dans la qualité de la discrimination (Serrano *et al.*, 2007a). Par ailleurs, le profil terpénique des aliments peut varier largement sous l'effet de différents facteurs. Pour les prairies notamment, ce profil est très dépendant de la composition botanique (De Noni et Battelli, 2008 ; Fedele *et al.*, 2005 ; Valdivielso *et al.*, 2017), du stade de l'herbe (Tornambe *et al.*, 2006) et des choix alimentaires des animaux, qui dépendent de la conduite du pâturage (pâturage tournant vs. continu, pâturage plus ou moins intensif, etc. (Coppa *et al.*, 2011; Fedele *et al.*, 2005). Le profil terpénique des produits présente alors une spécificité difficilement compatible avec la généricité recherchée dans les modèles d'authentification de l'alimentation des animaux. Ceci constitue une difficulté importante pour établir des relations robustes, généralisables et stables entre la ration consommée par l'animal et le profil en composés volatils dans ses produits. On peut cependant relever que certains terpènes (paracymène, β-caryophyllène et trans-cadina-1(6), 4-diène) ou d'autres composés volatils (toluène et plusieurs composés soufrés) ont été identifiés de manière récurrente comme des marqueurs de l'alimentation au pâturage (Coppa *et al.*, 2011; Engel *et al.*, 2007 ; Vasta et Priolo, 2006). Enfin, comme ces analyses sont longues et coûteuses, elles ont été généralement réalisées sur un faible nombre d'échantillons et il reste à préciser la fiabilité de la discrimination sur des effectifs plus importants. Observer un effet significatif du régime sur les teneurs en certains composés n'est en effet pas suffisant dans un objectif d'authentification. Il est indispensable de déterminer la proportion d'échantillons correctement attribués à chaque régime. Le scatol et l'indole, par exemple, ont souvent été proposés pour authentifier la viande d'agneau ou le lait produits à l'herbe (Coppa *et al.*, 2011; Vasta et Priolo, 2006). Si certaines études observent effectivement que ces composés sont très discriminants (Coppa *et al.*, 2011; Rivaroli *et al.*, 2019), d'autres études sur la viande montrent que ces composés peuvent également être détectés chez des agneaux de bergerie (Devincenzi *et al.*, 2019), voire que leur teneur n'est pas différente entre agneaux d'herbe et de bergerie (Priolo *et al.*, 2004). De plus, il faut veiller aux biais possibles liés à la production par la flore microbienne de composées volatils pendant l'affinage des fromages. Par ailleurs, des extraits végétaux ou les huiles essentielles riches en certains composés volatils (terpènes notamment) sont fréquemment utilisés dans l'alimentation des ruminants (Serrano *et al.*, 2007a) ou en application cutanée sur la mamelle, ce qui peut limiter l'intérêt de ces composés comme traceurs de l'alimentation. Enfin, ces composés ont deux autres grandes limites : i) les techniques d'extraction présentent encore des limites importantes, en termes de capacité de piégeage des composés volatils et de répétabilité analytique, ii) les marqueurs potentiels ayant été identifiés sur un faible nombre d'échantillons, des questions se posent donc sur leur généricité et leur robustesse dans d'autres contextes et en conditions « réelles » (Engel et Ratel, 2018).

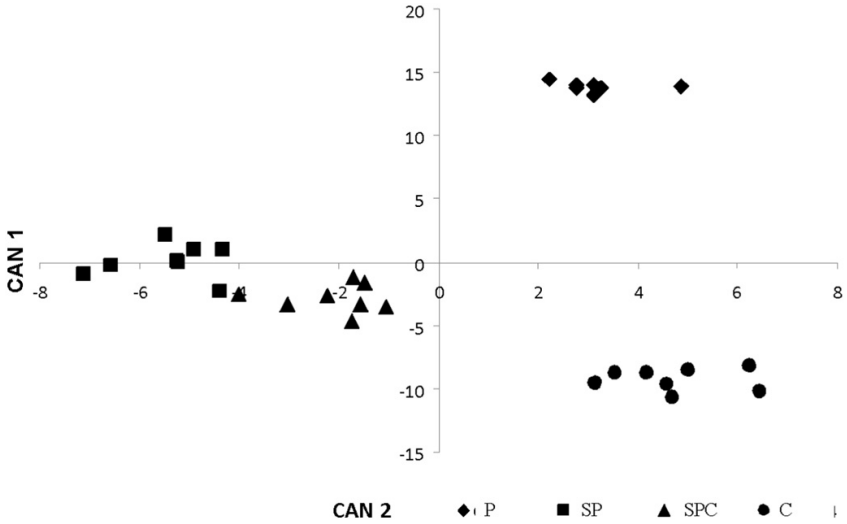


Figure 2.9.4. Analyse discriminante réalisée à partir de 16 composés volatils extraits d'échantillons de viande de bovins alimentés selon 4 modalités.

Légende:
Pâturage pendant 1 an (losanges) vs. ration concentrée à base d'orge pendant 1 an (ronds) vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant

6 mois (carrés) vs. herbe ensilée pendant 6 mois puis pâturée pendant 6 mois avec une complémentation avec un concentré à base d'orge à raison de 50% de la ration (triangles) (Vasta *et al.*, 2011).

L'analyse des composés volatils de jambons secs a été mise en œuvre depuis plusieurs années pour caractériser les molécules participant à la flaveur des produits (Berdague *et al.*, 1991) puis ensuite pour les distinguer en fonction des processus d'élaboration mis en œuvre au stade de l'élevage des animaux ou de la transormation des produits. Ainsi, Sanchez-Pena *et al.* (2005) ont pu distinguer des jambons secs espagnols (incluant des jambons de porcs de race Ibérique ou Large White) de jambons secs français (majoritairement de porcs de Large White) à partir de la quantification de quatre composés volatils (méthyle benzene et octanol dans le tissu adipeux, et 2-butanone et 2-octanone dans le muscle Semitendineux). En outre, la quantification de seulement deux composés (octanol dans le tissu adipeux et 3-methyl 1-butanol dans le muscle biceps femoris) permettait de classer correctement tous les échantillons de porcs Ibériques relativement aux autres. Sur des jambons secs ibériques, Martin-Gomez *et al.* (2019) sont parvenus à classer correctement 91,7% des jambons issus de porcs finis en extérieur à l'herbe et aux glands vs. issus de porcs finis à l'extérieur mais nourris essentiellement d'aliments et sans glands, à partir de l'analyse des composés volatils de leur tissu adipeux. Dans cette étude le tissu adipeux était prélevé à l'aide d'une aiguille de manière non destructive, ce qui constitue un avantage majeur pour la caractérisation de ces produits de très haute valeur économique, les composés volatils étant ensuite analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de mobilité ionique (GC-IMS).

Le système de production des volailles repose surtout sur la souche en lien avec l'âge des animaux à l'abattage, l'alimentation, et l'accès ou non à un parcours. Ratel *et al.* (2009), à partir de l'analyse des composés volatils du gras abdominal de poulets Label Rouge abattus à 84 jours et de Géline de Touraine abattues à 84 et 120 jours, ont montré que 24 composés permettaient de distinguer les Gélines abattues à 84 vs. 120 jours et que 70 composés permettaient de distinguer les Gélines, indépendamment de leur durée d'élevage vs. les poulets Label Rouge. Cette étude suggère que les composés volatils permettent de distinguer des différences liées au génotype et à la durée d'élevage et pourraient être utilisés pour authentifier des produits dont le caractère distinctif repose sur ces critères.

e) Composés phénoliques

Chez les ruminants, l'analyse des composés phénoliques dans les produits laitiers a été utilisée pour distinguer i) les régimes à base d'herbe vs. à base de maïs, ii) les régimes à base d'herbe fraîche vs. d'herbe conservée (foin, enrubannage, ensilage) et ii) la nature des fourrages conservés consommés. Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires de plantes, qui peuvent être transférés au lait ou à la viande, tels quels ou après avoir été partiellement transformés par les bactéries du rumen ou par le métabolisme de l'animal. Ces composés sont spécifiques à chaque espèce végétale (Fraisse *et al.*, 2007) et les prairies naturelles montrent des profils différents selon leur composition botanique (Reynaud *et al.*, 2010). Besle *et al.* (2010) ont montré que le profil en composés phénoliques du lait permettait de nettement discriminer les régimes à base de foin, d'ensilage d'herbe, d'ensilage de maïs et d'herbe pâturée. Des composés du groupe des carboline ont été proposés comme marqueurs de l'ensilage (quelle que soit la nature de celui-ci), alors que des composés du groupe des glycinamide, notamment l'acide hippurique, ont été proposés comme marqueurs du pâturage (Carpio *et al.*, 2013 ; Rouge *et al.*, 2013). Ces composés restent cependant très peu connus dans les produits animaux et ils sont très variables selon la composition botanique de l'herbe, son stade phénologique et les modalités de sa conservation, ainsi que la conduite du pâturage (Fraisse *et al.*, 2007 ; Reynaud *et al.*, 2010)). Les mêmes limites que celles concernant les composés volatils sont donc à signaler.

f) La composition isotopique des produits

Les rapports d'isotopes stables des principaux atomes constitutifs des molécules des tissus et des produits animaux (C, N, H, O, S et Sr) dépendent de la composition isotopique de la ration (aliments et eau) ingérée par les animaux. Ces éléments sont présents sous différentes formes, les isotopes, qui diffèrent par le nombre de neutrons. La proportion d'isotopes stables dans un régime donné est modulée par les conditions de production (nature et proportion des aliments constitutifs de la ration, apport de fertilisants et leur nature) et environnementales (latitude, altitude, proximité de la mer, âge et composition des roches du sous-sol). Les rapports d'isotopes stables sont mesurés par spectrométrie de masse à rapport isotopique (SMRI), l'analyse peut être réalisée sur le produit entier, mais aussi sur certains constituants ciblés du produit, comme l'eau, les protéines, les lipides, et certains acides aminés (Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2016). Pour les éléments lourds (par exemple isotopes du strontium), le dosage est réalisé par torche à plasma couplée à un spectromètre de masse. Par convention, la valeur du rapport d'isotopes stables d'un élément pour un échantillon donné est rapportée à la valeur standard mesurée sur un produit de référence et exprimé sous la forme d'un indice δ exprimé en *per mil*. Par exemple pour la proportion d'isotopes stables de l'azote, où le produit de référence est l'air, $\delta^{15}N = ([(^{15}N/^{14}N_{échantillon}) - (^{15}N/^{14}N_{air})] / (^{15}N/^{14}N_{air})) \times 1000$ (Kelly *et al.*, 2005).

L'analyse des proportions d'isotopes stables s'est révélée particulièrement utile pour la caractérisation de l'histoire alimentaire de l'animal. Elle a été utilisée sur les produits laitiers (Auerswald *et al.*, 2015 ; Bahar *et al.*, 2005 ; Bong *et al.*, 2010 ; Capuano *et al.*, 2013 ; Guo *et al.*, 2010 ; Heaton *et al.*, 2008 ; Kornexl *et al.*, 1997 ; Nakashita *et al.*, 2008 ; Renou *et al.*, 2004a; Renou *et al.*, 2004b ; Valenti *et al.*, 2017), de porc (Barre *et al.*, 2020; Gonzalez-Martin *et al.*, 1999 ; Zhao *et al.*, 2016a), d'agneau (Devincenzi *et al.*, 2014 ; Macari *et al.*, 2017; Moreno-Rojas *et al.*, 2008 ; Perini *et al.*, 2009 ; Piasentier *et al.*, 2003 ; Prache *et al.*, 2009), de volailles (Franke *et al.*, 2008) , de poisson (Li *et al.*, 2016; Vinci *et al.*, 2013) et la crevette (Gamboa-Delgado *et al.*, 2014), ainsi que sur l'œuf (Rogers, 2009).

Les compositions isotopiques en C et N des produits animaux peuvent être reliées au système de production, par exemple à l'utilisation de plantes en C3 vs. C4 (voies photosynthétiques différentes), pâturage vs. systèmes à base de céréales ou système biologique vs. conventionnel (Kaffarnik *et al.*, 2014 ; Osorio *et al.*, 2011a ; Schmidt *et al.*, 2005). Ainsi, Piasentier *et al.* (2003) en mesurant $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ dans le muscle Longissimus thoracis d'agneaux originaires de 6 pays européens et élevés selon 3 grands systèmes de production pendant la finition (allaitement exclusif, pâturage sans complémentation, alimentation avec un régime à base de maïs grain) ont réussi à discriminer ces systèmes de production avec une fiabilité de 91,7%. De même, Zhao *et al.* (2016a) ont pu discriminer à 100% des viandes porcines issus de l'agriculture biologique par rapport à des viandes issues de systèmes conventionnels en considérant les rapports d'isotopes stables du carbone et de l'azote $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ dans la viande délipidée. Toutefois, il faut signaler que même si la composition en isotopes stables des bioéléments des tissus et produits animaux est fortement influencée par la composition de la ration, il y a un certain écart de composition isotopique entre le régime et les tissus/produits animaux, appelé fractionnement isotopique (ou discrimination isotopique ou saut trophique, pour les écologues). Cet écart a été quantifié à 3,5‰ pour N, 1-3‰ pour C, 0‰ pour S, et -44‰ pour H pour le tissu musculaire, et à -1,3‰ pour C, -11,5‰ pour 0, -172,7‰ pour H pour les lipides intra-musculaires (Bahar *et al.*, 2009 ; Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2016; Harrison *et al.*, 2011).

Les différences de valeur de $\delta^{13}C$ dans les produits sont fréquemment liées à des proportions différentes de plantes en C3 et en C4 dans la ration des animaux (Smith et Epstein, 1971). Les plantes en C4 (dont en particulier le maïs) et en C3 (plantes prairiales de pays tempérés, céréales, soja, betteraves, etc.) ont des voies métaboliques différentes lors de la photosynthèse, ce qui induit des différences dans leurs rapports d'isotopes stables du carbone. La plage de variation de $\delta^{13}C$ est ainsi de -14‰ à - 10‰ pour les plantes en C4 vs. de -35‰ à - 21‰ pour les plantes en C3 (Schmidt *et al.*, 2005). La viande d'animaux alimentés avec du maïs est ainsi plus riche en ^{13}C que celle issue d'animaux qui pâturent de l'herbe de prairies tempérées (Piasentier *et al.*, 2003) sur ovins ; (Gebbing *et al.*, 2004) sur bovins). Il est maintenant bien établi que la viande bovine issue d'animaux ayant consommé des plantes en C4 (per exemple le maïs), peut être clairement distinguée de celle d'animaux ayant consommé des plantes en C3 (Bahar *et al.*, 2005; Boner et Forstel, 2004 ; De Smet *et al.*, 2004 ; Gebbing *et al.*, 2004), cette différence pouvant aussi être utile pour discriminer des viandes issues de différentes régions du monde où les systèmes de production diffèrent (Guo *et al.*, 2010 ; Nakashita *et al.*, 2008 ; Rossmann et Schlicht, 2007 ; Schmidt *et al.*, 2005). Dans l'étude de Bahar *et al.* (2005), les valeurs de $\delta^{15}N$ de la ration des animaux (8,1‰ et 3,3‰ dans l'ensilage d'herbe et de maïs respectivement) se reflétaient aussi clairement dans la viande des bovins. Dans la viande de poulets, Rhodes *et al.* (2010) ont également montré l'intérêt de la SMRI pour discriminer la viande issue d'animaux nourris avec des proportions variables de maïs (la ration de poulets considérés comme 'nourris au maïs' doit en contenir au moins 50%) (Figure 2.9.5). La mesure de $\delta^{13}C$ dans le lait permet également de distinguer le lait de vaches nourries avec du maïs vs. de l'herbe (Auerswald *et al.*, 2015; Kornexl *et al.*, 1997).

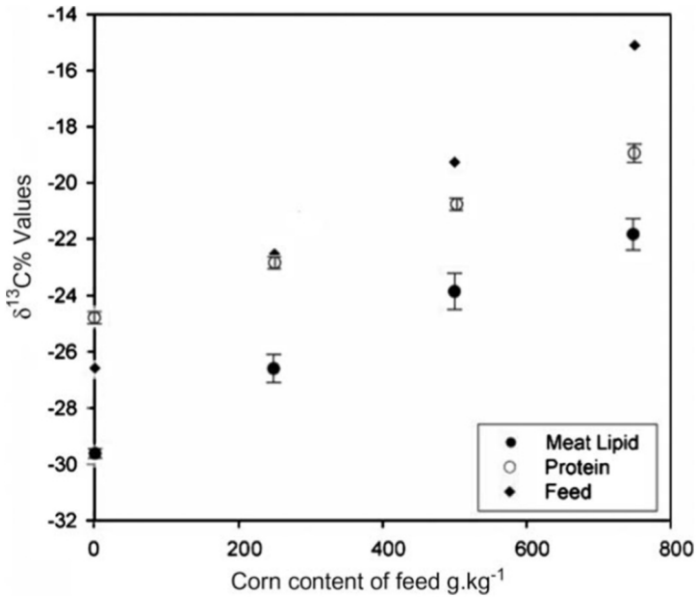


Figure 2.9.5. Valeurs de $\delta^{13}C$ dans les protéines et les lipides du muscle de poulets, ainsi que dans leur ration, en fonction du taux d'incorporation de maïs dans la ration (Rhodes *et al.*, 2010)

Un point de vigilance doit cependant être signalé. Si les isotopes du C sont souvent utilisés pour reconnaitre des produits issus d'animaux alimentés avec du maïs, certaines graminées prairiales tropicales sont également des plantes en C4. Ainsi, Coletta *et al.* (2012) au Brésil recommandent d'être prudent dans l'utilisation des isotopes du C pour certifier la mention 'poulets en liberté', car les volailles peuvent présenter des valeurs de $\delta^{13}C$ dans la viande du même ordre que celles de poulets alimentés en bâtiments avec du maïs s'ils consomment des plantes prairiales en C4. Pour les herbivores, de même, un engraissement avec une ration à base de maïs peut être confondu avec un engraissement sur graminées prairiales tropicales en C4 (Gebbing *et al.*, 2004 ; Schmidt *et al.*, 2005). La mesure de $\delta^{18}O$ a également été proposée pour tracer l'alimentation au pâturage dans le lait de vache (Renou *et al.*, 2004b) et le fromage de brebis (Valenti *et al.*, 2017). D'après Engel *et al.* (2007), qui ont observé une forte augmentation du $\delta^{18}O$ de l'eau du lait lors de la mise à l'herbe des vaches, ceci est lié à l'origine de l'eau ingérée car, comparativement à l'eau du sol, les plantes concentrent le ^{18}O en raison de l'évapotranspiration (Kornexl *et al.*, 1997).

Quant à la valeur de $\delta^{15}N$ dans les composés azotés des plantes, elle est beaucoup plus faible dans les légumineuses que dans les graminées (Devincenzi *et al.*, 2014) du fait de la fixation de l'azote atmosphérique. Ainsi, Devincenzi *et al.* (2014) ont parfaitement discriminé la viande d'agneaux d'herbe qui avaient consommé au moins 62% de luzerne vs. des graminées uniquement. Sur la viande bovine, la combinaison du profil en AG et de $\delta^{15}N$ a permis de bien classer 95,7% et 86,5% des échantillons issus d'animaux qui avaient pâturé des prairies de graminées *vs* de graminées + trèfle blanc (Moloney *et al.*, 2018). La valeur de $\delta^{15}N$ du lait a également été utilisée pour discriminer une alimentation à l'herbe vs. une alimentation à base de maïs et de céréales (Kornexl *et al.*, 1997).

Les isotopes du S, eux, peuvent refléter l'utilisation d'algues (plus riches en ^{34}S que des sources terrestres) dans la ration des animaux ou comme fertilisants (Schmidt *et al.*, 2005).

Comme les systèmes d'élevage de ruminants biologiques utilisent peu les plantes en C4 (le maïs peut y être utilisé, mais de manière occasionnelle et en faible quantité) et qu'ils recherchent des légumineuses dans leurs prairies, certains travaux ont utilisé les isotopes du C et du N pour discriminer la viande bovine et le lait issus de systèmes d'élevage biologiques vs. conventionnels. Kaffarnik *et al.* (2014) ont par exemple montré que le lait conventionnel issu de vaches nourries avec une alimentation à base d'ensilage de maïs était plus riche en ^{13}C (+30.0 ‰) que le lait bio issu de vaches nourries avec de l'herbe (fraiche ou conservée). De même, des études menées en Allemagne et en Irlande ont montré que les valeurs de $\delta^{13}C$ étaient plus faibles et moins variables dans la viande biologique (Bahar *et al.*, 2008; Boner et Forstel, 2004 ; Schmidt *et al.*, 2005). Pour les isotopes du N dans la viande, les résultats sont variables, avec des valeurs de $\delta^{15}N$ dans la viande parfois plus faibles (Bahar *et al.*, 2008; Schmidt *et al.*, 2005), mais parfois similaires (Boner et Forstel, 2004) dans la viande biologique. Les isotopes du S, eux, n'ont pas été concluants (Bahar *et al.*, 2008; Boner et Forstel, 2004).

Plusieurs points de vigilance sont à signaler pour les isotopes du N : (i) l'efficacité de la fixation de l'azote de l'air par les légumineuses peut varier largement avec l'âge de la plante (Devincenzi *et al.*, 2014), (ii) les prairies « conventionnelles » peuvent, elles aussi, être riches en légumineuses, (iii) l'apport d'azote organique (fumier produit sur la ferme, par exemple)

augmente les valeurs de ^{15}N dans le sol et les plantes (Bateman *et al.*, 2007) relativement à un apport d'azote minéral (Boner et Forstel, 2004). Si les systèmes biologiques recherchent des légumineuses dans les prairies, ils apportent aussi uniquement de la fumure organique, et ces 2 volets ont des effets antagonistes sur la valeur de $\delta^{15}N$ dans les prairies et en conséquence dans les produits des animaux qui les pâturent. Par ailleurs, pour un régime donné, on constate une certaine variabilité de la réponse animale (Devincenzi *et al.*, 2014 ; Macari *et al.*, 2017), à cause de la variabilité interindividuelle de l'efficience de l'utilisation de l'azote par l'animal (Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2016). Plus l'animal est efficient, moins l'écart en $\delta^{15}N$ entre ses tissus et son régime (3,5‰ en moyenne) est élevé, en lien avec la 'préférence' des enzymes du catabolisme pour le ^{14}N. Cette variabilité interindividuelle conduit à un certain 'bruit de fond' indépendant du régime, qui nuit à la puissance de discrimination. Enfin, comme les rations distribuées à l'auge peuvent également contenir des légumineuses (soja, luzerne, etc.), il convient alors de croiser plusieurs informations (animal alimenté à l'herbe et animal qui consomme beaucoup de légumineuses) en combinant plusieurs méthodes (Bahar *et al.*, 2005 ; Biondi *et al.*, 2013; Prache *et al.*, 2009). Par exemple, c'est la combinaison de la valeur de $\delta^{15}N$ dans le muscle, de la teneur d'un sesquiterpène dans le gras périrénal et de la teneur plasmatique en caroténoïdes qui a permis de discriminer complètement la viande d'agneaux au pâturage de celle d'agneaux nourris avec de la luzerne déshydratée et de la paille en bâtiments (Prache *et al.*, 2009).

Les isotopes stables de l'azote ont également été identifiés comme marqueurs intéressants pour discriminer les <u>œufs de poules en plein air vs. en bâtiments</u> (Rogers, 2009). En général, les œufs de poules ayant un accès au plein air sont plus riches en ^{15}N que ceux de poules en bâtiments, à cause d'une ingestion accrue de protéines animales (insectes, vers). Cependant, ces auteurs n'ont pas indiqué le % d'échantillons bien classés et ils signalent que la discrimination n'est pas parfaite, peut être en lien avec une ingestion insuffisante de protéines animales à partir du parcours pour certains animaux.

Verrez-Bagnis *et al.* (2018) ont récemment fait le point sur l'apport des analyses des isotopes stables du C, N et O pour distinguer les <u>poissons sauvages vs. d'élevage</u> et les <u>poissons issus d'élevages biologiques vs. Conventionnels</u>. En effet, la disponibilité et l'origine des aliments diffèrent considérablement entre poissons sauvages et poissons d'élevage, les aliments utilisés pour ces derniers étant caractérisés par une origine terrestre de plus en plus marquée. Le fractionnement isotopique (enrichissement en isotopes lourds du prédateur par rapport à sa proie) conduit à une bioaccumulation des isotopes lourds dans la chaîne trophique, à l'origine de ces différences entre poissons sauvages (comportement naturel carnivore) vs. d'élevage (alimentation d'origine terrestre, notamment végétale, de plus en plus marquée). Plusieurs études ont montré des différences dans les rapports d'isotopes stables entre le poisson sauvage et le poisson d'élevage (Bell *et al.*, 2007 ; Fasolato *et al.*, 2010 ; Molkentin *et al.*, 2015 ; Moreno Rojas *et al.*, 2007 ; Morrison *et al.*, 2007 ; Olsen *et al.*, 2015; Serrano *et al.*, 2007b), ces derniers se distinguant principalement par une valeur de $\delta^{13}C$ plus faible. A titre d'exemple, cette valeur est plus basse de 2,9‰ ± 0,4 pour la daurade d'élevage dans l'étude de Serrano *et al.* (2007b). Les différences varient selon les tissus animaux, la valeur de $\delta^{13}C$ étant plus faible pour les animaux d'élevage seulement dans les tissus riches en lipides, comme les muscles rouges, le foie et les branchies Serrano *et al.* (2007b). Il faut noter que cette variabilité dans la teneur en lipides peut amener à de fausses interprétations concernant le régime alimentaire ou le type d'habitat/élevage/mode de production. Des différences significatives de valeur de $\delta^{15}N$ ont également été observées pour le bar (Bell *et al.*, 2007 ; Fasolato *et al.*, 2010) et la daurade (Morrison *et al.*, 2007) sauvages vs. d'élevage, en lien avec des différences dans l'alimentation (nature et sources d'azote –azote terrestre présent dans les aliments pour les animaux d'élevage-).

Il faut noter que la majorité des travaux publiés sur l'utilisation des isotopes stables à des fins d'authentification du poisson ont été généralement réalisés sur des échantillons de taille relativement réduite. L'utilisation de marqueurs à des fins d'authentification doit cependant considérer tous les facteurs affectant potentiellement ces marqueurs, en veillant à constituer un échantillonnage le plus complet possible et à récolter suffisamment de données. Une étude de grande ampleur a ainsi été réalisée sur un échantillon important (171 poissons) de <u>saumons de l'Atlantique sauvages et d'élevages</u>, provenant de 32 origines européennes, nord-américaines et de la Tasmanie (Thomas *et al.*, 2008). Afin de tenir compte des variations liées à de possibles biais d'échantillonnage, les prélèvements ont été réalisés à toutes les saisons, au cours de deux années consécutives, sur des poissons élevés selon différentes pratiques (croissance lente/croissance rapide). Les résultats montrent que le $\delta^{15}N$ mesuré sur la choline et le $\delta^{18}O$ mesuré sur les lipides totaux peuvent être utilisés avec succès pour discriminer les <u>poissons d'origine sauvage vs. d'élevage</u>. Toutefois, les auteurs indiquent que, pour renforcer la fiabilité de l'authentification des produits, il conviendrait d'analyser en parallèle le pourcentage d'acide linoléique (LA, 18: 2n-6) dans la fraction lipidique. C'est aussi ce que préconisent Molkentin *et al.* (2007) dans une étude où ils ont analysé 100 saumons (sauvage, élevage conventionnel et élevage bio) d'Irlande et de Norvège pour discriminer, de façon rapide, les <u>poissons bio vs. conventionnels</u> ainsi que les <u>saumons sauvages vs. d'élevage</u>, en associant la valeur $\delta^{15}N$ et la teneur en acide linoléique des filets.

Les données publiées montrent que si l'analyse isotopique est une méthode intéressante en termes de coût et de temps d'analyse par rapport à d'autres techniques analytiques pour <u>l'identification des poissons sauvages vs. d'élevage</u>, il est encore

nécessaire d'enrichir des bases de données de composition isotopique et leurs variations dans les poissons, car différents facteurs tels que le régime alimentaire ou la zone de pêche/élevage affectent les rapports d'isotopes stables.

g) Eléments traces

Borges *et al.* (2015) ont réussi à discriminer les œufs bio vs conventionnels à partir de l'analyse de leur teneur en 19 éléments traces (As, Ba, Ca, Co, Cr, Cu, Eu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Rb, Se, Tl, V et Zn).

h) Biomarqueurs protéiques

Récemment, trois pratiques de finition de vaches de réforme (pâturage vs. enrubannage vs. foin) ont été discriminées par des biomarqueurs de nature protéique (Gagaoua *et al.*, 2017) : proportions des isoformes de chaînes lourdes de myosines (à la fois oxydatives (MyHC-IIA) et glycolytiques (MyHC-IIX)), protéine de stress αβ-crystalline et protéine anti-oxydante superoxide dismutase, dont les abondances sont plus élevées pour la finition au pâturage. Cependant, ces biomarqueurs présentent la limite de ne pas être forcément spécifiques du pâturage, car ils sont en lien avec un exercice musculaire plus important.

A partir de méthodes globales

Les méthodes précédentes présentent l'inconvénient d'être sensibles à des biais. Les méthodes globales y sont moins sensibles, car elles constituent une signature globale du produit intégrant une large part de sa composition. En revanche, l'origine des différences de signature peut être difficile à expliquer. Les deux approches sont en fait souvent complémentaires.

Méthodes spectroscopiques

a) Spectroscopie dans le visible (VIS), le proche (SPIR) et le moyen infra-rouge (MIR)

Ces méthodes se révèlent prometteuses pour authentifier les conditions d'alimentation de l'animal dont sont issus les produits. Le spectre de réflectance du produit est analysé par analyse discriminante utilisant l'approche PLS-DA, associée à une validation croisée, pour discriminer les régimes alimentaires comparés et identifier les zones spectrales d'intérêt dans la discrimination. Ces méthodes sont intéressantes, car rapides (peu de préparation de l'échantillon), non destructives, ne nécessitant pas de produits chimiques et ne produisant pas de déchets.

Ces méthodes ont été utilisés sur les produits de ruminants (viande et produits laitiers) pour i) distinguer une alimentation à l'herbe vs. à base de concentré ou d'ensilage de maïs, et ii) les régimes à base d'herbe fraîche vs. d'herbe conservée (foin, enrubannage, ensilage).

La spectrométrie VIS a été utilisée avec succès sur la viande ovine (Dian *et al.*, 2007a; Prache et Theriez, 1999), le lait (Noziere *et al.*, 2006) et le fromage (Andueza *et al.*, 2013). Sur le fromage et la viande ovine, son intérêt a été confirmé sur des bases de données importantes (Andueza *et al.*, 2013 ; Prache *et al.*, 2018). Les résultats montrent la contribution majeure de la zone d'absorption de la lumière par les caroténoïdes dans la discrimination entre agneaux d'herbe et agneaux de bergerie et pointent la possible implication d'autres composés (Dian *et al.*, 2007a ; Prache *et al.*, 2018). La SPIR permet d'améliorer la qualité de la discrimination en élargissant la gamme explorée du spectre de réflectance (400-2 500 nm). Ainsi, en utilisant la SPIR sur le gras périrénal, Dian *et al.* (2008) ont bien classé 97,5% des agneaux d'herbe et 97,8% des agneaux de bergerie (vs. 90,8% et 98,6% pour la VIS). Les travaux sur les ovins concernent des mesures VIS ou SPIR sur le tissu adipeux qui est peu consommé, et il y a peu d'études sur la viande. La seule étude sur le tissu musculaire est celle de Cozzolino *et al.* (2002a) qui ont bien classé 82% et 79% d'échantillons de viande de bovins finis au pâturage vs. avec de l'ensilage de maïs en utilisant la SPIR. Plus récemment, la SPIR a été utilisée sur des échantillons de viande d'agneaux légers nourris avec des concentrés, mais encore allaités, pour discriminer le régime alimentaire de leur mère (en bergerie vs. pâturage de luzerne vs. pâturage de sainfoin) (Ripoll *et al.*, 2018). En revanche, chez le porc, Prieto *et al.* (2015) n'ont pas réussi à discriminer les côtes issus d'animaux alimentés pendant les 3 dernières semaines avant abattage avec soit un régime contrôle, soit un régime 'tourteau de colza' à teneur élevée en acide oléique, soit un régime 'lin' à teneur élevée en acide linolénique.

En utilisant la SPIR sur le lait, Coppa *et al.* (Coppa *et al.*) ont bien classé 96,4 %, 92,2% et 93,3% des échantillons lorsqu'ils ont comparé des laits produits i) au pâturage vs. à l'ensilage de maïs, ii) au pâturage vs. avec du foin, iii) au pâturage vs. avec de l'ensilage d'herbe. En revanche, la SPIR a été nettement moins performante pour discriminer des laits issus de régimes à base de fourrages conservés (ensilage de maïs vs. herbe conservée). Sur le fromage, la SPIR a permis de correctement classer 96% des échantillons issus du pâturage vs. de fourrages conservés (foin ou ensilage d'herbe). Sur le lait, un intérêt particulier est porté à la MIR, car cette technologie est largement utilisée pour sa rapidité (1 échantillon toutes les 7 secondes). Valenti *et al.* (2013) ont utilisé la MIR avec succès pour discriminer le lait de vaches au pâturage vs. nourries avec du foin et de l'ensilage d'herbe (proportion d'échantillons bien classés > 95%), mais ils n'ont pas pu distinguer du lait issu de régimes à base de foin vs. d'ensilage de maïs.

Chez les poissons, la SPIR a été utilisée avec succès sur le muscle blanc des filets pour différencier le bar d'élevage vs. sauvage, les zones spectrales d'intérêt dans la discrimination correspondant à l'absorbance des groupes CH, CH_2, CH_3 et H_2O qui sont

reliées aux teneurs en lipides et en eau et à la composition en AG (Ottavian *et al.*, 2012). De même, Vidal *et al.* (2014) ont utilisé la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) sur des extraits lipidiques pour différencier le bar sauvage vs. d'élevage.

Ces méthodes spectrales, bien que nécessitant des approches mathématiques sophistiquées, sont assez simples à mettre en œuvre sur le terrain et ont certainement un potentiel d'application très important. Elles nécessitent cependant l'établissement préalable de bases de données conséquentes. Il faut signaler que des appareils SPIR portables commencent à être utilisés (Prieto *et al.*, 2015).

Pour les œufs, la spectroscopie UV-Vis-NIR a été appliquée sur l'extrait lipidique du jaune d'œuf pour discriminer avec succès (100% de fiabilité) les 4 modes d'élevage des poules (bio, plein air, au sol ou en volière en bâtiment, en cages) (Puertas et Vázquez, 2020). Les raisons sous-jacentes avancées par les auteurs sont des différences probables dans la composition du jaune d'œuf en lien avec le système d'élevage, notamment l'alimentation (profils en caroténoïdes et en AG, ainsi que teneur en cholestérol). Cependant, les œufs ayant été achetés dans des supermarchés, la souche et l'âge de la poule, ainsi que son alimentation étaient inconnues. De plus, il faut signaler que les cahiers des charges des élevages sous signes de qualité ne précisent pas l'alimentation en lipides des poules, à l'exception de la filière Bleu, Blanc Cœur. Si ces résultats sont intéressants, ils présentent donc certains risques de biais (souche, âge *et al*imentation de la poule) et nécessitent d'être testés sur des effectifs plus importants pour déterminer la robustesse de la méthode.

b) Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (spectroscopie RMN)

Osorio *et al.* (2012) ont utilisé la résonance magnétique nucléaire pour étudier les changements dans la composition métabolomique de muscle et d'urine de bovins et le potentiel de cette approche pour discriminer différents systèmes de production. Les analyses discriminantes réalisées sur l'urine ont montré une bonne discrimination entre animaux au pâturage et ceux alimentés avec un concentré à base d'orge et la créatinine, le glucose, le pyruvate, la phénylalanine et l'hippurate ont été identifiées comme variables discriminantes. La discrimination sur le muscle était également possible, mais moins fiable qu'avec l'urine, les métabolites importants dans la discrimination des animaux nourris avec le concentré à base d'orge étant la carnosine (teneur plus élevée) et la méthylhistidine, le malonate, la glutamine (teneurs plus faibles) dans le muscle.

La spectroscopie ^{13}C RMN a été utilisée pour discriminer les poissons sauvages vs. d'élevage. Ainsi, Aursand *et al.* (2009) ont obtenu une très bonne discrimination des saumons sauvages vs d'élevage en analysant les lipides musculaires de 195 poissons par spectroscopie RMN (plus de 98,5% d'échantillons bien classés) (Aursand *et al.*, 2009).

Génomique fonctionnelle

La génomique fonctionnelle est l'une des approches les plus récentes. Son principe est que la régulation de l'expression des gènes étant sous le contrôle de différents facteurs, dont les nutriments, le profil d'expression des gènes pourrait donc donner des informations pertinentes sur les conditions d'alimentation de l'animal. Des techniques d'analyse de génomique fonctionnelle permettent de comparer les profils d'expression des gènes (transcriptomique) (Hocquette *et al.*, 2009) ou de protéines (protéomique) (Shibata *et al.*, 2009) dans des échantillons tissulaires d'animaux. Des méthodes d'analyse globale des transcrits à l'aide de réseaux à ADN, ou des protéines par électrophorèse bidimensionnelle, sont utilisées afin d'identifier des ensembles de gènes et de protéines définissant une « signature moléculaire » des tissus, qui pourrait être associée à certaines conditions d'alimentation des animaux. Chez des bœufs de 30 mois conduits à l'auge (ensilage de maïs) ou au pâturage, Cassar-Malek *et al.* (2009) ont détecté une sous-expression du gène de la sélénoprotéine W associée à la conduite au pâturage, des analyses complémentaires suggérant qu'elle serait davantage liée à la teneur ou à la biodisponibilité du sélénium (inférieure dans l'herbe par rapport à l'ensilage de maïs) plutôt qu'à l'exercice musculaire des animaux au pâturage. L'expression de ce gène pourrait ainsi constituer un marqueur de la conduite au pâturage. Duckett *et al.* (2009) ont étudié l'expression de gènes impliqués dans la lipogénèse dans le muscle ; ils ont trouvé une surexpression de stearoyl-CoA desaturase, fatty acid synthetase et Spot-14 et une sous expression de STAT5 dans le gras sous-cutané de bovins finis sur une ration à base de concentrés après une phase de pâturage en comparaison du pâturage seulement. Dans une étude comparant des bovins nourris au pâturage vs. en bâtiment avec du concentré, Sweeney *et al.* (2016) ont identifié 26 gènes exprimés différemment ; certains étaient associés au métabolisme des AG, certains étaient positivement corrélés à la concentration en AG n-3 et une bonne discrimination des deux systèmes de production était obtenue (95% des animaux au pâturage et 100% des animaux en bâtiment bien reconnus) à partir du niveau d'expression de 3 gènes (ALAD, EIF4EBP1 et NPNT).

Capacité à discriminer des régimes alimentaires et systèmes de production moins contrastés

La première étape pour évaluer le potentiel de différentes méthodes consiste à comparer des conditions contrastées et stables. Cependant, la réalité est souvent beaucoup plus complexe. Les rations des animaux peuvent ainsi varier au cours de la vie productive de l'animal, en fonction de changements de disponibilité ou de coût des aliments (alternances de régimes par exemple). De plus, la concentration d'un aliment donné en traceurs d'intérêt ou sa signature isotopique peuvent varier

avec la saison. En Irlande par exemple, où la production de viande de ruminants est généralement considérée comme 'à base d'herbe', il existe des variations saisonnières des rapports d'isotopes stables dans la viande, en lien avec l'inclusion dans le régime d'autres composants, tels que l'ensilage de maïs, en particulier en hiver si les animaux sont entrés à l'étable (Bahar *et al.*, 2008 ; Monahan *et al.*, 2018; Schmidt *et al.*, 2005). Par ailleurs, si l'on sait distinguer la viande d'un animal qui a été alimenté à l'herbe pendant plusieurs mois avant abattage d'une viande d'un animal nourri avec un régime à base de concentré, on ne sait pas encore à partir de quand la 'signature' de l'herbe est stabilisée dans la viande. Si ce délai est court, on peut alors craindre des pratiques frauduleuses visant à 'simuler' une finition à l'herbe. Ceci renvoie à la question de la latence d'apparition des marqueurs de l'herbe dans la viande. Enfin, les engagements des cahiers des charges concernent souvent des modalités d'alternance de régimes (par exemple une durée minimum à l'herbe et maximale en bâtiments), une durée minimale pour la finition avec une certaine ration ou la garantie d'une certaine proportion d'un aliment donné, par exemple de l'herbe pâturée, dans la ration (voir la section consacrée à l'analyse des cahiers des charges). Dans le lait, les effets de changements de régime sont souvent rapides (dès 24 à 48 h après un changement de régime, les terpènes et les AG du lait sont modifiés (Farruggia *et al.*, 2014 ; Renna *et al.*, 2012; Viallon *et al.*, 2000) ; mais, dans la pratique, les éleveurs ménagent des transitions alimentaires d'une certaine durée (Coppa *et al.*, 2012a).

Les plantes constitutives du régime peuvent aussi présenter une variabilité dans la concentration en traceurs d'intérêt, dans leur signature isotopique, etc. Il peut également y avoir de la variabilité dans le taux d'incorporation de certains aliments dans la ration. Il peut enfin y avoir une variabilité importante dans le niveau d'ingestion des animaux et dans leurs choix alimentaires, notamment au pâturage. Ces variations peuvent être liées à la saison, au stade phénologique des plantes, à leur âge et leur développement racinaire et à la conduite du pâturage. Ceci nécessite donc de connaître, quand c'est possible, la loi de réponse à la dose d'apport d'un traceur donné et les phénomènes de latence d'apparition et de persistance des traceurs potentiels dans les produits lors d'un changement d'alimentation.

Lois de réponse à la dose d'apport

La proportion de plantes en C4 dans la ration des vaches peut être prédite en moyenne à partir de la valeur de $\delta^{13}C$ dans le lait (Auerswald *et al.*, 2015) ; cependant, il faut signaler une forte variabilité interindividuelle, responsable d'une partie importante de l'erreur d'estimation. Pour la viande bovine, Bahar *et al.*, 2005 ont estimé, à partir de bovins alimentés pendant 167 jours avec de l'ensilage d'herbe, de l'ensilage de maïs ou un mélange des deux (50:50), que chaque augmentation de 10% de maïs dans la ration devrait se traduire par une augmentation de 0,9 à 1,0‰ de $\delta^{13}C$ dans la viande (Bahar *et al.*, 2005). Ces auteurs considèrent donc que la loi de réponse est linéaire, mais ils n'ont pas analysé la fiabilité de la discrimination selon la proportion de maïs dans la ration. Dans la viande de poulets, la valeur de $\delta^{13}C$ augmente linéairement avec la proportion de maïs dans la ration, avec une faible variabilité inter-individuelle (Figure 2.9.4, (Rhodes *et al.*, 2010)). Ici, les données montrent que l'on peut discriminer la viande de poulets ayant consommé un aliment contenant 0, 25, 50, ou 75% de maïs.

Même si la mesure des isotopes du C est généralement utilisée pour discriminer des régimes contrastés en termes de plantes en C3/C4, elle a aussi été utilisée pour discriminer la viande d'animaux alimentés avec des rations beaucoup moins contrastées (pâture 50% + orge 50% vs. herbe pâturée ou ensilée, deux rations composées de plantes en C3 qui présentaient une différence dans les valeurs de $\delta^{13}C$ de seulement 2 à 3‰) (Osorio *et al.*, 2011a). De même, Richter *et al.* (2012) ont discriminé la viande d'agneaux ayant pâturé des prairies de plaine *vs* de montagne, alors que ces prairies présentaient une différence dans les valeurs de $\delta^{13}C$ de seulement 2,5‰ (Richter *et al.*, 2012).

La valeur de $\delta^{15}N$ dans la viande d'agneau diminue linéairement avec la proportion de légumineuses dans la ration de l'animal ((Devincenzi *et al.*, 2014), Figure 2.9.5). Cependant, il faut faire attention à ne pas généraliser les équations obtenues dans une étude, car la signature isotopique des plantes varie avec les conditions expérimentales (notamment l'âge de la plante et l'apport d'engrais). Par ailleurs, même si la réponse est en moyenne linéaire, la variabilité interindividuelle de la réponse animale conduit à un certain « bruit » qui nuit à la puissance de discrimination. Macari *et al.* (2017) ont ainsi montré que l'on pouvait discriminer avec une bonne fiabilité (92,9%) la viande d'agneaux ayant consommé 50% vs. 0% de légumineuses (différence de $\delta^{15}N$ de 3,7‰ entre les 2 rations). Il semble illusoire d'obtenir une authentification plus précise de la proportion de légumineuses dans la ration, sauf si la différence de signature isotopique entre les fourrages est plus élevée.

La concentration en caroténoïdes du plasma augmente linéairement avec le niveau d'ingestion de ces pigments chez les ovins et les bovins (avec cependant des différences entre espèces animales). Chez les bovins, la concentration dans le lait augmente linéairement avec la concentration plasmatique jusqu'à une concentration plasmatique de 5 µg/ml, puis se stabilise au-delà (Calderon *et al.*, 2007). De même, la réponse de l'intensité de la signature de ces pigments dans le tissu adipeux à la dose d'apport chez les agneaux est linéaire pour des apports faibles à modérés (Dian *et al.*, 2007b), puis stable à partir d'un certain

niveau encore à préciser. En effet, chez des agneaux d'herbe qui étaient soit non complémentés, soit complémentés avec de l'orge (à hauteur de 38% de la ration), la signature des caroténoïdes dans le tissu adipeux était de même intensité (Devincenzi *et al.*, 2019). Il semble donc illusoire d'utiliser cette méthode pour authentifier précisément la proportion d'herbe dans la ration des agneaux.

Coppa *et al.* (2015a) ont proposé des équations de prédiction de la composition de la ration de troupeaux de vaches laitières (proportion d'herbe pâturée, de foin, de fourrages totaux et d'herbe totale dans la ration) à partir du profil en AG du lait de tank. La précision de la prédiction est parfois limitée (par exemple, ± 15% pour la proportion d'herbe pâturée), du fait de l'imprécision de l'information relative à la composition de la ration (déclaration des éleveurs, estimation difficile du niveau d'ingestion au pâturage) et des facteurs confondants précédemment cités, notamment au pâturage.

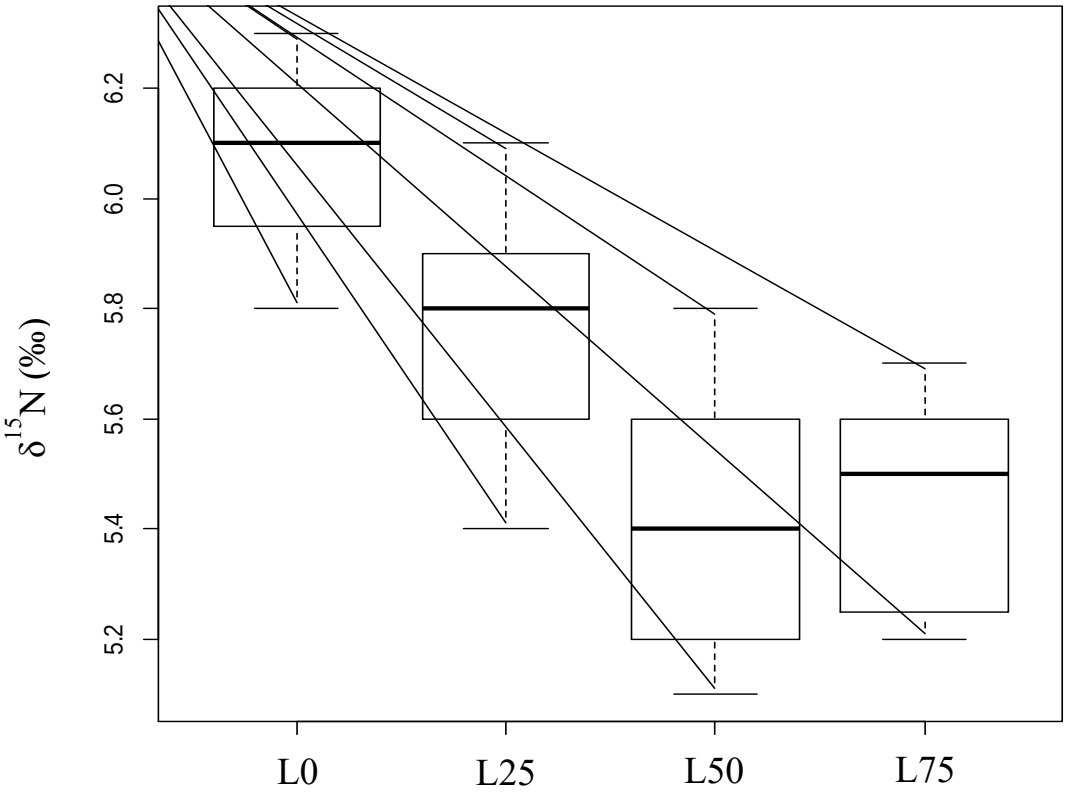


Figure 2.9.6. Box-plot des valeurs de $\delta^{15}N$ dans le muscle *longissimus thoracis* d'agneaux pâturant une prairie de dactyle selon le niveau de complémentation avec de la luzerne fraîchement coupée. La luzerne était distribuée pour assurer une proportion de luzerne dans la ration de 0% (L0), 25% (L25), 50% (L50) et 75% (L75) (Devincenzi *et al.*, 2014).

Les changements de modalités d'alimentation : persistance et latence des marqueurs d'intérêt

a) Traceurs moléculaires et isotopes stables

Si les temps de réponse de la composition du lait aux changements du régime sont assez rapides, il y a un certain temps de latence pour que la composition de la viande reflète celle du régime, ce qui peut être problématique lorsque les changements d'alimentation sont réalisés peu avant l'abattage. Ce temps de latence est apprécié à partir de la demi-vie des isotopes d'intérêt. La demi-vie d'un composé dans un tissu est la médiane de la durée de vie de ce composé dans ce tissu, c'est-à-dire la durée en-deçà de laquelle il reste plus de 50% du composé initialement présent et au-delà de laquelle il en reste moins de 50%.

Avec des bovins passant d'un régime à base d'orge (C3) à un régime à base de maïs grain (C4) pendant des périodes allant de 2 à 22 semaines avant abattage, les demi-vies du C et du N dans le muscle *longissimus thoracis* et *lumborum* ont été calculées à 151 et 157 jours (Figures 2.9.6 et 2.9.7 ; (Bahar *et al.*, 2009)). Le temps de latence pour que la signature isotopique de la viande reflète celle d'un changement d'alimentation est donc long.

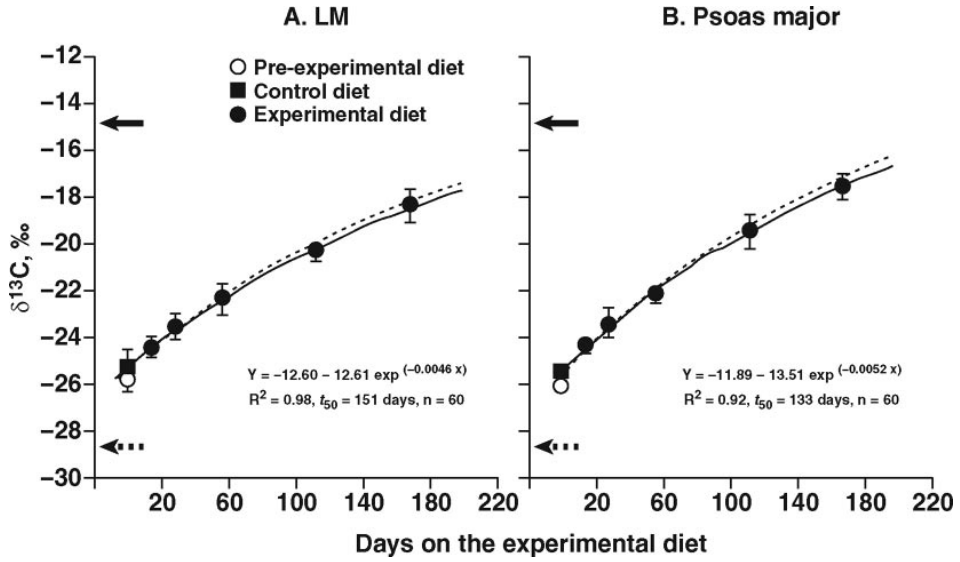


Figure 2.9.7. Dynamique des valeurs de $\delta^{13}C$ dans le muscle *longissimus thoracis et lumborum* de bovins passant d'un régime à base d'orge (plante en C3) à un régime à base de maïs grain (plante en C4).

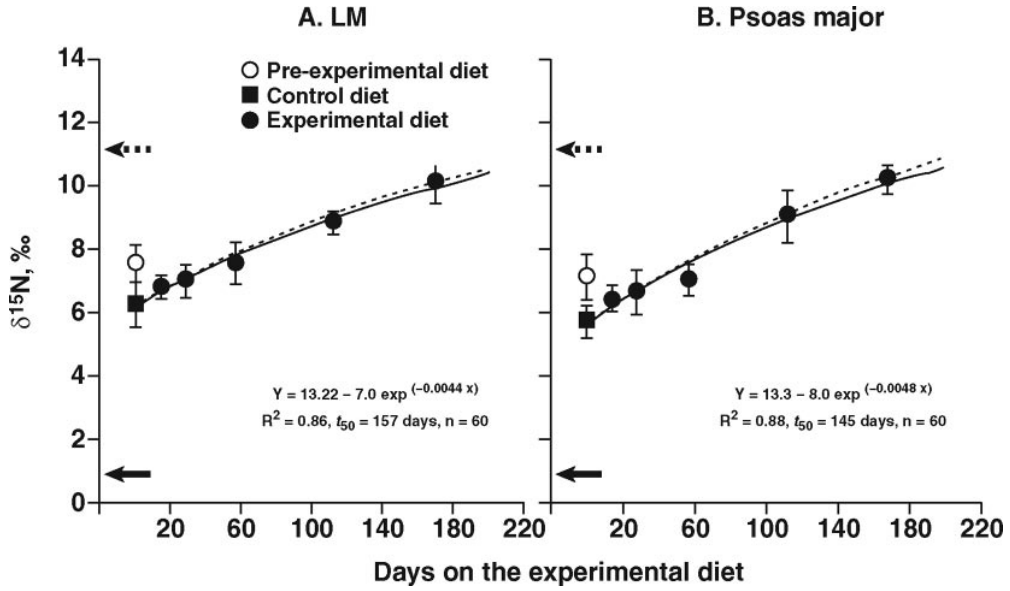


Figure 2.9.8. Dynamique des valeurs de $\delta^{15}N$ dans le muscle *longissimus thoracis* et *lumborum* de bovins passant d'un régime à base d'orge à un régime à base de maïs grain.

La demi-vie varie avec le taux de renouvellement du tissu animal. Elle peut donc varier avec le tissu chez un animal donné ; ainsi, chez les bovins, les demi-vies du C et du N sont un peu plus élevées dans le muscle LM que dans le muscle psoas major (Bahar *et al.*, 2009). Elle varie aussi avec l'espèce animale. Chez l'agneau, la demi-vie du C est plus courte que chez le bovin (Harrison *et al.*, 2011). Le taux de renouvellement des tissus dépend aussi fortement du niveau d'énergie ingérée par l'animal : la demi-vie du C dans le muscle *Longissimus thoracis* et *lumborum* a ainsi été estimée à 76 j chez des agneaux recevant un niveau haut en énergie (GMQ de 150 g/j) et à 92 jours chez ceux qui recevaient un niveau bas en énergie (GMQ de 50 g/j) (Harrison *et al.*, 2011). Ainsi, l'évolution de $\delta^{13}C$ dans le muscle après un changement d'alimentation ne dépendra pas seulement des changements de $\delta^{13}C$ du régime, mais également du niveau d'énergie ingérée par l'animal. Dans l'étude de Harrison *et al.* (Harrison *et al.*, 2011), la valeur de $\delta^{13}C$ dans le muscle des agneaux a ainsi augmenté plus vite chez les agneaux à haut niveau d'ingéré que chez ceux à bas niveau. De la même manière, pour un régime donné, un stress nutritionnel peut affecter les valeurs de $\delta^{15}N$ et de $\delta^{34}S$ (Harrison *et al.*, 2011).

Enfin, alors que beaucoup d'études ont clairement montré l'effet du passage d'une ration en C3 (par exemple herbe) à une ration en C4 (par exemple maïs), ou inversement, sur la signature isotopique des tissus musculaires, il y a plus de difficultés à détecter ce changement lorsque les aliments sont isotopiquement plus proches (par exemple aliments en C3 tels que l'orge vs. l'herbe ; (Moreno-Rojas *et al.*, 2008). Il y a donc certaines difficultés dans l'utilisation de la signature isotopique des tissus pour obtenir des informations sur l'histoire nutritionnelle de l'animal car, cette signature étant « intégrée » pendant une certaine période avant abattage, des changements de courte durée peuvent ne pas être détectés (Bahar *et al.*, 2009). De plus, si des animaux au pâturage reçoivent un complément de céréales pendant une certaine période avant abattage, ceci peut être indétectable soit parce que le taux de renouvellement du tissu est insuffisant pour induire une réponse dans la viande, soit parce que la signature isotopique de la céréale est trop proche de celle de la prairie (Bahar *et al.*, 2009 ; Harrison *et al.*, 2011). Certains auteurs recommandent, pour mieux accéder à l'historique des changements d'alimentation au cours de la vie de l'animal, d'utiliser des tissus tels que les poils (Schnyder *et al.*, 2006 ; Schwertl *et al.*, 2005 ; West *et al.*, 2004), les sabots (Harrison *et al.*, 2007 ; Zazzo *et al.*, 2007) ou la laine (Zazzo *et al.*, 2008 ; Zazzo *et al.*, 2011) car ces tissus 'qui poussent' progressivement contiennent des informations 'temporelles' ; ils constituent une archive isotopique des changements temporels de la composition isotopique de la ration. Ces tissus sont inertes métaboliquement, ils sont progressivement déposés et ensuite restent inchangés ; les rapports d'isotopes (et ainsi les informations sur la ration consommée au moment de la croissance de ces tissus) sont préservés durant leur croissance (Barbosa *et al.*, 2009 ; Hobson, 1999). Si ces tissus peuvent être facilement prélevés sur la carcasse ou sur l'animal vivant, ils ne sont cependant pas disponibles au point de vente des pièces de viande.

Les mêmes difficultés relatives aux changements de modalités d'alimentation en lien avec le renouvellement des tissus sont à signaler pour d'autres composés (AG, vitamine E, composés volatils). Pour les AG dans la viande bovine, Noci *et al.* (2005) ont montré que lorsque les animaux passent d'un régime ensilage d'herbe + concentré au pâturage pendant des périodes de 40, 99 ou 158 jours avant abattage, il y a une augmentation graduelle linéaire dans la concentration en acide linoléique conjugué et une diminution graduelle du rapport AG (n-6) / AG (n-3). Alfaia *et al.* (2009) ont discriminé sans erreur 4 modalités d'alimentation de bovins (pâturage vs. ration à base d'orge à l'étable vs .pâturage puis finition à l'étable pendant 2 ou 4 mois avec une ration à base d'orge), les AG du muscle ayant le pouvoir discriminant le plus élevé étant les AG 17:1c9, 24:1c15, 14 :0, 18:1c13, 18:3 n-3, l'acide oleique, 18:1t9, 20:1c11 et l'isomère t11, t13 du CLA. Pour les composés volatils, Priolo *et al.* (2004) ont identifié 4 terpènes permettant de reconnaître des agneaux finis à l'herbe de ceux alimentés exclusivement en bergerie ou finis en bergerie après une période de pâturage. Ils ont également identifié la 2,3-octanedione comme marqueur potentiel de la durée d'alimentation en bergerie.

Chez des agneaux passant du pâturage à un régime concentré en bergerie, l'intensité de la signature des caroténoïdes dans le tissu adipeux diminue avec le gain de poids vif déposé en bergerie selon un modèle d'exponentielle décroissante (Huang *et al.*, 2015b). Cette diminution est liée au dépôt de tissu adipeux 'blanc', indemne de caroténoïdes lors de la finition, qui dilue le tissu adipeux plus jaune contenant les caroténoïdes ingérés au pâturage. Le modèle obtenu sur un nombre important d'animaux montre que l'intensité de la signature des caroténoïdes chez les agneaux préalablement à l'herbe atteint une valeur similaire à celle des agneaux de bergerie après 15,8 kg de poids vif déposé. Compte tenu de la vitesse de croissance lors de la finition, ceci correspond à une persistance de 60 j. Cependant, il faut signaler une grande variabilité interindividuelle à la fois dans la capacité à stocker ces pigments (Dian *et al.*, 2007b ; Macari *et al.*, 2017) et dans la vitesse de croissance lors de la finition en bergerie (Huang *et al.*, 2015b), ce qui induit du « bruit » lors du processus de discrimination du mode d'alimentation. Il faut prendre en compte aussi les cas possibles de perte de poids de l'animal, car les caroténoïdes sont alors déstockés du tissu adipeux et remis en circulation. Cependant, ce risque est faible et lié à une pathologie, car les régimes de finition sont prévus pour faciliter l'engraissement des animaux. La persistance des caroténoïdes est de 11 jours en moyenne dans le plasma (Prache *et al.*, 2003b), donc beaucoup plus courte que dans les tissus adipeux. On peut tirer avantage de ces différences de persistance entre tissus. Ainsi, la mesure des concentrations dans les deux tissus permet de discriminer les 3 modalités suivantes : élevage à l'herbe, élevage en bergerie, finition en bergerie après une phase de pâturage (Prache *et al.*, 2003a). Les agneaux engraissés à l'herbe vs. en bergerie jusqu'à l'abattage présentent des valeurs élevées vs. faibles à la fois dans le tissu adipeux et le plasma ; les animaux qui présentent des valeurs élevées dans le tissu adipeux mais faibles dans le plasma correspondent à des agneaux élevés à l'herbe et finis en bergerie. Au-delà de cet exemple, la combinaison de différents tissus présentant une certaine variabilité dans la persistance des composés d'intérêt pour l'authentification peut ainsi être particulièrement intéressante pour 'reconstruire' l'histoire alimentaire de l'animal dont est issu le produit.

Quand les agneaux passent d'une ration pauvre à une ration riche en caroténoïdes, l'intensité de la signature des caroténoïdes dans leur tissu adipeux périrénal augmente curvilinéairement et atteint un plateau après 45 j (de Oliveira *et al.*,

2012). Le nombre d'animaux dans cette étude était cependant insuffisant pour analyser la fiabilité de discrimination selon la durée d'alimentation sur le régime riche en caroténoïdes.

Chez le porc, le niveau d'absorption de la vitamine E dans les tissus en réponse à un changement d'alimentation d'un régime pauvre à un régime riche en vitamine E est dans l'ordre sang > foie > muscle > tissu adipeux (Monahan *et al.*, 1990), et l'on pourrait tirer avantage de ces différences comme dans le cas des caroténoïdes.

b) Méthodes globales

Les premiers résultats obtenus avec la spectrométrie VIS et SPIR en situations d'alimentations plus complexes sont prometteurs. Ainsi, sur la viande ovine, Huang *et al.* (2015a) ont discriminé 3 modalités de production (herbe, bergerie, finition en bergerie pendant 28 j après une phase de pâturage) avec une fiabilité de 95,9% et de 99,0% respectivement pour les mesures VIS et SPIR sur le tissu adipeux périrénal. Cette étude confirme par ailleurs les zones d'absorption de la lumière impliquées dans la discrimination entre régimes alimentaires. La robustesse de ces méthodes spectrales lorsque les modalités d'alimentation se complexifient est donc à souligner. Elles n'ont cependant pas encore été testées sur les bovins, lesquels peuvent subir plus d'alternances de régimes.

Sur le lait, Coppa *et al.* (2012b) ont montré qu'avec la SPIR la fiabilité de la discrimination du lait issu de vaches au pâturage vs. de vaches qui ne pâturent pas augmente lorsque l'on exclut du groupe pâturage les laits issus de vaches ayant consommé moins de 70% d'herbe. En deçà de ce seuil, la prédiction des régimes mixtes, très fréquents dans la pratique, est délicate.

La mesure du spectre de réflectance du tissu adipeux de couverture (base de la queue) des porcs sur une chaîne d'abattage à l'aide d'un appareil SPIR portable a également été utilisée avec succès pour discriminer le jambon sec ibérique premium (Iberico de bellota, porcs élevés en extérieur et *al*imentés exclusivement avec des glands et ressources pâturées en phase de finition) vs. non premium (97% d'échantillons bien classés) (Piotrowski *et al.*, 2019).

2.9.1.2 Procédés de transformation des produits

Peu d'études ont été réalisées pour évaluer l'intérêt de la SPIR pour authentifier les procédés de transformation de la viande. Chez le porc, Prieto *et al.* (2015) ont évalué l'intérêt de la SPIR sur des côtes non broyées pour authentifier 3 procédés : i) les **conditions de refroidissement** des carcasses, ii) **l'injection d'une solution salée** (contenant du sel, des phosphates, du lactate de sodium et du jus de citron) pour augmenter la jutosité et la tendreté de la viande et iii) la **durée de maturation** de la viande. Il n'a pas été possible de reconnaitre les carcasses ayant été traités par le refroidissement expérimental (« blast chilling » : à -25°C avec une soufflerie d'air de 2,5 m/s pendant 1 h et ensuite à 2°C pendant 23 h) vs. le refroidissement conventionnel (2°C pendant 24 h). Pour le procédé de traitement de la viande visant à augmenter la tendreté et la jutosité, les auteurs ont été capables de reconnaitre les échantillons ayant été traités de ceux qui ne l'ont pas été (classification correcte de 97% et 99% des échantillons traités vs. non traités respectivement quand la viande est maturée 2 j et de 94% et 97% quand la viande est maturée 14 j). Quant à la durée de maturation, qui permet l'amélioration de la tendreté et le développement de la flaveur, les auteurs ont été capables de reconnaitre les échantillons ayant subi une maturation de 2 j ou de 14 j (94% et 97% d'échantillons bien reconnus pour chaque durée de maturation). La SPIR appliquée sur les côtelettes non broyées a ainsi permis d'authentifier avec succès les 2 derniers procédés, mais pas le premier.

La mesure du rapport teneur en eau/teneur en protéines permet de suspecter/détecter des pratiques frauduleuses **d'additions d'eau chez les volailles et le poisson**, ainsi que de **refroidissement des carcasses chez les volailles**. Afin de limiter ces pratiques frauduleuses, la règlementation fixe un ratio teneur en eau/teneur en protéines. Le refroidissement par bain d'eau est largement utilisé en Amérique du Nord, alors qu'en Europe, il n'est autorisé que pour l'exportation de poulets congelés. Avec la sélection sur la vitesse de croissance, l'âge à l'abattage du poulet standard ne cesse de décroître. Ceci a pour conséquence une augmentation du ratio teneur en eau/teneur en protéines des filets, qui selon la législation européenne ne doit pas dépasser 3,40. Hahn *et al.* (2013) ont montré que ce ratio avait progressé pour la production de poulets standards en Allemagne de 3,10 en 1993 à 3,31 en 2012, avec une proportion accrue de filets dépassant la valeur limite autorisée par la législation. Pour le poisson, des pratiques d'injection ou d'ajout d'eau avec addition de phosphates avant congélation des filets sont également régulièrement dénoncées.

Les composés organiques pouvant être utilisés comme **additifs** sont nombreux (colorants, arômes, conservateurs, enzymes) et les méthodes de détection doivent être spécifiques.

Il y a peu d'études dans la littérature concernant l'authentification des **procédés de cuisson**. Des produits de la réaction de Maillard ou l'acrylamide qui se forme au-delà de 120°C pourraient être utilisés comme marqueurs.

2.9.1.3 Procédés de conservation des produits

Le poisson est un aliment très périssable se détériorant rapidement à une température de stockage élevée, ce qui limite sa durée de conservation. Bien que de nombreuses méthodes de conservation aient été utilisées pour prolonger sa durée de conservation, la congélation reste la technologie la plus fréquente. Le poisson congelé a généralement un prix beaucoup plus bas que le poisson frais et le remplacement du poisson frais par du poisson congelé-décongelé est une pratique frauduleuse. De nombreuses études ont été menées pour **différencier les poissons frais des poissons congelés-décongelés**, en testant un large éventail de méthodes qui peuvent être classées en trois principales catégories : enzymatiques, physiologiques et physiques. Les *méthodes enzymatiques* reposent sur la détermination de l'augmentation de l'activité enzymatique d'enzymes spécifiques retrouvées dans l'exsudat des tissus à la suite des modifications cellulaires survenant lors du processus de congélation-décongélation. Les *méthodes physiologiques* peuvent impliquer l'examen de l'opacité du cristallin (changement de la transparence de la médulla -partie centrale- de l'œil qui devient trouble ou opaque à la congélation), la détermination de la valeur de l'hématocrite en tant qu'indice de destruction des globules rouges ou l'évaluation de l'intégrité des globules rouges par microscopie. Pour tenter de surmonter le caractère fastidieux et destructeur des méthodes physiologiques et/ou l'absence de sang ou d'yeux dans les échantillons, des *techniques physiques instrumentales* non invasives et non destructives ont été testées, telles que la spectroscopie de fluorescence (front-face fluorescence spectroscopy). Karoui *et al*. (2017) ont, ainsi, bien discriminé des bars non congelés au préalable (bars frais) vs. congelés puis réfrigérés vs. réfrigérés puis congelés (94,97% d'échantillons bien classés). De plus, des méthodes physiques basées sur la mesure des modifications de la résistance électrique des tissus (utilisant des appareils spécifiques FISCHTESTER, le RT Fish Freshness Tester ou le Torrymeter) ont été envisagées, ainsi que des méthodes plus récentes de mesure de l'impédance (Fuentes *et al.*, 2013; Vidacek *et al.*, 2008). Par ailleurs, une étude réalisée sur les **profils de composés volatils** a montré que quatre composés communs aux espèces de bar, daurade, cabillaud et saumon pourraient être des marqueurs potentiels : le diméthyle sulfite, 3-methylbutanal, éthyle acétate et le 2-methylbutanal (Leduc *et al.*, 2012).

Cependant, compte tenu des besoins des autorités de contrôle (méthodes rapides, non destructives, relativement peu coûteuses), la plupart des méthodes proposées actuellement doivent être améliorées pour répondre à ces exigences. La recherche doit se poursuivre, non seulement en termes d'équipement, mais également en chimiométrie, pour permettre la validation complète des méthodologies les plus performantes et la standardisation entre laboratoires.

Pour **distinguer une viande fraîche d'une viande qui a été congelée**, la méthode la plus couramment utilisée est celle de la mesure de l'activité enzymatique de la β-hydroxyaclyl-CoA-déshydrogénase (HADH) dans le jus exsudé par la viande (Ballin, 2010). Il est possible de mesurer l'activité d'autres enzymes telle que la citrate synthase (Simoniova *et al.*, 2013) ou d'utiliser des méthodes chimiométriques (Boerrigter-Eenling *et al.*, 2017). Ivanova *et al*. (2014) ont mesuré l'évolution du ribose, impliqué dans une réaction de Maillard avec les protéines et initiée par la congélation. Ils ont ensuite calculé les valeurs BME (Bovine Melanoidin Equivalent) des cuisses et filets de poulets frais et congelés. Lorsque ces valeurs sont inférieures respectivement à 30 et 51 mg BME/g, les morceaux ont été congelés puis décongelés. La SPIR a également été testée avec succès permettant de classer 94,4% des filets de poulets frais et 96,8% des filets de poulets congelés-décongelés (Atanassova *et al.*, 2018).

L'**irradiation des aliments** consiste à exposer des aliments à des rayonnements ionisants afin de réduire le nombre de micro-organismes qu'ils contiennent. C'est une méthode controversée de conservation des aliments, mais qui est utilisée dans certains pays (notamment les Etats Unis) et qui a été acceptée par l'OMS. La détection de l'**irradiation de la viande** de volailles peut être réalisée par spectroscopie de résonance paramagnétique électronique (Marchioni *et al.*, 2005a ; 2005b) ou en mesurant les composés hydrocarbonés et les 2-alkylcyclobutanones par chromatographie gazeuse (Horvatovich *et al.*, 2000). Une méthode a également été développée pour différencier les produits d'œufs irradiés et non irradiés (Tewfik, 2008).

2.9.1.4 Adultération des produits

Au-delà d'informations erronées ou non déclarées sur le mode de production, le régime alimentaire et les méthodes de transformation ou de conservation, ainsi que l'origine géographique, la viande et les produits à base de viande ainsi que les produits laitiers figurent parmi les aliments les plus susceptibles de subir une falsification dans la composition, encore appelée adultération.

Dans le cas des **produits carnés**, la falsification peut inclure la substitution de protéines musculaires de haute qualité par celles de moindre valeur (tissu conjonctif, gras), par des protéines d'autres espèces ou par des protéines végétales, l'ajout d'ingrédients non déclarés tels que des constituants d'origine animale (par exemple, plasma sanguin, abats), l'ajout de composants non carnés tels que l'eau et des additifs, des informations erronées d'étiquetage sur la quantité d'ingrédients carnés (Ballin, 2010 ; Montowska et Pospiech, 2011a). La **substitution de muscle par du collagène** dans les produits carnés peut être testée en quantifiant la teneur en 4-hydroxyproline qui est l'acide aminé majoritaire du collagène (Ballin, 2010) **et**

la **substitution de muscle par des abats** grâce à la spectroscopie dans le moyen infra-rouge (Al-Jowder *et al.*, 1999). La **substitution de graisse animale par des huiles végétales** dans les produits carnés peut être révélée par le dosage de phytostérols (stigmasterol, β-sitostérol) présents uniquement dans les huiles végétales (Ballin, 2010). La **substitution de protéines animales par des protéines végétales** dans les produits carnés peut être révélée par des tests ELISA spécifiques (exemple : protéines de soja (Belloque *et al.*, 2002)).

Pour les **produits laitiers**, le prix plus élevé du lait de chèvre, de brebis ou de bufflonne comparativement au lait de vache, et la variabilité saisonnière de sa disponibilité, sont aussi des facteurs susceptibles de d'induire des pratiques frauduleuses de dilution, d'ajout de protéines non animales (soja) ou de mélange de laits de différentes espèces.

Pour **les œufs,** des études s'intéressent à la détection de traces de polluants chimiques ou d'antibiotiques. Ainsi Huet *et al.* (2005) décrivent une méthode utilisant des anticorps pour détecter des contaminations en nitroimidazole. Hagren *et al.* (2005) ont développé un test immunologique pour rechercher des traces d'anticoccidien dans l'œuf, tandis que Draisci *et al.* (1995) ont utilisé une méthode par micro HPLC pour détecter les Nicarbazanides. Les antibiotiques de type tétracycline peuvent être recherchés à l'aide de méthode HPLC (De Ruyck *et al.*, 1999).

Dans tous les cas, les conséquences sont non seulement d'ordre économique et nutritionnel, mais également juridique du fait d'une traçabilité compromise, ou encore éthique car portant atteinte à la liberté de choix des consommateurs, par exemple dans la pratique de leur religion.

Nous développons ici surtout le sujet de la falsification des produits par **substitution d'espèce** ; elle peut concerner des produits de consommation courante (cf. le scandale des lasagnes à la viande de cheval en France en 2013) et des produits traditionnels (Costa *et al.*, 2016 ; Montowska et Pospiech, 2012a). Diverses méthodes ont été développées pour réaliser des tests d'**identification des espèces animales** et d'**authentification de la non-substitution d'espèce dans les produits** ; elles incluent des méthodes basées sur la détection des protéines et de l'ADN ou sur la spectroscopie.

Méthodes basées sur les protéines

Des méthodes basées sur les protéines, incluant les techniques électrophorétiques[2], chromatographiques[3] et immunochimiques[4], ont été proposées à des fins de détection de protéines spécifiques d'espèces afin de révéler l'éventuelle incorporation de viande ou de lait d'espèces animales autres que celles mentionnées sur l'étiquette des produits. Les données sur la sensibilité de détection protéique (limite de détection) sont présentées dans les Tableau (viande) et 32 (lait et produits laitiers).

L'*électrophorèse de protéines sur gel de polyacrylamide en conditions dénaturantes*[5] a été utilisée pour **l'identification de l'espèce** dans la chair ou la viande, sur la base de différences de mobilité des protéines musculaires (myosine, actine, α-actinine, tropomyosine, troponine) entre les espèces. C'est le cas par exemple pour différencier morue, merlan, églefin et lieu noir à partir de la chair de poisson cru. En effet, du fait du très grand nombre d'espèces de poissons commerciaux (poissons sauvages et d'élevage), l'identification de l'espèce de poisson dans les produits alimentaires est cruciale et a donné lieu à de nombreux développements méthodologiques afin de s'adapter au produit fini (poisson entier, filet, conserves de poisson, brandade de morue, surimi…). Ainsi, avant les méthodes basées sur l'ADN qui sont utilisées depuis 25 ans, des méthodes basées sur la **séparation des protéines** sarcoplasmiques par électrophorèse par isofocalisation dans un gel de polyacrylamide à gradient de pH et comparaison du profil électrophorétique à des bases de données de référence (Morel, 1978) ont été très utilisées. Ces méthodes simples et peu coûteuses sont encore utilisées dans certains laboratoires de contrôle.

En raison de son manque de reproductibilité et de son faible pouvoir discriminant, la technique est cependant mal adaptée à l'authentification d'espèce dans les mélanges de viande et dans les produits transformés (produits fumés ou marinés) pour lesquels les traitements peuvent altérer la mobilité des protéines (séparation ambiguë des protéines des poissons salmonidés : saumon vs. truite par exemple). Il en est de même pour la technique de focalisation isoélectrique[6] pourtant plus résolutive. Pour le lait, les différences de mobilité des protéines majoritaires (caséines) entre les espèces (bovine, ovine, caprine…) permettent l'identification d'espèce avec une bonne sensibilité (Tableau 32). L'électrophorèse bi-dimensionnelle[7]

---

[2] Techniques séparatives des protéines dans un champ électrique

[3] Techniques séparatives des composés d'un mélange, basées sur les différences d'affinité des composés avec la phase stationnaire et la phase mobile

[4] Techniques basées sur la réaction entre un antigène et un ou plusieurs anticorps

[5] Conditions dans lesquelles les protéines sont dénaturées par l'ajout d'un agent chimique, c'est-à-dire perdent leur repliement et se déplient

[6] Technique de séparation des protéines en fonction de leur point isoélectrique (pI)

[7] Technique d'*électrophorèse* qui permet de séparer les protéines en fonction de leur point isoélectrique (pI) et de leur poids moléculaire

(2-DE) couplée à l'analyse d'images permet la séparation de milliers de protéines et la détection de différences dans l'abondance des protéines, ainsi que la révélation d'isoformes et de modifications post-traductionnelles. Des différences dans le poids moléculaire et le point isoélectrique des isoformes de chaîne légère de myosine spécifiques à l'espèce ont été révélées par 2-DE dans la viande de six espèces (bovin, porc, poulet, dinde, canard, et oie). La recherche de ces signatures protéiques caractéristiques est applicable à l'identification d'espèces dans des mélanges de viande crue, une différence de 2% dans les séquences de chaîne légère de myosine entraînant des mobilités électrophorétiques différentes (Montowska et Pospiech, 2011b). L'intérêt de la technique a été renforcé par les différences interspécifiques observées dans l'abondance des isoformes de chaîne légère de myosine dans la viande hachée et les produits carnés (exemple des saucisses). Ces différences permettent de détecter l'incorporation d'une viande frauduleuse au seuil de 10% d'incorporation (poids/poids) (Montowska et Pospiech, 2012b). Enfin, l'électrophorèse capillaire, qui présente un pouvoir de séparation élevé et une sensibilité élevée pour l'analyse des protéines, couplée avec une analyse discriminante linéaire, a révélé l'existence de différences qualitatives et quantitatives dans les protéines sarcoplasmiques issues de viandes de bœuf, de porc et de dinde crues, et a permis la discrimination des viandes sur la base des protéines hydrosolubles (Vallejo-Cordoba et Cota-Rivas, 1998). Toutefois, la sensibilité de détection (Tableau) et l'applicabilité de la technique reste à évaluer sur un nombre plus élevé d'échantillons.

Les techniques immunochimiques, basées sur la réaction spécifique entre antigènes et anticorps, sont fréquemment utilisées pour l'authentification d'espèces dans la viande et dans le lait. Le dosage immuno-enzymatique (enzyme-linked immunosorbent assay : ELISA) est plus particulièrement utilisé du fait de sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre, sa haute spécificité, sa sensibilité élevée et ses potentialités de débit élevé de façon automatisée. Toutefois, cette méthode peut être limitée par des modifications mineures de la nature de l'antigène ou la réactivité croisée avec d'autres espèces apparentées. Elle a également des limites pour l'identification des espèces dans les produits carnés transformés, car les protéines peuvent alors subir une agrégation altérant leur extraction, et une dénaturation induisant des modifications spécifiques de l'antigène, une diminution de la sensibilité du dosage ou des faux négatifs. Les tests commercialisés incluent généralement l'utilisation d'anticorps dirigés contre les protéines musculaires thermostables (exemple la troponine I). Les limites de détection dans les produits transformés peuvent varier en fonction de la teneur en matière grasse, du degré de traitement thermique, des tissus et de la maturation de la viande. Néanmoins l'application de la méthode ELISA a permis de détecter des espèces aviaires (poulet, dinde) avec une limite de détection de 1% d'incorporation dans du bœuf ou du porc (Djurdievic *et al.*, 2005). De même, elle a permis d'identifier toutes les espèces animales figurant sur les étiquettes de plusieurs produits à base de viande cuite, comme par exemple des saucisses et des jambons (López *et al.*, 2011). Un test ELISA sandwich basé sur deux anticorps monoclonaux, l'un dirigé contre la myoglobine bovine dénaturée et l'autre contre une séquence d'acides aminés unique de la myoglobine bovine, a permis d'évaluer la teneur en viande bovine dans des mélanges modèles (100%, 10%, 1%, 0,1%, 0,01% and 0%) avec de la viande de poulet ou de porc. Le seuil de détection du test est de l'ordre de 5 mg/mL de myoglobine quelles que soient leurs conditions de traitement. Ce test ELISA sandwich a permis de détecter la présence de viande de bœuf cuite à partir d'une teneur de 1% dans les mélanges modèles utilisés (Kotoura *et al.*, 2012). Pour les produits laitiers, des tests ELISA ont été développés pour les protéines majoritaires du lait (Tableau 32). L'approche ELISA à l'aide d'anticorps monoclonaux est efficace pour détecter l'adultération du lait par mélange avec une sensibilité variant de 0,001% d'incorporation (Hurley *et al.*, 2006 ; Levieux et Venien, 1994) à 0,5% selon la qualité des anticorps utilisés. Toutefois, la sensibilité des tests ELISA n'est pas toujours suffisante pour permettre la détection dans des mélanges pour les laits traités thermiquement ou dans les fromages (Zeleňáková *et al.*, 2016). Une alternative intéressante à l'analyse ELISA repose sur l'utilisation de dispositifs d'analyse composés d'anticorps immobilisés sur un support solide et connectés à des transducteurs convertissant la liaison de l'antigène en un signal physique. Ces immuno-capteurs sont une piste prometteuse pour l'analyse rapide, spécifique et précise de la composition des aliments notamment du lait (Dupont et Muller-Renaud, 2006 ; Dupont *et al.*, 2003). Ainsi, Angelopoulou *et al.* (2015) ont développé un dispositif permettant de détecter en 10 minutes l'ajout de lait bovin dans du lait de chèvre avec une limite de détection de 0,04% (volume/volume). Récemment, Huang *et al.* (2018) ont publié la mise au point d'un immuno-capteur pour la détection de la lactoferrine bovine qui permet d'identifier cette protéine dans le lait en poudre avec une détection limite de 4,9 pg/ml.

Les techniques chromatographiques sont une alternative aux méthodes précédentes. La chromatographie en phase liquide à haute performance a été utilisée pour différencier de la viande d'autruche de viandes de porc, de bœuf et de poulet sur la base de profils chromatographiques caractéristiques de la lysine, de la glutamine, de la carnosine et de l'ansérine (Hung *et al.*, 2011). La chromatographie liquide ultra-performante à échange anionique (UPLC) couplée à une détection par barrette de diodes a été appliquée pour la détection de viande de porc à hauteur de 5% dans du bœuf haché (Giaretta *et al.*, 2013). La spectrométrie de masse[8] est une technique physique d'analyse permettant de détecter et d'identifier des molécules d'intérêt

[8] Technique physique d'analyse permettant de détecter et d'identifier des molécules d'intérêt par mesure de leur masse, et de caractériser leur structure chimique

par mesure de leur masse, et de caractériser leur structure chimique. Les spectromètres de masse modernes permettant d'atteindre une précision de masse et une sensibilité élevée, l'utilisation de cette technique pour l'identification de peptides permet la détection de faibles quantités d'espèces non déclarées (de l'ordre de 0,5% (poids/poids)) dans les produits carnés (Sentandreu *et al.*, 2010 ; Sentandreu et Sentandreu, 2014). Sentandreu *et al.* (2010) ont ainsi utilisé une approche protéomique pour mettre en évidence un ajout de viande de poulet (0,5 à 10%) dans de la viande hachée de porc (90 à 99,5%) sous forme crue ou cuite et basée sur l'utilisation de peptides biomarqueurs. Toutefois, le coût élevé de l'équipement, le besoin en techniciens spécialisés et la durée de l'analyse constituent des facteurs limitants à une analyse en routine. La spectrométrie de masse en tandem couplée à la chromatographie (LC-MS/MS) est particulièrement bien adaptée pour l'identification de protéines présentes dans un mélange complexe. Une approche par LC-MS/MS a été utilisée avec succès pour la détection quantitative de viande de poulet dans des mélanges de viandes de porc et de poulet en plusieurs étapes : extraction des protéines myofibrillaires, enrichissement de protéines cibles par focalisation isoélectrique, digestion trypsique de l'isoforme de chaîne légère de myosine (protéine thermostable) et analyse des peptides ainsi générés. Un couplage de LC-MS/MS avec la méthode Multiple Reaction Monitoring[9] (MRM) a également été proposé pour l'identification de viande de cheval et de porc à hauteur de 0,13% à 0,55% dans de la viande bovine halal (von Bargen *et al.*, 2013). Une simplification et une optimisation de la technique a conduit à détecter 0,24% (poids/poids) de viande de porc et de cheval dans une matrice de viande de bœuf (von Bargen *et al.*, 2014), y compris dans les produits transformés car les peptides analysés sont thermostables. Appliquée à la recherche de l'adultération du lait, la LC-MS a permis de détecter 5% de lait de vache dans du lait de chèvre, sur la base de l'analyse de la β-lactoglobuline (Chen *et al.*, 2004). Grâce à la spectrométrie de masse MALDI-Tof MS[10], Cozzolino *et al.* (2001) ont évalué l'incorporation de lait de vache dans du lait de brebis et dans du lait de bufflonne (limite de détection 5%) sur la base des profils peptidiques spécifiques à l'espèce. Avec une approche similaire, Di Girolamo *et al.* (2014) ont détecté l'adultération du lait d'ânesse et de chèvre par du lait d'une autre espèce avec une limite de détection inférieure à 0,5%. Ces méthodes basées sur la spectrométrie de masse (MALDI-TOF, LC/MS/MS) sont également en cours de développement pour distinguer deux espèces proches, la truite arc-en-ciel (*Onchorhynchus mykiss*) et la truite fario (*Salmo trutta*) (Ulrich *et al.*, 2017). Cependant, ces études nécessitent encore d'être validées pour identifier d'autres espèces de poisson et pour établir des bases de spectres de référence.

Enfin, la spectrométrie de masse par analyse de l'extraction du liquide de surface (LESA-MS) a été développée comme technique rapide pour la discrimination de cinq espèces de viande (porc, bovin, cheval, poulet et dinde) (Montowska *et al.*, 2014b) et la détection de 10% de viande de porc, de cheval ou de dinde cuite dans une matrice de viande bovine et de 5% de poulet dans la viande bovine. Toutefois la sensibilité de cette méthode s'est avérée beaucoup plus faible comparativement à la LC-MS/MS.

Une application supplémentaire de la détection des protéines peut être d'authentifier l'alimentation des animaux d'élevage en recherchant la présence de protéines animales ; par exemple, authentifier les espèces à l'origine des farines animales, puisque les seules farines d'animaux terrestres autorisées dans l'alimentation des poissons d'élevage sont celles issues de porcs et de volailles. Dans cet objectif, Steinhilber *et al.* (2018) ont développé et validé un dosage immunologique basé sur la combinaison de la détection et la quantification de peptides d'alpha-2-macroglobuline spécifiques de 8 espèces (bovin, ovin, porc, chèvre, cheval, poulet, dinde, oie, canard) à l'aide d'anticorps spécifiques, et d'une analyse par chromatographie en phase liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem. Cette approche a permis de détecter dans l'alimentation des poissons des protéines animales et produits sanguins spécifiques de ces 8 espèces en proportion 0,1% à 0,75% (poids/poids).

Ainsi, les méthodes basées sur les protéines ont montré leur efficacité à discriminer des espèces dans la viande et dans le lait y compris dans des mélanges. Ces méthodes sont complexes et nécessitent généralement des équipements spécifiques et des techniciens experts pour la préparation et l'analyse des échantillons. Une autre limite à l'application de ces méthodes est la variabilité liée aux effets de facteurs comme le type de tissu/fluide, l'âge et le sexe de l'animal, les traitements technologiques (chauffage, cuisson, coagulation…) et la période de stockage qui peuvent altérer les propriétés physicochimiques des constituants de la viande ou du lait et par conséquent diminuer la stabilité des protéines voire les dégrader lors des processus de transformation. C'est pourquoi ces méthodes donnent généralement de meilleurs résultats lorsqu'elles sont appliquées sur des produits crus plutôt que sur des produits transformés. Les approches protéomiques basées sur le pouvoir discriminant élevé de peptides thermostables ainsi que les immuno-capteurs, constituent des pistes

[9] Mode d'analyse MS/MS qui comporte une méthode de fragmentation peptidique supplémentaire. Cette méthode est adaptée à la quantification des protéines.

[10] Spectrométrie de masse utilisant un spectromètre couplant une source d'ionisation laser assistée par une matrice (MALDI = Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionisation) et un analyseur à temps de vol (TOF = Time-Of-Flight)

privilégiées pour améliorer la différenciation des espèces dans la viande et dans le lait par rapport aux autres méthodes utilisant des protéines.

Méthodes basées sur l'ADN

Des méthodes basées sur l'analyse de l'ADN ont été utilisées pour l'authentification de l'espèce animale utilisée dans le produit et l'identification d'une adultération du produit, comme celle qui a conduit au scandale des lasagnes à la viande de cheval en Europe en 2013 (Amaral *et al.*, 2016). Pour identifier une substitution frauduleuse de viande ou de poisson, l'**identification de l'espèce** est ainsi couramment effectuée grâce à l'analyse de l'ADN (Alikord *et al.*, 2018; Cottenet *et al.*, 2016 ; Hellberg *et al.*, 2017 ; Lago *et al.*, 2011 ; Rahmati *et al.*, 2016 ; Ren *et al.*, 2017) ; première étude par Bartlett et Davidson en 1991 sur le thon (Bartlett et Davidson, 1991).

Du fait de l'ubiquité des acides nucléiques dans tous les types de cellules et leur plus grande stabilité que les protéines, les méthodes basées sur l'ADN représentent en effet des méthodes de choix pour surmonter les limites de l'analyse des protéines présentées ci-dessus. La plupart de ces méthodes reposent sur la réaction de polymérisation en chaîne de l'ADN (PCR) dont elles tirent parti de la spécificité, la sensibilité, la simplicité et la rapidité, permettant l'identification d'espèces animales y compris dans des aliments complexes et transformés (Tableau 33). La PCR conventionnelle est couramment utilisée pour la détection des espèces dans une gamme de viandes et de produits carnés couvrant toutes les espèces à viande domestiques et de gibier. Les gènes présents dans l'ADN (nucléaire et mitochondrial) peuvent être ciblés en tant que marqueurs d'ADN spécifiques à une espèce. L'ADN mitochondrial (ADNmt) est particulièrement intéressant comme source de marqueurs du fait de sa plus grande abondance et de sa propriété à évoluer par mutation plus rapidement que l'ADN nucléaire, un avantage pour l'identification de taxons[11] apparentés phylogénétiquement (Fajardo *et al.*, 2010 ; Girish *et al.*, 2005). Dans le cas des produits laitiers, la PCR peut être appliquée à la détection de l'adultération de lait ou de fromages. Un avantage important offert par cette technique est de permettre la détection de l'adultération du lait après traitements technologiques tels que le traitement thermique ou la fabrication de fromage. La technique PCR a par exemple permis de détecter l'incorporation de faibles quantités de lait de vache, de l'ordre de 0,01 (Bobková *et al.*, 2009) dans du lait de brebis ou de chèvre, de 0,1% dans du lait de bufflonne (Lopez-Calleja *et al.*, 2005), ainsi que de 0,1% dans des fromages de chèvre (Mafra *et al.*, 2007) et de 0,5% dans de la mozzarella (Feligini *et al.*, 2005). La PCR en temps réel[12] est rapide, sensible, reproductible, quantitative et elle limite le nombre de faux positifs comparativement à la PCR conventionnelle. Son utilisation a été rapportée pour l'identification des cervidés (Chen *et al.*, 2009) et de lièvre (Santos *et al.*, 2012) ;(*cf.* limites de détection dans le Tableau 33). La PCR en temps réel a été appliquée pour détecter l'origine animale du lait des produits laitiers ciblant les gènes du cytochrome b ou de l'ARN ribosomal 12S (Tableau 34) avec une limite de détection variant de 0,1% à 0,6% d'incorporation. Récemment, Seçkin *et al.* (2017) l'ont mis en œuvre pour identifier l'espèce d'origine du lait entrant dans la composition de 90 fromages commercialisés. Les résultats ont montré que seulement 36,67% des fromages de vache, 16,67% des fromages de chèvre et 3,34% des fromages de brebis provenaient de lait pur comme indiqué sur l'étiquette.

La PCR peut être couplée avec d'autres techniques telles que l'analyse des fragments de PCR par digestion enzymatique (RFLP) (Tableau 35), ou par séquençage de fragments de PCR amplifiés par exemple à partir de régions variables de gènes mitochondriaux. Le séquençage PCR permet de différencier avec succès les espèces bovin, buffle, ovin, caprin et gayal dans la viande sur la base de la séquence du gène de l'ARN ribosomique 12S mitochondrial, et d'authentifier la (les) espèce(s) entrant dans la composition de produits carnés transformés (galettes, blocs cuits à la vapeur, croquettes et blocs autoclavés). Toutefois, la principale limitation de cette méthode réside dans son inadéquation pour l'identification d'espèces à de faibles taux d'incorporation (Girish *et al.*, 2004). Le DNA-barcoding (code barre de l'ADN) consiste plus particulièrement à séquencer des fragments de PCR ciblés dans une région du gène de la sous-unité 1 de la Cytochrome-Oxydase dans le génome mitochondrial. Cette méthode a trouvé aussi une application dans l'identification en aveugle, rapide, fiable, et automatisable des espèces animales (Hebert *et al.*, 2003), notamment dans les produits de la mer, des viandes et des produits carnés incluant le gibier (Hellberg *et al.*, 2017; Kane et Hellberg, 2016 ; Quinto *et al.*, 2016). Pour l'identification à haut débit des espèces, les puces à ADN apparaissent comme des outils potentiels pour la détection d'espèces multiples, mais leur sensibilité doit être améliorée avant d'envisager leur application à la détection de la non-adultération des produits carnés et laitiers.

Grace à une révolution technologique récente, une technique appelée à se généraliser, notamment pour l'analyse médico-légale, consiste à réaliser un séquençage nouvelle génération (NGS) de l'ADN. Bien que présentant un fort potentiel pour l'identification des espèces animales, elle est encore peu utilisée pour la différenciation des espèces dans la viande. Ce

[11] Un *taxon* correspond à un groupe entité d'êtres vivants regroupés parce qu'ils possèdent des caractères en communs du fait de leur parenté.

[12] Technique de PCR dont le suivi est permis par l'incorporation de molécules fluorescentes et qui peut être réalisée en temps réel contrairement à la PCE conventionnelle pour laquelle le résultat est obtenu en point final

potentiel d'identification des espèces provient de la possibilité d'identifier plusieurs espèces à la fois, y compris des espèces non attendues, sans information préalable sur leur présence, en se basant sur des lectures de séquences à haut débit et de la bio-informatique. Tillmar *et al.* (2013) ont, par exemple, conçu une méthode ciblée sur l'analyse par NGS d'une courte séquence d'ADNmt sur 300 espèces de mammifères. Ils ont distingué plus de 99,9% des espèces avec la possibilité de détecter une incorporation à des teneurs aussi faibles que 1% (poids/poids) dans des mélanges. Eprouvée dans des saucisses de référence composées d'espèces de mammifères (porc, vache, cheval, mouton) et aviaires (poulet, dinde), la méthode a permis de quantifier correctement l'incorporation à 1% (poids/poids) (Ripp *et al.*, 2014). Elle offre de plus la possibilité de détecter des quantités infimes d'ADN, comme par exemple de faibles niveaux d'ADN de porc et de cheval dans de la viande (Bertolini *et al.*, 2015). Le séquençage NGS a également été appliqué à l'identification des espèces dans le lait et les fromages (Ribani *et al.*, 2018) mais il reste à déterminer si les quantités de l'ADN de chaque espèce peuvent être impactées par la présence d'ADNmt issu des cellules somatiques du lait.

Pour la production de viande de canard, plusieurs espèces ou génotypes sont utilisés (Pékin, Barbarie et mulard). Hird *et al.* (2005) et Martin *et al.* (2007a) ont mis au point des tests PCR (Polymerase Chain Reaction ou réaction de polymérisation en chaîne de l'ADN) permettant la distinction conjointe de canard col-vert et Barbarie ou uniquement de ce dernier dans des mélanges de viandes issues de plusieurs espèces animales. Martin *et al.* (2007b) et Pegels *et al.* (2012) ont utilisé une méthode PCR permettant une **identification qualitative** de tissus de poulet, dinde, canard mulard et oie dans des produits carnés avec un taux d'incorporation de chaque espèce cible variant de 0,1 à 100%. Cette méthode d'identification est couramment utilisée aussi pour tester **l'adultération du foie gras** de canard et oie avec du foie provenant d'autres espèces dans des produits transformés. Rodriguez *et al.* (2003a ; 2003b) ont mis au point un test PCR permettant de détecter la présence de foie de porc ou de poulet dans des produits à base de foie gras avec un taux d'incorporation minimal de 0,1%. Rodriguez *et al.* (2004; 2003b) ont aussi développé une PCR leur permettant de différencier foie gras de canard mulard vs. foie gras d'oie et de quantifier les taux respectifs d'incorporation.

Les méthodes de biologie moléculaire pour l'identification des espèces de poisson les plus largement utilisées permettent l'amplification et le séquençage d'un fragment ciblé de l'ADN, en général de l'ADN mitochondrial, les plus ciblés étant des fragments des gènes codant pour le cytochrome b ou pour le cytochrome oxydase sous-unité I. De même que pour les exemples sur la viande, des méthodes par qPCR ont été développées, pour spécifiquement distinguer une espèce dans un mélange potentiel (exemple de l'étude de Taylor *et al.* (2002) sur 3 espèces de gadidés).

La surexploitation des populations sauvages d'esturgeons du fait de la valeur économique du caviar a conduit à une presque extinction des populations (85% des stocks sont sur la liste rouge des espèces menacées). Les prix très élevés du caviar incitent à de nombreuses pratiques frauduleuses, le caviar d'esturgeons d'élevage (de valeur moindre) étant vendu pour du caviar sauvage (« top quality »), ou bien du caviar d'esturgeons d'élevage de moindre qualité vendu pour du caviar d'hybrides considéré de très bonne qualité. Des approches moléculaires ont ainsi mises au point par Boscari *et al.* (2014) pour identifier cinq espèces d'esturgeons ainsi que les deux hybrides les plus fréquemment commercialisés en Europe et Amérique du Nord (à l'heure actuelle, il existe de nombreux hybrides). Elles sont basées sur des SNP (single nucleotide polymorphism) de la protéine ribosomique S7, du gène codant pour la vimentine et du gène mitochondrial de la D-loop. En plus de fournir un outil pour contrôler le commerce mondial et combattre le commerce illégal et frauduleux du caviar, ces approches moléculaires sont importantes pour la gestion et la conservation de ce groupe de poissons extrêmement menacé.

De nombreuses méthodes « émergentes » basées sur l'ADN sont en cours de développement, telles que les puces à ADN (projet en Allemagne, anonyme), l'analyse des courbes de fusion à haute résolution (HRM) (Fernandes *et al.*, 2017 ; Tomas *et al.*, 2017), les méthodes d'amplification isotherme (Saull *et al.*, 2016), de PCR-ELISA (Taboada *et al.*, 2014) et de son développement d'analyse rapide en bandelette (Taboada *et al.*, 2017).

Les méthodes basées sur l'ADN, généralement très rapides et faciles à mettre en œuvre à un coût modéré, ont pour la plupart un potentiel important à discriminer efficacement les espèces dans les produits animaux (viande, lait, fromages). Les autres avantages à l'application de ces méthodes sont leur spécificité, leur sensibilité élevée offrant la possibilité de détecter de faibles quantités d'ADN, et leur facilité d'automatisation. En combinaison, ces méthodes ont montré une grande efficacité pour l'analyse de matrices complexes et transformées. Le développement récent des techniques à haut-débit permettra d'améliorer la détection des pratiques frauduleuses dans des mélanges de viandes et/ou dans les produits carnés transformés dans lesquels l'ADN peut être dégradé. Toutefois, une limitation de ces méthodes est leur incapacité à détecter l'origine tissulaire d'un échantillon (tissu et produits sanguins).

Méthodes spectroscopiques

La possibilité d'utiliser la spectroscopie à des fins d'authentification des espèces dans la viande a été récemment explorée du fait de sa rapidité et de son caractère non destructif. Elle permet d'obtenir des informations sur la structure chimique des

molécules sans altérer l'échantillon. L'élément essentiel pour son application est la constitution de bases de données spectrales incluant toutes les variations possibles des paramètres dans les matrices évaluées. En s'appuyant sur de telles bases de données, des modèles peuvent être créés, testés et validés à l'aide d'outils statistiques multivariés appropriés. À ce jour, différentes techniques ont été appliquées aux études d'authentification de la viande, notamment la spectroscopie Raman, l'infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), le proche infrarouge (SPIR) et le moyen infrarouge (MIR). Cependant, la plupart des études ne portent que sur l'évaluation des viandes crues et elles comprennent généralement un faible nombre d'échantillons pour constituer les modèles proposés (Tableau 36).

L'utilisation de la spectroscopie FTIR dans la région du moyen infra-rouge et de la calibration des moindres carrés partiels (PLS) a été proposée par Rohman *et al.* (2011) pour détecter l'adultération de boulettes de viande de bœuf avec de la viande de porc. La méthode s'est révélée suffisamment précise pour détecter l'adultération de la viande de bœuf dans des mélanges modèles. Pour ce faire, des échantillons de viande de bœuf et de porc ont été prélevés au hasard dans cinq abattoirs et des mélanges ont ensuite été réalisés (viande de porc incorporée à hauteur de 1%, 3%, 5%, 10% et 25% dans les boulettes de viande (poids/poids). L'application de cette méthode n'a cependant pas montré une efficacité totale pour les mélanges binaires de viande (Rahmania *et al.*, 2015). Une étude utilisant la spectroscopie Raman combinée à la chimiométrie (Boyaci *et al.*, 2014) a conclu à la fiabilité de la méthode pour discriminer de la viande de bœuf de celle de cheval, sur la base de spectres obtenus à partir de la graisse de différentes parties de la carcasse, ainsi que dans des mélanges modèles (renfermant de la viande de cheval à hauteur de 25%, 50% et 75% (poids/poids)). Dans l'étude de Campos *et al.* (2014), cette approche a permis le classement correct de saucisses de Francfort à base de poulet, de dinde et de viandes mélangées, ainsi que de pâtés contenant uniquement de la viande de porc ou de bœuf (100% des échantillons bien classés), mais un classement moins correct (72%) a été obtenu pour des pâtés préparés avec des mélanges binaires (1:1 ; poids/poids) de ces viandes (Restaino *et al.*, 2011). La robustesse de ces conclusions devra être testée avec un nombre plus élevé d'échantillons.

La spectroscopie dans le proche infrarouge a montré qu'elle était appropriée pour réaliser un tri préliminaire d'échantillons sur lesquels l'adultération de bœuf haché par de la viande de dinde était recherchée (Alamprese *et al.*, 2013). L'utilisation de la spectroscopie dans le visible et le proche infrarouge permet également de distinguer et de bien classer la viande (89% à 100%) et le jus de viande (95% à 100%) de bœuf, de lama et de cheval (Mamani-Linares *et al.*, 2012).

La performance de trois méthodes différentes basées sur la spectroscopie proche infrarouge à *transformée de Fourier* (ou spectroscopie IRTF) a été évaluée pour la détection de l'adultération de saucisses de veau avec de la viande de porc, à l'aide d'un appareil IRTF de laboratoire à haute performance, d'un équipement IRTF industriel et d'un spectromètre IRTF portable (Schmutzler *et al.*, 2015). Les deux premiers équipements ont été en mesure de détecter le niveau de falsification le plus bas testé (10% (poids/poids) d'incorporation de viande de porc ou de graisse de porc dans les saucisses de veau), y compris au travers de l'emballage. Récemment Sousa *et al.* (2018) ont utilisé la spectroscopie IRTF pour détecter un remplacement frauduleux de saumon par de la truite arc-en-ciel. Ils ont pu reconnaître précisément le taux de substitution du saumon par de la truite arc-en-ciel dans des « mini-burgers » de saumon contenant de 0 à 100% de truite (par pas de 10%) conservés crus à 3°C, en effectuant des mesures d'IRTF sur les lipides extraits.

La *spectroscopie* dans le proche infrarouge, couplée avec l'analyse d'image, a été proposée comme une alternative rapide et peu coûteuse. L'imagerie hyperspectrale proche infrarouge intègre les techniques spectroscopiques et d'imagerie et fournit à la fois des informations spectrales et spatiales, ce qui lui confère un fort potentiel pour détecter un type particulier de viande et sa distribution dans un échantillon. Elle a permis de détecter la falsification de viande d'agneau hachée avec du porc (Kamruzzaman *et al.*, 2013), ainsi que l'incorporation de viande de cheval dans de la viande de bœuf hachée avec une précision de 99% (Kamruzzaman *et al.*, 2013). De plus, Zhao *et al.* (2019) ont démontré qu'il est possible d'appliquer l'imagerie hyperspectrale pour détecter l'adultération de viande de bœuf fraîche par de la viande avariée. L'ensemble de ces études montre que l'imagerie hyperspectrale associée à l'analyse multivariée peut être appliquée avec succès pour la détection rapide de l'adultération de la viande.

La spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (*RMN 1H*) s'est révélée appropriée pour distinguer de la viande de bœuf de la viande de cheval en exploitant les signatures de triglycérides obtenues à 60 MHz (Jakes *et al.*, 2015). L'application de ces signatures à 107 extraits a permis d'authentifier correctement tous les échantillons sauf un (bœuf : 90/91 ; cheval : 16/16). Cette méthode constitue ainsi une alternative potentielle à haut débit rapide, peu coûteuse et simple d'utilisation pour l'authentification de la viande crue.

L'utilisation des méthodes spectroscopiques est une piste prometteuse pour détecter l'adultération des produits. Leur avantage réside principalement dans la simplicité de leur mise en œuvre (préparation des échantillons) et la possibilité de réalisation par des techniciens non experts. Sans cibler des molécules particulières, les méthodes spectroscopiques ont évolué récemment pour l'identification des espèces dans la viande et dans le lait. Toutefois, il faut encore valider ces

méthodes sur des effectifs importants et vérifier leur pertinence pour les mélanges de viandes, avant d'envisager leur applicabilité sur le terrain. L'élargissement des modèles de calibration avec une large gamme d'échantillons différant en termes d'années d'obtention, d'origine géographique, de races d'animaux, de systèmes de production et de muscles permettra de contribuer à développer des modèles plus robustes.

Tableau 2.9.1. Synthèse des méthodes basées sur les protéines appliquées à l'identification des espèces animales et à l'authentification de la non-adultération des viandes et produits carnés

Méthode	Espèce cible	Molécule cible	Produit	Sensibilité de détection	Références
2-DE	Bovin, porc, poulet, dinde, canard, oie	Isoformes de chaine légère de myosine	Viande crue	-	(Montowska et Pospiech, 2011b)
2-DE	Bovin, porc, poulet, dinde, canard, oie	Isoformes de chaine légère de myosine	Mélanges de viande hachée, viandes transformés (saucisses)		(Montowska et Pospiech, 2012b)
Electrophorèse Capillaire	Bovin et autruche	Protéines hydrosolubles et fractions protéiques solubles dans le sel	Viande crue	-	(Vallejo-Cordoba *et al.*, 2010)
ELISA avec anticorps monoclonaux	Poulet et dinde	Protéines musculaires solubles thermostables de poulet (35, 30, 25, et 23,5 kDa) et de dinde (29,5 – 26-24,5, et 22 kDa)	Après cuisson à 100º C, 15 min. (viande de porc, bœuf, agneau, cheval et cerf)	1% (poulet dans bœuf cuit ou poulet dans porc cuit)	(Djurdievic *et al.*, 2005)
ELISA Sandwich avec anticorps monoclonaux	Porc	Troponine I	Viande crue et mélanges de viandes après traitement thermique	0,05% (porc dans poulet cru, cuit, ou autoclavé), 0,05% (porc cru dans bœuf), et 0,1% (porc cuit ou autoclavé dans mélanges de bœuf)	(Liu *et al.*, 2006)
ELISA avec anticorps monoclonaux	Bovin	Myoglobine bovine dénaturée par le SDS-et peptide comportant une séquence en acides aminés spécifique de la myoglobine bovine	Viandes crues et cuites	9,5 ng/mL (détection) 12,8 ng/mL (quantification)	(Kotoura *et al.*, 2012)
ELISA Sandwich	Mammifères (bovin, porc, agneau, cheval)	Troponine I	Viandes crues et produits carnés	4,8 ng/mL (détection); 8,7-52 ng/mL (quantification)	(Zvereva *et al.*, 2015)
OFFGEL fractionnement par focalisation isoélectrique et LC-ESIMS/MS	Poulet	Deux peptides (DQGTFEDFVEGLR *et al*GQNPTNAEINK) de la chaine légère de myosine 3	Viandes crues et cuites	0,5% (poulet dans viande de porc ; quantification en utilisant des peptides marqués avec un isotope stable comme standard interne)	(Sentandreu *et al.*, 2010)
LC-MS/MS et micro LC-MS/MS basés sur MRM et MRM3	Cheval et porc	Peptides YDIINLR de la troponine T, TLAFLFAER de la myosine-4, et EFEIGNLQSK de la myosine-2	Viandes crues	0,55% (cheval ou porc dans viande de bœuf) ; 0,13% (porc dans viande de bœuf : micro-LC et MRM3)	(von Bargen *et al.*, 2013)

LC-MS/MS basés sur MRM	Poulet, canard, oie, porc, bœuf,	10 peptides (volailles) et 7 peptides	Divers produits commerciaux : saucisses (sèches, fumées,…), terrines et pâtés	Présence simultanée de peptides spécifiques d'espèce	(Fornal et Montowska, 2019)
HPLC-MS/MS basé sur MRM et MRM3	Cheval et porc	Peptides YDIINLR de (troponine T), TLAFLFAER (myosine-4), SALAHAVQSSR (myosine-1 et -4), EFEIGNLQSK (myosine-2), LVNDLTGQR (myosine-1)	Matrices alimentaires transformées	0,24% (cheval ou porc dans viande de bœuf)	(von Bargen *et al.*, 2013)
LESA-MS/MS	Cheval, porc, poulet, dinde	Plusieurs peptides thermostables de MLC1/3f, MLC2f, troponine C, myoglobine, myosine-1, et myosine-4	Viande crue	10% (porc cuit, viande de cheval ou de dinde), 5% (poulet) dans de la viande de bœuf)	(Montowska *et al.*, 2014a)
LESA-MS/MS	Cheval, porc, poulet, dinde, bovin	25 peptides thermostables spécifiques d'espèce	Viande transformée	-	(Montowska *et al.*, 2015)

Légende :
Performance analytique : pourcentage de viande d'une espèce (poids/poids) détecté dans une viande ou un produit carné après adultération

2-DE, Electrophorèse bi-dimensionnelle;

ELISA, test immuno-enzymatique (enzyme-linked immunosorbent assay) ;

HPLC-MS/MS, chromatographie en phase liquide à haute performance- couplée à la spectrométrie de masse en tandem ;

LC-MS/MS, chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse en tandem ;

LC-ESI-MS/MS, chromatographie en phase liquide - Ionisation électrospray couplée à la spectrométrie de masse en tandem ;

LESA-MS/MS, spectrométrie de masse par analyse de l'extraction du liquide de surface couplée à la spectrométrie de masse en tandem ;

MRM, multiple reaction monitoring; MRM3:

SDS, sodium dodecyl sulfate.
Adapté de Amaral *et al.* (2016)

Tableau 2.9.2. Identification des espèces de ruminants dans les mélanges de lait et les fromages par ELISA

Méthode	Molécule cible	Limite de détection (%)	Référence
Électrophorèse	Para-k-caséine bovine	1,0%	(Kaminaridesa et Koukiassa, 2002)
	Caséine bovine	1,0%	(Tamime *et al.*, 1999)
Focalisation isoélectrique	Para-k-caséine caprine et ovine	1,0%	(Mayer *et al.*, 1997)
Électrophorèse capillaire	α-lactalbumine caprine et β-lactoglobuline A bovine	2,0% de lait de vache dans lait de chèvre et 4% de lait de vache dans fromage de chèvre	(Cartoni *et al.*, 1999)
	Analyse complète de la caséine bovine et des protéines de lactosérum	-	(Herrero-Martinez *et al.*, 2000)
	Analyse complète des caséines et protéines de lactosérum bovines, ovines et caprines	1,0%	(Dejong *et al.*, 1993)
	Caséine bovine	1,0% de lait de vache dans du lait de chèvre entier cru ou reconstitué	(Lee *et al.*, 2001)
Micropuce basée sur isochatophorèse + électrophorèse électrocapillaire	Protéines de soja	0,1% de protéines de soja dans les protéines de produit laitier	(Wu *et al.*, 2014)
Électrophorèse capillaire - spectrométrie de masse	β-lactoglobulines non bovines, en β-lactoglobulines totales dans le mélange de lait (bovin plus ovin ou bovin plus caprin)		(Muller *et al.*, 2008)
ELISA utilisant des anticorps polyclonaux			
indirect	Protéines de lactosérum bovin	1% de lait de vache dans du lait de brebis (plage de quantification 1–50%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
sandwich	Protéines de lactosérum caprin	0,5% de lait de chèvre dans du lait de brebis (plage de quantification 0,5 à 100%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
indirect	Protéines de lactosérum caprines	1% de lait de chèvre dans du lait de brebis (plage de quantification 1–100%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
concurrence indirecte	β-lactobuline dénaturée par la chaleur	0,1–0,2% de lait de vache dans du fromage	issu de compilation par Moatsou (2010)

indirect	Caséines bovines	1% de lait de vache dans du lait et du fromage de brebis (plage de quantification 1–50%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
sandwich	Caséines caprines	1% de lait de chèvre dans du lait et du fromage de brebis (plage de quantification 1–100%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
indirect	β-caséine bovine	2% de lait de vache dans du lait de chèvre cru, pasteurisé et stérilisé (plage de quantification 2–50%)	(Song *et al.*, 2011)
concurrence indirecte	γ3-caséine bovine	0,1% de lait de vache dans des fromages de brebis et de chèvre -	issu de compilation par Moatsou (2010)
compétitif	κ-caséine bovine f139-152	0,25% de lait de vache cru ou chauffé dans du fromage de brebis (plage de quantification 0,25–64%	issu de compilation par Moatsou (2010)
compétitif	α1-caséine bovine f140-149	0,125% de lait de vache cru ou chauffé dans du lait de brebis, (plage de quantification dans le lait, 0,125 à 64%; dans le fromage, 0,5 à 25%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
ELISA utilisant des anticorps monoclonaux			
sandwich "deux sites"	β- lactobuline bovine (MAb 17 et 102)	10 ppm de lait de vache dans du lait de brebis ou de chèvre	issu de compilation par Moatsou (2010)
sandwich "deux sites"	β- lactobuline bovine (MAbs 88 et 117N)	0,03% de lait de vache dans du lait de chèvre	issu de compilation par Moatsou (2010)
concurrence indirecte	IgG bovine (MAb BG-18)	0,1% de lait de vache dans du lait de chèvre, de brebis ou de bufflonne (plage de quantification 0,1 à 10%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
concurrence indirecte ou sandwich	IgG bovine (MAb BG-18)	0,001% de lait de vache dans du lait de brebis ou de bufflonne; 0,01% de lait de vache dans du lait de chèvre (plage de quantification 0,01 à 100%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
indirect	β-caséine bovine (MAb AH4)	0,5% de lait cru de vache dans du lait de brebis ou de chèvre; 1% de vache traité	issu de compilation par Moatsou (2010)

		thermiquement dans du lait de brebis ou de chèvre (plage de quantification 0,5 à 100%)	
sandwich	β-caséine bovine (MAb AH4)	0,5% de fromage de vache dans du fromage de brebis (plage de quantification 0,5 à 10%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
indirect	αs2-caséine caprine (MAb B2B)	0,5% de lait de chèvre dans du lait de brebis (plage de quantification 0,5-15%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
indirecte compétitive	αs2-caséine caprine (MAb B2B)	0,25% de lait de chèvre dans du lait de brebis (plage de quantification 0,25-15%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
indirect	αs2-caséine caprine (Mab B2B)	1% de fromage de chèvre dans du fromage de brebis (plage de quantification 1–15%)	issu de compilation par Moatsou (2010)
HPLC en phase inverse	α-lactalbumine et β-lactoglobuline B bovines	<1,0% de lait de vache dans du lait de brebis et du lait de chèvre	(Romero *et al.*, 1996)
	βactoglobulines bovines, caprines et ovines	1,0%	(Ferreira et Oliveira, 2003)
	α-caséine bovine	5,0% de lait de vache dans du lait de chèvre	(Veloso *et al.*, 2002)
Chromatographie d'interaction hydrophobe	Caséines bovines, caprines et ovines αS1, αS2, β et κ	10.0% de lait de vache dans du lait de chèvre et du lait de brebis	(Bramanti *et al.*, 2003)
	γ2-caséine	10% lait de vache dans fromage de brebis	(Fanton *et al.*, 1998)
MALDI-TOF MS	Protéines du lactosérum	<5% de lait de vache et 2% de lait de brebis dans du fromage frais de bufflonne	(Cozzolino *et al.*, 2001)
MALDI-TOF MS	Protéines du lactosérum	<5% de lait de vache dans du lait de brebis et dans du lait de bufflonne	(Cozzolino *et al.*, 2001)
MALDI-TOF MS	α-lactalbumine bovine, β-lactoglobuline A et B	5,0%	(Cunsolo *et al.*, 2013)
MALDI-TOF MS		2% de lait de vache et 0,5% lait de chèvre dans du lait de bufflonne ; 10% de lait de vache dans du fromage de brebis	(Cunsolo *et al.*, 2013)
MALDI-TOF MS		<0,5% de lait exogène dans lait d'ânesse ou de chèvre	(Di Girolamo *et al.*, 2014)

LC–MS/MS	3 peptides spécifique de 3 espèces (brebis, chèvre, bufflonne) pour la β-lactoglobuline et l'α-lactalbumine	0,5% de protéines du lactosérum dans le fromage ricotta (brebis, chèvre, bufflonne)	(Camerini *et al.*, 2016)

Limite de détection : pourcentage de lait d'une espèce détecté dans un lait ou fromage d'une espèce après adultération

Adapté en partie de Alichanidis (2016) et de Poonia *et al.* (2017)

Tableau 2.9.3. Exemples de méthodes basées sur la PCR en temps réel appliquées à l'identification des espèces animales et l'authentification de la non-adultération des produits carnés

Technique	Espèce cible	Application	Gène cible	Sensibilité de détection	Références
PCR en temps réel - chimie TaqMan	Bovin, porc, agneau, poulet et dinde	Mélanges binaires de viande crue	Cytochrome b	0,5% (poids / poids)	(Dooley *et al.*, 2004)
	Cheval et âne	Mélanges modèles de viande crue et de produits commerciaux (saucisse de cheval, steak de cheval, burger de cheval, jambon de cheval et salami de cheval)	Cytochrome b	1 pg (ADN d'âne) ou 25 pg (ADN de cheval)	(Chisholm *et al.*, 2005)
	Canard (colvert et musqué)	Canard rôti, canard fumé, pâté de canard, cocotte de gibier et échantillons d'aliments pour animaux	Cytochrome b	Estimé à 0,0001% (poids/poids)	(Hird *et al.*, 2005)
	Porc	Mélanges binaires de porc cru et stérilisé dans de la viande de bœuf	ARNr 12S	0,01 ng (ADN de porc), 0,5% (poids / poids) (viande de porc dans des mélanges de bœuf)	(Rodriguez *et al.*, 2005)
	Bovin, porc, agneau, chèvre, poulet, dinde et canard	Conserves maison, conserves normales, conserves à utiliser dans des conditions tropicales et conserves stérilisées à ultra-haute température	Phosphodiesterase de la guanosine monophosphate cyclique, récepteur de la ryanodine et précurseur de l'interleukine-2	0,1% de l'ADN de l'espèce recherchée (10 copies du génome)	(Laube *et al.*, 2007)
	Bovin	Viande crue, produits carnés transformés, lait et fromage	Cytochrome b	35 pg (ADN de bovin)	(Zhang *et al.*, 2007)
	Bovin, porc, cheval, mouton, poulet et dinde	Produits carnés transformés	ADN Satellite IV pour les bovins ; cytochrome b pour les autres espèces	0,05% (poids/poids) (porc, saindoux, cheval, mouton, poulet et dinde), 0,1% (poids/poids) (bovin)	(Jonker *et al.*, 2008)
	Chamois et bouquetins des Pyrénées	Mélanges binaires bruts et traités thermiquement	ARNr 12S et boucle D mitochondriale	-	(Fajardo *et al.*, 2007)
	Âne, porc et cheval	Échantillons de galette crue préparée avec des mélanges de viande binaires dans du bœuf	ND2, ND5 et ATPase 6/8 mitochondriales	0,0001% (poids/poids) (soit 0,0001 ng d'ADN)	(Kesmen *et al.*, 2009)

Technique	Espèce cible	Application	Gène cible	Sensibilité de détection	Références
	Porc	Boulettes de viande modèles additionnées de viande de porc, boulettes commerciales de viande de porc, bœuf, poulet, mouton et chevon/chèvre	Cytochrome b	0,01% (poids / poids)	(Ali *et al.*, 2012a)
	Lapin et le lièvre	Mélanges binaires de muscles transformés [lapin, lièvre et lapin plus lièvre (1:1, poids/poids)] dans des aliments à matrice d'avoine étiquetés comme contenant du lapin	ARNr 12S	0,1% (poids/poids) (muscles traités), 0,01 ng/mL (chaque ADN cible)	(Pegels *et al.*, 2013)
	Daim européen, cerf élaphe cerf sika	Produits à base de viande étiquetés comme contenant du cerf ou du gibier, saucisse de gibier	Pseudogène du facteur de croissance épidermique	0,5% (poids/poids) (daim et cerf élaphe), 0,1% (poids/poids) (cerf sika)	(Druml *et al.*, 2015a)
	Chevreuil	Mélanges de viande binaires crus chevreuil/porc, saucisses de gibier	Lactoferrine	0,03% (poids/poids)	(Druml *et al.*, 2015a)
	Cheval	Mélanges binaires traités thermiquement viande bovine/ cheval, produits à base de viande, aliments pour animaux domestiques	ARNr 12S	1 pg d'ADN de cheval	(Pegels *et al.*, 2015)
PCR multiplexe en temps réel - chimie TaqMan	Cheval	Mélanges binaires crus de viande de cheval et de boeuf	Récepteur de l'hormone de croissance équine	0,1% (poids / poids)	(Nixon *et al.*, 2015)
	Chameau	Charqui et viande de chameau braisée	Cytochrome b	0,01% (poids / poids ; ADN de chameau à 5 fg/mL	(Wu *et al.*, 2015)
	Chien	Galettes de poulet modèles avec des quantités connues de muscle de chien, galettes de poulet commerciales halal	Cytochrome b	0,01% (poids/poids)	(Rahman *et al.*, 2015)
	Poulet, canard et porc	Mélanges ternaires de porc, de canard et de sang d'oie	Bêta-actine, facteur de croissance transformant, facteur de croissance des cellules T	1% (poids/poids) (trois espèces cibles dans des mélanges ternaires), 0,15 ng pour toutes les espèces	(Cheng *et al.*, 2014)

Technique	Espèce cible	Application	Gène cible	Sensibilité de détection	Références
	Chevreuil, daim, cerf élaphe et cerf sika	Mélanges binaires de viande crue avec du porc, mélanges de plusieurs espèces de viande, saucisse de gibier	Lactoferrine, exon 21 du pseudogène du facteur de croissance épidermique	-	(Druml *et al.*, 2015b)
	Bovin et porc	Mélanges binaires de viande crue, produits à base de viande hachée et produits à base de viande	Phosphodiesterase de la guanosine cyclique monophosphate, Bêta-actine	20 équivalents de génome	(Iwobi *et al.*, 2015)
	Murine (rat de laboratoire, souris de laboratoire et souris sauvage)	Mélange binaire de viande de muscles murins dans de la viande de mouton, produits à base de viande enrichis de muscles murins	Cytochrome b	0,1% (poids/poids), 1 pg d'ADN par réaction	(Fang et Zhang, 2016)
	Canard, oie, poulet, dinde et porc	Modèle de pâté de foie (contenant du foie d'oie, du canard, du poulet et de la dinde et du porc), produits à base de viande de foie	Cytochrome b, boucle D mitochondriale	2% (poids/poids) (dinde), 1% (poids/poids) (canard, oie et poulet), 1% (poids/poids) (porc)	(Koppel *et al.*, 2013)
PCR en temps réel - sondes MGB TaqMan	Bovin et porc	Boulettes de viande crues et cuites / stérilisées, préparées avec des mélanges binaires de bœuf et de porc	t-Glu-cytb	1% (poids/poids) (bœuf cru et cuit/stérilisé), 1% (poids/poids) (porc cru), 5% (poids/poids) (porc cuit/stérilisé)	(Lopez-Andreo *et al.*, 2012)
PCR en temps réel – sondes Beacon	Porc	Mélanges de viande crue	Cytochrome b	0,1% (poids/poids) (viande de porc dans des mélanges de porc et de bœuf) ; 0,0001 ng d'ADN de porc	(Yusop *et al.*, 2012)
PCR en temps réel avec chimie TaqMan et chimie SYBR green I	Coq de bruyère	Mélanges binaires crus et stérilisés : viande de poulet / coq de Bruyère	ARNr 12S	0,1% (poids/poids)	(Rojas *et al.*, 2011)
	Bovins et buffles	Produits alimentaires dérivés du lait et de la viande	ARNr du cytochrome b, 16S	-	(Drummond *et al.*, 2013)
PCR en temps réel avec chimie SYBR green I	Porc	Mélanges de viandes crues de porc, de bœuf, de chameau, de cheval et de poulets, de bœuf halal et de produits à base de poulet	ADN mitochondrial	0,1 ng (ADN de porc)	(Farrokhi et Joozani, 2011)

Technique	Espèce cible	Application	Gène cible	Sensibilité de détection	Références
	Porc	Mélanges binaires crus dans la viande de volaille, saucisses de Francfort, saucisses pour barbecue, hamburgers et galettes de viande	Cytochrome b	0,1% (poids/poids) (5 pg ADN de porc)	(Soares *et al.*, 2013)
PCR en temps réel avec le colorant EvaGreen	Lièvre	Mélanges binaires de viande crue	Cytochrome b	1 pg (ADN de lièvre)	(Santos *et al.*, 2012)
PCR multiplexe en temps réel avec colorant EvaGreen	Bovin et soja	Saucisses modèles et saucisses commerciales	ATPase 8, Lectine	0,003% (poids/poids) (bœuf), 0,001% (poids/poids) (soja)	(Safdar et Abasiyanik, 2013)

Adapté de Amaral *et al.* (2016)

Tableau 2.9.4. Exemples de méthodes basées sur l'ADN pour la détection des espèces et de l'adultération du lait

Méthode	Espèce - gène cible	Limite de détection (plage de quantification)	Référence
DUPLEX-PCR	ADN bovin et buffle dans du lait et du fromage mozzarella - cytochrome b	1% de lait de vache ou 1% de lait de bufflonne	(Rea *et al.*, 2001)
DUPLEX-PCR	ADN bovin et buffle dans de la mozzarella - cytochrome b	-	(Bottero *et al.*, 2002)
DUPLEX-PCR	ADN bovin et ovin dans du fromage expérimental et commercial - ARNr 12S / 16S	0,1% de lait de vache (1–50%)	(Mafra *et al.*, 2004)
DUPLEX-PCR	ADN bovin et caprin dans du fromage expérimental et commercial - ARNr 12S	0,1% de lait de vache dans fromage de brebis (1–60%)	(Mafra *et al.*, 2007)
PCR MULTIPLEX	ADN bovin, ovin et caprin dans du fromage - ARNr 12S / 16S	0,5% de lait de vache	(Bottero *et al.*, 2003)
PCR MULTIPLEX	ADN bovin, ovin, caprin et buffle dans des mélanges de lait – caséine κ	0,1% de lait de vache dans du lait de bufflonne	(Reale *et al.*, 2008)
PCR EN TEMPS RÉEL	ADN bovin dans du fromage mozzarella - cytochrome b	0,1% (0,6-20%)	(Lopparelli *et al.*, 2007)
PCR EN TEMPS RÉEL	ADN bovin dans du lait de brebis cru et pasteurisé- ARNr 12S	0,5% (0,5 à 10%)	(Lopez-Calleja *et al.*, 2007b)
PCR EN TEMPS RÉEL	ADN bovin dans le lait de chèvre cru et pasteurisé - ARNr 12S / 16S	0,6% (0,5 à 10%)	(Lopez-Calleja *et al.*, 2007a 20047)
PCR EN TEMPS RÉEL	ADN bovin dans le fromage de chèvre et de bufflonne - cytochrome b	35 pg d'ADN bovin	(Zhang *et al.*, 2007)
PCR EN TEMPS RÉEL	ADN bovin dans des fromages de brebis et de chèvre - cytochrome b	0,5% (1–10%)	(Mininni *et al.*, 2009)
PCR MULTIPLEX EN TEMPS RÉEL	ADN bovin, caprin, ovin et buffle dans des mélanges de lait et du fromage expérimentaux - cytochrome b et ARNr 12S	0,1% de lait de vache dans le lait et le fromage; (0,1–5% de lait de vache dans le fromage de vache / chèvre; 1–10% de lait de vache dans le fromage de vache / mouton et de vache / buffle)	(Agrimonti *et al.*, 2015)
Séquençage NGS	(Agrimonti *et al.*, 2015)	72–84% des séquences attribuées à l'espèce bovine et 16-28% à l'espèce caprine dans mélange 90%-10%	(Ribani *et al.*, 2018)

Adapté en partie de Alichanidis *et al.* (2016) et Moatsou (2010)
Dans la PCR multiplex, la détection est réalisée pour plusieurs espèces simultanément. La PCR Duplex, par exemple, permet de réaliser l'amplification de 2 cibles différentes en une seule réaction PCR
NGS : séquençage nouvelle génération

Tableau 2.9.5. Synthèse des méthodes basées sur la PCR-RFLP appliquées à l'identification des espèces animales et l'authentification de l'adultération des viandes

Espèce cibles	Application	Gène cible	Limite de détection (proportion ingrédient dans le produit)	Références
Porc, bovin, sanglier, buffle, mouton, chèvre, cheval, poulet, dinde, daim, chevreuil, orignal, antilope, chamois, mouflon et kangourou	Saucisses, viandes marinées et traitées thermiquement	Cytochrome b	<1% (poids / poids) (porc)	(Meyer *et al.*, 1995)
Cerf rouge et cerf sika	Viandes crues et traitées thermiquement	Cytochrome b	-	(Matsunaga *et al.*, 1998)
Buffle, bovin, mouton, chèvre, lièvre, daim, orignal, antilope, gazelle, gnou, chamois, bouquetin des Pyrénées et kangourou	Extraits de viande congelés et de protéines lyophilisées	Cytochrome b	-	(Wolf *et al.*, 1999)
Porc	Viande, mortadelle, saucisse de porc et jambon sec	Boucle D mitochondriale	5% (poids / poids) (porc)	(Montiel-Sosa *et al.*, 2000)
Autruche	Viandes crues et traitées thermiquement	Cytochrome b	-	(Abdulmawjood et Bulte, 2002)
Bovin, chèvre, mouton, porc, caille, sanglier, poulet, dinde, cerf rouge et chevreuil	Nuggets de poulet, hamburgers, croquettes, saucisses, jambon, tortellinis, moussaka, pâtés, raviolis et cannellonis	Cytochrome b	-	(Pascoal *et al.*, 2004)
Bovin, mouton, chèvre, cerf rouge et chevreuil	Sang et tissu	Boucle D mitochondriale	-	(Pfeiffer *et al.*, 2004)
Bovin, buffle, mouton et chèvre	Viandes crues et traitées à la chaleur et produits de viande frits	ARNr 12S	-	(Girish *et al.*, 2005)
Porc	Viandes et graisses crues (halal)	Cytochrome b	-	(Aida *et al.*, 2005)
Bovin, mouton, chèvre, cerf, daim et chevreuil	Viandes crues et traitées thermiquement	ARNr 12S	-	(Fajardo *et al.*, 2006)
Bovin, mouton, chèvre, porc, cheval, volaille et cerf	Viandes crues	Cytochrome b	1% (poids / poids) (bœuf et cheval)	(Maede, 2006)
Poulet, canard, dinde, pintade et caille	Viandes crues, viandes traitées thermiquement et croquettes frites	ARNr 12S	-	(Girish *et al.*, 2007)
Chamois, bouquetins des Pyrénées, mouflons, bovins, ovins et caprins	Viandes crues et traitées thermiquement	ARNr 12S, boucle D	-	(Fajardo *et al.*, 2007)

Espèce cibles	Application	Gène cible	Limite de détection (proportion ingrédient dans le produit)	Références
Porc et sanglier	Viandes crues	MC1R	-	(Fajardo *et al.*, 2008)
Caille, faisan, perdrix rouge, pintade, coq de Bruyère, bécasse d'Europe, pigeon ramier et grive	Viandes crues	ARNr 12S	-	(Rojas *et al.*, 2008)
Cerf élaphe, daim, chevreuil, chamois, mouflon, bouquetin des Pyrénées, chèvre, bovin, mouton et porc	Viandes crues	ARNr 12S	-	(Fajardo *et al.*, 2009)
Caille, faisan, perdrix rouge, pintade, coq de Bruyère, bécasse d'Europe, pigeon ramier et grive	Viandes crues	Boucle D mitochondriale	-	(Rojas *et al.*, 2009)
Bovin, porc, buffle, caille, poulet, chèvre et lapin	Viandes crues	Cytochrome b	-	(Murugaiah *et al.*, 2009)
Poulet, dinde, canard, oie, faisan, perdrix, bécasse des bois, autruche, caille et grive	Viandes crues et traitées thermiquement	ARNr 12S, cytochrome b	-	(Stamoulis *et al.*, 2010)
Bovin, poulet, dinde, mouton, porc, buffle, chameau et âne	Viande crue et sang	Sous-unité 1 du cytochrome c oxydase	-	(Haider *et al.*, 2012)
Porc	Boulettes de viande, lard, saucisses de Francfort et hamburgers	Cytochrome b	0,01% (poids / poids) (porc) 0,0001 ng (ADN de porc)	(Ali *et al.*, 2012b)
Bovin, buffle, chèvre, mouton et porc	Viandes crues	Cytochrome b	-	(Kumar *et al.*, 2014)
Bovin, mouton, porc, poulet, âne et cheval	Viandes crues, saucisses, saucisses de Francfort, hamburgers et jambons	Cytochrome b	-	(Doosti *et al.*, 2014)
Chat	Viandes et boulettes de viande crues et traitées thermiquement	ARNr 18S	0,01% (poids / poids)	(Ali *et al.*, 2012b)
Chien	Formulations de hamburgers et hamburgers commerciaux	Cytochrome b	0,01% ((poids / poids) 0,0001 ng (ADN de chien)	(Rahman *et al.*, 2015)

Adapté de Amaral *et al.* (2016)
Boucle D : région de l'ADN mitochondrial qui contrôle la réplication et la transcription et contient l'origine de réplication.
« -» la sensibilité de détection n'a pas été évaluée.

Tableau 2.9.6. Applications de la spectroscopie proche infra-rouge pour la classification de la viande et des produits à base de viande

Espèce / produit	Présentation	Plage spectrale du spectromètre (nm) Mode d'acquisition	Analyse multivariée	Correctement classé (%)	Référence
Incorporation de porc dans des saucisses de veau	Intact	NIRFlex N-500 1659–1825 Réflectance MicroPhazir GP 4.0 1656–1802 Réflectance	ACP SVM	authentique vs adultération: 50% 100 authentique vs adultération: 40% 100 authentique vs adultération : 30% 100 authentique vs contre adultération: 20% 100 authentique vs contre adultération: 10% 100	(Schmutzler *et al.*, 2015)
Identification du bétail, du lama et de la viande de cheval	Viande hachée / jus de viande	NIRSystem6500 400–2500 Réflectance	PLS-DA	Bœuf: 100/95 Lama: 95/100 Cheval: 89/95	(Mamani-Linares *et al.*, 2012)
Discrimination des pâtés de viande en fonction de l'espèce animale	Viande hachée	NIRSystem6500 1100–2500 Réflectance	ACP	Bœuf: 100 Porc: 100 Mélanges binaires: 72	(Restaino *et al.*, 2011)
Discrimination de sanglier et de bouf dans des boulettes de viande	Boulettes de viande 0, 10, 15, 20, 35, 50, 65, 80, 85 and 100% de sanglier et bœuf	IRTF ABB MB3000 1000-1250 Réflectance	ACP PLS		(Rahmania *et al.*, 2015)

Adapté de Prieto *et al.* (2017).

2.9.2 Authentification de l'origine

Les principales méthodes analytiques utilisées à des fins d'authentification de l'origine sont : la chromatographie (CPG, HPLC), la spectrométrie de masse des rapports isotopiques (SMRI), les méthodes spectrales (spectrométrie dans le visible, le proche infra-rouge, de fluorescence, Raman), et les techniques moléculaires (ADN, PCR) (Downey, 2016; Primrose *et al.*, 2010). Au-delà de l'identité de l'animal (méthodes basées sur l'ADN permettant un lien direct entre le produit et l'animal (Nader *et al.*, 2016) et pouvant donc jouer un rôle important dans les systèmes de traçabilité), nous nous sommes surtout intéressés à la race/souche de l'animal et à son origine géographique.

2.9.2.1 Race/souche de l'animal

Les produits carnés ou laitiers régionaux et/ou traditionnels portant des signes de qualité étant souvent issus de races spécifiques, ils sont susceptibles d'être falsifiés par substitution de la race spécifiée au cahier des charges (Amaral *et al.*, 2015 ; Amaral *et al.*, 2014). Les méthodes basées sur l'ADN permettent d'authentifier la **race de l'animal** dont provient le produit (Nader *et al.*, 2016). Le jambon sec ibérique peut être élaboré à partir de porcs de race pure (100% Ibérique) ou de porcs croisés Ibériques x Duroc plus performants et moins coûteux à produire (voir 2.4.1.2), ce qui peut engendrer un risque de fraude. Martin-Gomez *et al.* (2019) sont parvenus à distinguer sans erreur des porcs 100% Ibériques de porcs croisés Ibérique x Duroc à partir de l'analyse des composés volatils par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de mobilité ionique (GC-IMS) d'un prélèvement minime et non destructif de tissu adipeux. La SPIR a également été utilisée avec succès pour discriminer la race de porc dont est issue la viande. Ainsi, Del Moral *et al.* (2009) ont pu distinguer les races Duroc et Ibérique à partir de spectres de réflectance visible et proche infra-rouge du muscle Masseter (muscle de la joue, facilement accessible), analysés par réseaux de neurones, avec un taux de bon classement de 95%. De même, Prieto *et al.* (2015), à partir de mesures en SPIR sur des côtes non broyées et d'analyses statistiques discriminantes, ont été capables de distinguer des échantillons de trois races de porc : Lacombe, Duroc et Iberique avec un taux de bonne classification de respectivement 94%, 95% et 100% pour chacune des races sur de la viande maturée 2 j et 95%, 98% et 100% pour la viande maturée 14 j).

Chez les poulets, l'identification de la **souche** est importante dans la mesure où il s'agit d'un critère de démarcation des systèmes de production. Dardenne *et al.* (2001) ont démontré le potentiel de la SPIR pour distinguer les poulets issus de souches à croissance lente des poulets issus de souches à croissance rapide. Les modèles développés envisagent aussi bien l'analyse des carcasses entières de poulets que les découpes (cuisses ou filets). Ces auteurs ont également testé avec succès la technique de l'AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism).

Dans les produits laitiers, les méthodes globales telles que la SPIR et la MIR sont peu performantes pour authentifier la race (Valenti *et al.*, 2013).En effet, si plusieurs études montrent un effet de la race sur la composition du lait, et notamment des différences entre la race Holstein et des races plus locales (Montbéliarde, Normande, Tarentaise, Salers, Rendena, Grise des alpes, Modenese, etc.), d'autres sources de variabilité induisent un bruit de fond très important (variabilité inter-individuelle et régime alimentaire).

2.9.2.2 Origine géographique

Traceurs moléculaires et isotopes stables

Acides gras, caroténoïdes et composés volatils

Plusieurs études ont étudié la capacité des différents composants du lait à discriminer les produits laitiers selon leur origine géographique (revue de Bentivoglio *et al.* (2019)). Gaspardo *et al.* (2010), par exemple, ont discriminé sans erreur des échantillons de lait issus de deux régions proches (en Italie et en Slovénie) à partir de leur profil en AG. Toutefois, ces différences dans le profil en AG étaient liées aux différences dans les régimes alimentaires des animaux, lesquels étaient spécifiques à chaque région. Plus précisément, Bentivoglio *et al.* (2019) soulignent l'intérêt de pouvoir **authentifier les produits de montagne** compte tenu du nouvel arrêté de l'Union Européenne de 2012 visant à reconnaître et protéger les produits de montagne. Ces derniers ont des caractéristiques particulières, notamment liées au terroir, mais ils ne sont pas toujours bien identifiés par les consommateurs ; certains ont des signes de qualité, mais pas tous, et la mention 'produit de montagne' est parfois usurpée. Plusieurs études montrent que les produits laitiers de montagne ont un profil en AG différent des produits de plaine (plus d'AGPI, notamment acide rumenique et AGPI n-3, moins d'AGS et d'AGPI n-6), qu'ils sont plus riches en caroténoïdes et présentent un profil plus riche en composés volatils (Collomb *et al.*, 2002 ; Lucas *et al.*, 2006 ; Martin *et al.*, 2019; Segato *et al.*, 2017). Ainsi, les différences dans le profil en composés volatils (notamment les terpènes) ont permis de discriminer du lait de montagne vs. de plaine dans les études de Bugaud *et al.* (2001), Collomb *et al.* (2002) et Segato *et al.* (2017). Ces différences sont en grande partie expliquées par des différences dans l'alimentation des vaches et plus largement dans le système d'élevage. Ainsi, Coppa *et al.* (2019), en comparant le lait issu de systèmes herbagers vs. basés sur le maïs, localisés en plaine et en montagne dans les deux cas, ont montré que les différences de composition entre

lait de montagne vs. de plaine deviennent négligeables si l'alimentation des animaux est similaire. Les différences mineures restantes sont surtout liées à la nature des prairies (plus diversifiées en montagne), mais ne sont pas suffisantes pour permettre une bonne discrimination. Cependant, il faut signaler que la situation géographique (montagne vs. plaine) conditionne fortement les pratiques d'élevage possibles (donc le système fourrager et la composition de la ration), et qu'il est rare et souvent peu rentable d'utiliser en montagne les mêmes pratiques/systèmes qu'en plaine. Les auteurs sont donc plutôt confiants dans la possibilité de l'authentification des produits de montagne, surtout si leur cahier des charges s'engage sur l'utilisation des ressources fourragères locales, même s'ils reconnaissent que les résultats sont encore de type 'preuve de concept' et qu'il y faudra faire face à une grande variabilité dans la composition des produits de montagne.

Composition isotopique des produits

L'analyse des proportions d'isotopes stables de certains éléments chimiques, tels que ceux de l'oxygène ($^{18}O/^{16}O$), de l'hydrogène ($^{2}H/^{1}H$), et du soufre ($^{34}S/^{32}S$) sont sujettes à des variations naturelles, certaines d'entre elles présentant un intérêt pour authentifier l'origine géographique des produits. Les proportions d'isotopes stables des deux éléments H et O sont très dépendants de la latitude et ils sont aussi affectés par l'altitude, la distance à la mer, les précipitations totales et la saison (Rozanski *et al.*, 1992). Ils modulent la signature isotopique des produits animaux à travers la consommation d'eau par les animaux (Kelly *et al.*, 2005). Les variations naturelles de $\delta^{18}O$ et de $\delta^{2}H$ dans l'eau des produits sont alors utiles pour l'authentification de l'origine géographique, car elles sont liées à l'altitude, à la latitude et à la distance de la mer (Renou *et al.*, 2004b; Rossmann *et al.*, 2000). Les proportions d'isotopes stables du soufre ($^{34}S/^{32}S$) dépendent, elles, de la géologie de la zone géographique où les aliments du bétail sont produits (roches sédimentaires ou magmatiques, Rossmann *et al.* (2000)), de la proximité de la mer (soufre déposé par l'air marin, Zazzo *et al.* (2011)), des pratiques de fertilisation (apport de sulfate d'ammonium pour acidifier les sols alcalins) et des conditions climatiques (Krouse et Grinenko, 1991). Les isotopes du H et du O donnent ainsi souvent des informations sur la latitude de la région d'élevage et ceux du S sur la proximité à la mer de la région d'élevage (Harrison *et al.*, 2011).

Néanmoins, il faut signaler certains facteurs possibles de confusion. Si l'eau consommée par les animaux provient essentiellement de l'eau de boisson dans le cas d'un régime à base de fourrages secs (l'eau de boisson est alors la source principale de l'O et donc des variations de $\delta^{18}O$ des produits), dans le cas du pâturage, l'animal ingère également l'eau contenue dans les plantes. Cette dernière est plus riche en ^{18}O du fait de l'évaporation préférentielle de ^{16}O, cet enrichissement étant variable selon le climat (Rozanski *et al.*, 1992), ce qui induit un facteur de confusion dans la réponse. Les approches utilisant un rapport unique d'isotopes stables peuvent ainsi se révéler insuffisantes pour discriminer de manière catégorique des produits originaires de pays parfois très éloignés. Ainsi, si Franke *et al.* (2008) ont observé des différences significatives dans la valeur de $\delta^{18}O$ du muscle pectoral de poulet entre des animaux originaires de France, Allemagne, Hongrie et Suisse, ces différences n'étaient pas significatives entre poulets originaires de France vs. du Brésil.

Ces limites ont conduit à combiner la mesure de plusieurs rapports isotopiques par une approche multi-traceurs. En effet, certains éléments chimiques utilisés pour authentifier l'alimentation de l'animal peuvent aussi être utilisés pour authentifier l'origine géographique, si certains aliments sont spécifiques à une région (Schmidt *et al.*, 2005) ou sont influencés par les conditions pédo-climatiques régionales (notamment les caractéristiques du sol, Capo *et al.* (1998), ou la proximité de la mer. Ainsi, bien qu'ils ne soient pas des indicateurs directs de l'origine géographique (ils sont plutôt des indicateurs de l'alimentation/systèmes de production), les rapports d'isotopes stables du carbone et de l'azote ($^{13}C/^{12}C$ et $^{15}N/^{14}N$) peuvent le devenir si un aliment particulier est typiquement utilisé dans une région particulière ou s'ils sont analysés en parallèle d'autres isotopes stables tels que ceux du O et du H (Nakashita *et al.*, 2008). Les différences dans les signatures isotopiques en C et N des produits animaux selon leur origine géographique peuvent aussi être attribuées à des différences dans la signature isotopique des aliments dominants distribués dans ces différentes régions. Ainsi, la différence d'enrichissement en ^{13}C de la viande bovine, liée à la consommation de plantes en C4, s'est révélée utile pour discriminer des viandes issues de différentes régions du monde où les systèmes de production diffèrent (Guo *et al.*, 2010 ; Nakashita *et al.*, 2008 ; Rossmann et Schlicht, 2007); Schmidt, 2005 #40356}. En Suisse, Richter *et al.* (2012) ont utilisé l'analyse globale des isotopes du C et l'analyse des isotopes du C dans les acides gras pour discriminer la viande d'agneaux issus de prairies de plaine ou de montagne (avec une différence de $\delta^{13}C$ de la végétation de 2,5‰ entre les deux types de prairies). Erasmus *et al.* (2018) en Afrique du Sud, ont montré que l'on peut reconnaitre la région d'origine des agneaux en mesurant $\delta^{15}N$ et $\delta^{13}C$ dans la viande, parce que ces régions diffèrent à la fois dans le niveau d'aridité et dans la nature des plantes fourragères (luzerne et arbustes du Karoo) vs. plantes en C4 dans la savane. Dans une étude internationale, Martinelli *et al.* (2011) ont utilisé la mesure des isotopes du C dans la viande hachée de hamburgers pour illustrer la nature 'glocale' de ceux-ci (produit emblématique de l'alimentation globalisée, mais qui présente une signature locale liée aux aliments 'locaux' consommés par les animaux). C'est probablement aussi la nature de l'alimentation des animaux qui contribue à la variation de $\delta^{13}C$ (-25.5‰ à – 13.7‰) observée par Jahren et Kraft (2008) sur des échantillons de viande de hamburgers prélevés dans des fast

food à travers les Etats Unis. Pour les poulets, la gamme de valeurs de $\delta^{13}C$ est plus faible (-19,3‰ à – 16,6‰) probablement en lien avec une plus grande uniformité dans le niveau de consommation de maïs par les animaux. Cependant, le développement du commerce inter-régional et inter-continental des aliments pour animaux pose une limite potentielle à l'utilisation des isotopes du C et du N pour authentifier l'origine géographique des produits. En effet, ces deux mesures étant largement influencées par l'alimentation des animaux, les produits d'animaux d'origine géographique différente mais consommant des rations isotopiquement similaires en C et N peuventt alors devenir impossibles à distinguer.

Pour les produits laitiers, l'analyse de différents isotopes stables dans le produit, seule ou associée avec celle d'éléments traces, a été utilisée pour discriminer des origines géographiques plus ou moins éloignées. Dans une étude où les auteurs ont cherché à discriminer 4 régions en Argentine, la combinaison des isotopes de C, H et O s'est révélée performante (les isotopes du N apportant peu d'intérêt), mais pas complètement discriminante (Griboff *et al.*, 2019). Il a fallu lui associer la mesure des teneurs en Na, Mg, Al, V, Co, Ni, As, SE, Rb, Sr, Mo, Hg et du rapport K/Rb pour obtenir une discrimination complète. Une étude en Nouvelle-Zélande menée sur des échantillons de lait obtenus dans 10 entreprises laitières entre les mois d'aout et de décembre montre que le rapport d'isotopes stables de H mesuré globalement dans la poudre de lait et plus spécifiquement dans les AG du lait est bien corrélé à celui de l'eau de pluie, lequel varie selon la zone géographique. Cette mesure s'est ainsi révélée fiable pour authentifier l'origine des produits laitiers dans ce pays (Ehtesham *et al.*, 2013). En France, Renou *et al.* (2004b) ont bien discriminé les laits issus de Bretagne vs. d'Auvergne à partir de la mesure des isotopes de O et H. En Italie, Manca *et al.* (2001) ont montré que les isotopes du C et du N mesurés dans la caseine donnent des informations intéressantes pour remonter à l'origine géographique de fromages de brebis (produits dans 3 régions du Sud de l'Italie), mais que ces mesures doivent être associées à celles de 5 acides aminés libres pour aboutir à une discrimination correcte (89.7% d'échantillons bien classés). A signaler que ces paramètres ne dépendent pas du temps d'affinage du fromage. Plus récemment, Valenti *et al.* (2017) ont réussi à bien discriminer des fromages produits dans 3 zones géographiques très proches de l'est de la Sicile à partir de la mesure des isotopes de N et S (97.2% d'échantillons bien classés).

Pour les produits carnés, Camin *et al.* (2007), en utilisant l'analyse des isotopes stables de C, N, H et S, ont discriminé l'origine géographique de la viande d'agneaux issus de différentes régions d'Europe avec une fiabilité de 78,7% (77,6% sur la validation croisée). Pour la viande bovine également, Nakashita *et al.* (2008) ont pu distinguer de la viande de bœuf d'origine japonaise, australienne et américaine, en combinant les mesures de $\delta^{18}O$ et de $\delta^{13}C$. Osorio *et al.* (2011b) ont cherché à discriminer la viande bovine issue d'animaux alimentés à l'herbe dans 9 pays (7 pays européens, les USA et le Brésil, Figure 2.9.9), à partir des données d'isotopes stables de H, C, N et S. Au final, plus de 80% des 140 échantillons de viande ont été correctement affectés à leur pays d'origine.

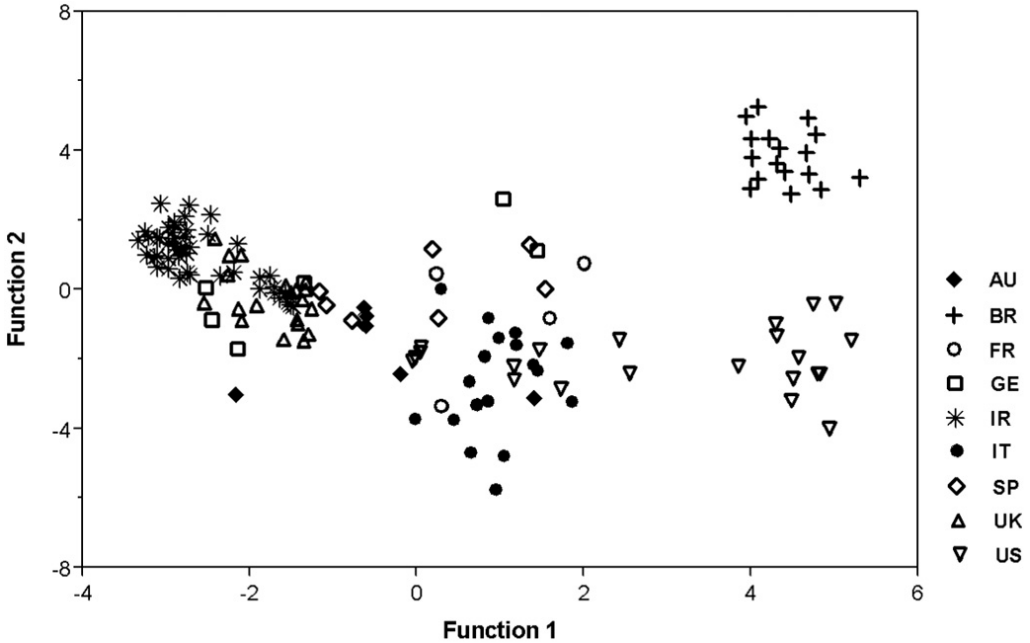


Figure 2.9.9. Analyse discriminante réalisée sur les isotopes stables du C, N, H et du S mesurés dans des échantillons de viande bovine issue de différents pays. AU: Autriche; BR: Brésil; FR: France; GE: Allemagne; IR: Irlande; IT: Italie; SP: Espagne; UK: Royaume-Uni; US: USA (Osorio *et al.*, 2011b).

De même, une étude a cherché à discriminer la viande issue de poulets irlandais de celle issue de poulets non-irlandais en utilisant les mesures d'isotopes stables de H, C, N et S (106 échantillons, dont 56 irlandais). Les valeurs de $\delta^{2}H$, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$

et $\delta^{34}S$ étaient significativement différentes entre poulets irlandais et non irlandais, alors que les valeurs de $\delta^{15}N$ étaient similaires (Monahan *et al.*, 2018). A noter que les différences significatives concernent les éléments connus pour être de bons indicateurs de l'origine géographique, notamment H, O et S. Les différences importantes pour $\delta^{2}H$ sont en accord avec les conclusions de Rees *et al.* (2016), à savoir que $\delta^{2}H$ est le meilleur indicateur de l'origine géographique pour le poulet, en lien avec les différences de $\delta^{2}H$ dans l'eau de boisson. La différence dans les valeurs de $\delta^{13}C$ pourrait indiquer une consommation plus élevée de plantes en C3 relativement à celles en C4 pour les poulets produits en Irlande. L'analyse en composantes principales a permis de séparer clairement les deux origines à partir des 5 rapports d'isotopes stables : au total, 96,2% des échantillons ont été bien classés (95,2% sur la validation croisée). Ce résultat est prometteur si l'on considère que la production de ces oiseaux ne les expose généralement pas à des facteurs identifiables géographiquement (climat, distance à la mer, géologie) ou à des aliments tels que les prairies qui incorporent des signaux isotopiques locaux.

Le rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ dans les végétaux est influencé par la géologie sous-jacente de l'endroit où ils ont poussé (Montgomery *et al.*, 2006). Franke *et al.* (2008) ont testé l'intérêt de la mesure de $^{18}O/^{16}O$ dans la fraction aqueuse et de $^{87}Sr/^{86}Sr$ dans la fraction minérale de viande de poulet et de viande bovine séchée : la mesure de $^{18}O/^{16}O$ donne des informations intéressantes quant à l'origine géographique de la viande de poulet et de bœuf (même si la discrimination n'est pas parfaite), mais $^{87}Sr/^{86}Sr$ s'est révélé peu discriminant pour l'origine du poulet et encore moins pour l'origine du bœuf. D'autres études soulignent les défis liés à l'utilisation des isotopes du strontium dans la viande pour authentifier l'origine géographique (Rummel *et al.*, 2012). De plus, les auteurs soulignent le fait que lorsque l'alimentation animale n'est pas produite localement, ce qui arrive souvent, le lien avec la géologie locale est alors perdu. Toutefois, le rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ qui constitue un traceur géochimique d'intérêt, peut aussi servir à authentifier un ingrédient spécifique utilisé pour la transformation des produits animaux et contribuer ainsi à authentifier leur origine. Ainsi, Barre *et al.* (2020) ont évalué le potentiel des éléments traces et des isotopes du strontium afin de différencier l'origine géographique de jambons secs de différentes origines : Bayonne (IGP), Parme (AOP) et Serrano (STG). Dans un premier temps, ils ont pu distinguer les jambons salés avec du sel de mer (Parme, Serrano) de jambons salés avec du sel gemme (Bayonne, et « type Bayonne » où seule l'origine du sel gemme différait du Bayonne IGP), à partir de la composition multi-élémentaire des jambons (Li, Sr, Tl et Pb) ; cette distinction a aussi pu être obtenue en considérant le rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$. Puis, pour distinguer le jambon IGP Bayonne, pour l'élaboration duquel seul le sel de Salies de Béarn est autorisé, de jambons type Bayonne salés avec d'autres sels gemme, les auteurs ont considéré le rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ et y ont associé des éléments caractéristiques du sel de Salies de Béarn : Li, Mn, Sr, Tl et Pb. L'association de ces divers indicateurs permet effectivement de distinguer les jambons IGP Bayonne des « type Bayonne », et des jambons Serrano ou Parme. Toutefois, le pouvoir discriminant de l'analyse élémentaire et isotopique doit être encore amélioré, par exemple en y associant un autre rapport isotopique (H, C, O ou S), afin de pouvoir appliquer ce type d'analyse à l'authentification et au traçage de l'origine géographique des jambons secs.

Le concept 'd'isoscape' (contraction de 'isotope' et 'landscape') a récemment émergé dans la littérature scientifique consacrée à l'authentification de l'origine géographique des produits, avec l'objectif de présenter les données isotopiques sous une forme géospatialisée. A cet égard, Donarski et Heinrich (2016), au Royaume Uni ont utilisé la mesure des isotopes stables de certains éléments légers ($^{2}H/^{1}H$, $^{13}C/^{12}C$, $^{15}N/^{14}N$, $^{34}S/^{32}S$) et lourds ($^{206}Pb/^{207}Pb$, $^{208}Pb/^{207}Pb$, $^{208}Pb/^{206}Pb$, $^{87}Sr/^{86}Sr$) pour créer cet 'isoscape' pour la viande bovine. Un outil web a été développé, avec l'objectif final de discriminer la viande produite dans différentes régions du Royaume Uni, par exemple la viande bovine originaire d'Ecosse ou du Pays de Galles (les deux ayant un statut d'IGP) et de détecter un étiquetage frauduleux. Ces auteurs soulignent que cette approche pourrait être généralisée pour protéger d'autres produits ayant un signe de qualité régional, et, en effet, ce concept a été récemment repris par Valenti *et al.* (2017) pour le fromage.

Au final, les limites de ces approche multi-traceurs isotopiques pour tracer l'origine géographique restent, au-delà des déplacements possibles des animaux, i) les variations saisonnières et annuelles des rapports $\delta^{2}H$ et $\delta^{18}O$ et ii) les variations des sources d'alimentation des animaux. Ces limites sont d'autant plus fortes que les zones géographiques comparées ont des climats et des pratiques d'élevage proches. Comme pour l'alimentation, si des origines géographiques contrastées (Europe vs. USA vs. Amérique du Sud) peuvent être discriminées, un des défis reste de discriminer des régions géographiquement plus proches. Des conditions particulières (proximité de la mer, différences dans la géologie ou dans le climat) peuvent alors être exploitées quand c'est possible pour augmenter le potentiel de discrimination.

Eléments traces

Les éléments traces ont été utilisés en combinaison avec la SMRI pour améliorer la fiabilité des discriminations. Sur des échantillons de viande bovine en Chine, Zhao *et al.* (2013) ont mesuré la concentration de 23 éléments traces avec ICP-MS (spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif[13]), ainsi que $^{13}C/^{12}C$ et $^{15}N/^{14}N$ avec la SMRI. Les concentrations en Mg,

[13] type de spectrométrie de masse capable de détecter des composés à des concentrations très faibles

K, Mn, Zn, Se et Zr, combinées avec les valeurs de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ ont permis d'établir un modèle de classification qui a permis de classer correctement tous les échantillons. A signaler la large répartition géographique des quatre sites d'échantillonnage et la diversité probable des intrants alimentaires et de la géologie sous-jacente. Sur le lait de vache, Griboff *et al.* (2019) ont utilisé 16 variables (Na, Mg, Al, V, Co, Ni, As, Se, Rb, Sr, Mo, Hg, $\delta^{2}H$, $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$ et K/Rb pour reconnaître sans erreur l'origine de laits provenant de 4 régions en Argentine. Une approche similaire a été utilisée pour la viande de poulets issue de 4 sites en Chine avec des résultats similaires (Zhao *et al.*, 2016b), en utilisant une analyse multivariée de 31 variables ($\delta^{2}H$, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$, Li, Be, B, Na, Mg, Al, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, Te, Ba, Tl et Pb). La proportion d'échantillons de viande de poulets correctement classés a été de 100%, 94,1%, 92%, 82,6%, 70,3% et 50% pour les échantillons provenant de Chine (n=36), du Brésil (n=101), d'Europe (n=87), du Chili (n=46), de Thailande (n=10) et d'Argentine (n=10). Pour le porc, Kim *et al.* (2017) ont mesuré 29 variables (macro et micro éléments) dans des échantillons de viande provenant de Corée, des USA, d'Allemagne, d'Autriche, des Pays-Bas et de Belgique en utilisant la spectroscopie à émission couplée à l'ICP (ICP-OES-MS) et l'ICP-MS ; des analyses discriminantes ont permis de reconnaître les échantillons de porcs coréens parmi les autres (97% de discrimination).

A partir de méthodes globales

Méthodes spectroscopiques

Peu d'études ont testé le potentiel des méthodes spectrales pour authentifier l'origine géographique des produits. Valenti *et al.* (2013) ont testé la SPIR et la MIR pour authentifier l'origine montagne vs. plaine du lait de vache, mais avec des résultats décevants (moins de 75% des échantillons correctement classés). En revanche, sur la viande, Erasmus *et al.* (2016) ont montré le potentiel de la SPIR pour discriminer des échantillons de viande d'agneau provenant de différentes régions d'Afrique du Sud. De même, Sun *et al.* (2012) ont essayé d'authentifier l'origine géographique de la viande d'agneau provenant de 5 régions en Chine ; ils ont classé correctement tous les échantillons dans 2 grandes catégories (définies comme pastorale vs. agricole), mais n'ont pas réussi à assigner correctement les échantillons à chaque région d'origine.

A partir d'un petit jeu de données (23), Shintu *et al.* (2007) ont montré le potentiel de la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (^{1}H RMN) à reconnaître l'origine géographique d'échantillons de viande bovine séchée issue de 5 pays différents. De même, la spectrosocopie RMN (^{1}H RMN) pourrait être utilisée pour permettre aux producteurs de caviar issu d'esturgeons élevés en Aquitaine de faire une demande d'IGP. En effet, Heude *et al.* (2016) ont montré que cette méthodologie permettait distinguer le caviar d'Aquitaine vs. les autres caviars testés. En outre, elle permet d'estimer la fraicheur du caviar et de définir une durée de conservation.

Empreintes moléculaires (PCR-DGGE)

La technique d'électrophorèse à gradient dénaturant (PCR-DGGE), après amplification d'un fragment du gène codant pour l'ARN ribosomal 16S de communautés bactériennes, a été utilisée pour détecter les différentes communautés bactériennes présentes sur les poissons afin de tracer l'origine de leur élevage (Montet *et al.*, 2009) sur les pangacidés et le bar). Cette technique a été développée avant que les techniques de metabarcoding (NGS) d'écosystèmes microbiens soient en pleine expansion. Quelle que soit la technique envisagée, il est cependant indispensable, avant que ces techniques soient utilisées en routine ou pour des expertises, que des études soient faites sur des jeux de données plus importants (nombre d'élevage, localisation, variations saisonnières).

2.9.3 Exemples d'application

L'angle d'entrée de ce texte a été méthodologique, car les différentes méthodes analytiques utilisées peuvent être communes aux différentes espèces animales. Les tableaux suivants donnent quelques exemples d'application, avec cette fois-ci une entrée par une question/un objectif d'authentification en veillant à soulignernt les points de vigilance. Le Tableau 37 présente l'exemple de l'authentification de **l'origine herbagère des produits de ruminants (produits laitiers et carnés issus d'animaux alimentés à l'herbe)**. A signaler que la littérature scientifique à ce sujet couvre différentes situations : i) discrimination de l'alimentation à l'herbe vs. avec une ration à base de concentré ou de maïs, ii) discrimination d'une alimentation avec de l'herbe fraîche (herbe pâturée) vs. avec de l'herbe conservée (foin, enrubannage, ensilage), iii) distinction de la nature de l'herbe consommée (légumineuses vs. graminées, prairies temporaires vs. permanentes, prairies riches vs. pauvres en biodiversité végétale). Pour simplifier le tableau, les cas de l'authentification de la part de l'herbe dans la ration et des modalités d'alternance de régimes ne sont pas présentés. Le tableau 38 présente l'exemple de l'authentification de l'**origine plaine vs. montagne des produits de ruminants** et le tableau 39 celui de l'**origine géographique des produits animaux**.

Tableau 2.9.7. Authentification analystique de l'alimentation à l'herbe des ruminants à partir de l'analyse de leurs produits laitiers ou de leur viande

	Méthode analytique	Produit	Points de vigilance
Discrimination de l'alimentation à l'herbe vs. avec une ration à base de concentré	Composition en acides gras des lipides	viande[5,2,29]	Confusion possible entre herbe pâturée et ensilée
	Composés volatils	viande[36,41]	Méthode lourde et coûteuse, qui présente encore des limites de répétabilité. Questions sur généricité et robustesse. Biais possibles
		laitier[42]	Méthode lourde et coûteuse, qui présente encore des limites de répétabilité. Questions sur généricité et robustesse. Biais possibles
	Pigments caroténoïdes	viande[31, 27, 29, 18]	Variabilité de la teneur de l'herbe et de la réponse animale. Biais possibles.
		laitier[30, 10, 11]	Variabilité de la teneur de l'herbe et de la réponse animale. Biais possibles.
	Stéréoisomères de la vitamine E	viande[29]	
	Méthodes spectrales (VIS, SPIR)	viande[19, 20, 23, 24, 35]	
	Génomique fonctionnelle	viande[39]	Méthode lourde et coûteuse, encore peu d'études
Discrimination de l'alimentation à l'herbe vs. avec du maïs	Composition en acides gras des lipides	laitier[38,25]	Le pouvoir discriminant se réduit significativement avec des régimes mixtes où aucun fourrage n'est dominant
	Composés phénoliques	laitier[8]	Encore peu d'études. Composés très variables selon composition, stade, gestion et modalités de conservation de l'herbe. Méthode lourde et coûteuse.
	Pigments caroténoïdes	laitier[21]	Variabilité de la teneur de l'herbe et de la réponse animale. Biais possibles.
	Isotopes stables	viande[6,7]	Temps de latence long lors d'un changement de régime (changement de courte durée difficile à détecter). Confusion possible avec engraissement sur plantes prairiales tropicales en C4
		laitier[4, 26, 38]	Confusion possible avec alimentation sur plantes prairiales tropicales en C4
	Méthodes spectrales	viande[16]	Bonne fiabilité si mesure faite sur le gras, mais insuffisante sur le muscle
		laitier[13, 40]	Peu performant pour discriminer ensilage de maïs vs herbe conservée
	Génomique fonctionnelle	viande[12]	Méthode lourde et coûteuse, encore peu d'études
	Composition en acides gras des lipides	laitier[38]	Méthode lourde et coûteuse, qui présente encore des limites de répétabilité. Questions sur généricité et robustesse. Biais possibles

Discrimination de l'alimentation au pâturage vs. avec des fourrages conservés (foin, enrubannage, ensilage)	Composés volatils	laitier[1,13]	Méthode lourde et coûteuse, qui présente encore des limites de répétabilité. Questions sur généricité et robustesse. Biais possibles
	Composés phénoliques	laitier[8, 37]	Peu d'études. Nature et teneurs très variables selon composition, stade, gestion et modalités de conservation de l'herbe. Méthode lourde et coûteuse
	Stéréoisomères de la vitamine E	laitier[9]	
	Biomarqueurs protéiques	viande[22]	Méthode lourde et coûteuse, encore peu d'études
	Méthodes spectrales (VIS, SPIR, MIR)	laitier[14,3,40]	
Distinction de la nature du fourrage conservé consommé	Composés phénoliques	laitier[8]	Peu d'études. Nature et teneurs très variables selon composition, stade, gestion et modalités de conservation de l'herbe. Méthode lourde et coûteuse
	Biomarqueurs protéiques	viande[22]	Méthode lourde et coûteuse, encore peu d'études
Distinction de la nature de l'herbe consommée			
Légumineuses vs. graminées	Composition en acides gras des lipides	meat[28]	Variabilité du profil en AG selon le stade phénologique de l'herbe et la conduite du pâturage
	Isotopes stables de l'azote	meat[34,17,27,28]	Variabilité de la composition isotopique de la plante (âge de la plante, fertilisation) et variabilité de la réponse animale
Temporaire vs permanente	Composition en acides gras des lipides	laitier[15]	Profil en AG variable selon stade de l'herbe, conduite du pâturage et composition botanique. Difficile de calibrer modèles répétables et fiables à grande échelle
Riche en biodiversité vs. pauvre en biodiversité	Composés volatils	laitier[1]	Méthode lourde et coûteuse, qui présente encore des limites de répétabilité. Questions sur généricité et robustesse. Biais possibles

[1]Albilleira *et al.* (2011), [2]Alfaia *et al.* (2009)(2009), [3]Andueza *et al.* (2013), [4]Auerswald *et al.* (2015)(2015), [5]Aurousseau *et al.* (2004), [6]Bahar *et al.* (2005), [7]Bahar *et al.* (2009), [8]Besle *et al.* (2010), [9]Butler *et al.* (2011b), [10]Calderon *et al.* (2006), [11]Calderon *et al.* (2006), [12]Cassar-Malek *et al.* (2009), [13]Coppa *et al.* (2011), [14]Coppa *et al.* (2012b), [15]Coppa *et al.* (2015c), [16]Cozzolino *et al.* (2002b), [17]Devincenzi *et al.* (2014)(, [18]Devincenzi *et al.* (2019), [19]Dian *et al.* (2007b)), [20]Dian *et al.* (2008), [21]Engel *et al.* (2007), [22]Gagaoua *et al.* (2017), [23]Huang *et al.* (Huang *et al.*), [24]Huang *et al.* (2015a), [25]Hurtaud *et al.* (2014), [26]Kornexl *et al.* (1997), [27]Macari *et al.* (2017), [28]Moloney *et al.* (2018), [29]Monahan *et al.* (2018), [30]Nozière *et al.* (2006), [31]de Oliveira *et al.* (2012), [32]Prache et Thériez(1999), [33]Prache *et al.* (2003a), [34]Prache *et al.* (2009), [35]Prache *et al.* (2018), [36]Priolo *et al.* (2004), [37]Rouge *et al.* (2013), [38]Segato *et al.* (2017), [39]Sweeney *et al.* (2016), [40] Valenti *et al.* (2013), [41]Vasta *et al.* (2006), [42]Viallon *et al.* (2000).

Tableau 2.9.8. Authentification analytique de l'origine géographique (produits de montagne vs. de plaine) à partir de l'analyse des produits

Produit	Méthode analytique	Points de vigilance
Produits laitiers[1, 2, 3]	Composés volatils	Discrimination en lien avec les différences dans l'alimentation des vaches et plus largement dans le système d'élevage ; mais il est rare et peu rentable d'utiliser en montagne les mêmes pratiques qu'en plaine Proposition de combiner avec profil en AG du lait et en caroténoïdes[4]
Viande[5]	Isotopes C	Un seul élément ; robustesse et généricité

[1]Bugaud *et al.* (2001), [2]Collomb *et al.* (2002), [3]Segato *et al.* (2017), [4]Bentivoglio *et al.* (2019), [5]Richter *et al.* (2012).

Tableau 2.9.9. Authentification analytique de l'origine géographique (différents pays/régions) à partir de l'analyse des produits

Méthode analytique	Produit	Points de vigilance
Isotopes stables éléments légers	Viande bovine[1,2,3,4,5,6] (dont hamburgers[7,8]) ; ovine[9,10] ; de poulets[11,12] ; Lait[13, 14] et fromages[15,16]	-Approches utilisant un rapport unique d'isotopes stables souvent insuffisantes (importance de combiner différents éléments) -Variations saisonnières et annuelles de $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ -Commerce international des aliments pour animaux (→ limites à l'utilisation des isotopes du C et N surtout liés à alimentation) -Déplacements possibles des animaux -Limites d'autant + fortes que zones géographiques comparées sont proches géographiqement, climatiquement et du point de vue des pratiques d'élevage
Isotopes stables éléments légers et lourds	Viande bovine[17]	Encore peu d'études
Isotopes stables + élements traces	Lait[18],Viande de poulets[19], viande bovine[20], jambon sec [x28]	Peu d'études
Elements traces	Viande de porcs[21]	Peu d'études
Composition en AG	Lait[22]	Discrimination liée aux différences de régimes alimentaires, spécifiques à chaque zone géographique
Spectroscopie dans le visible et le proche infra rouge	Viande ovine[23, 24]	Peu d'études
Spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN)	Viande bovine[25], caviar d'esturgeons[26]	Peu d'études
Empreintes moléculaires (électrophorèse à gradient denaturant)	Poisson[27]	Peu d'études

[1]Guo *et al.* (2010), [2]Nakashita *et al.* (2008), [3]Rossmann et Schicht (2007), [4]Schmidt *et al.* (2005), [5]Osorio *et al.* (2011b), [6]Monahan *et al.* (2018), [7]Martinelli *et al.* (2011), [8]Jahren et Kraft (2008),[9]Camin *et al.* (2007), [10] Erasmus *et al.* (2018), [11]Franke *et al.* (2008), [12]Rees *et al.* (2016), [13]Ehtestham *et al.* (2013), [14]Renou *et al.*, (2004b), [15]Manca *et al.* (2001), Valenti *et al.* (2017),[17]Donarski et Heinrich (2016), [18]Griboff *et al.* (2019), [19]Zhao *et al.* (2016b), [20]Zhao *et al.* (2013), [21]Kim *et al.* (2017),[22]Gaspardo *et al.* (2010), [23]Erasmus *et al.* (2016), [24]Sun *et al.* (2012), [25]Shintu *et al.* (2007), [26]Heude *et al.* (2016), [27]Montet *et al.* (2009), [28]Barre *et al.* (2020).

Conclusions

Le caractère mondialisé du commerce des produits, la complexité de la chaîne alimentaire associée à la production des produits, les demandes des consommateurs pour plus d'informations sur la nourriture qu'ils consomment ainsi que sur les modes d'élevage des animaux, et les risques de fraudes renforcent l'importance des questions d'authentification de l'origine des produits et des procédés utilisés au cours de la chaîne alimentaire, comme l'atteste la croissance exponentielle des publications sur ce sujet (Danezis *et al.*, 2016). Ce texte fait le point sur les outils d'authentification analytique, mais il faut signaler que les contrôles se font aussi par d'autres moyens (autocontrôles, traçabilité papier, visites d'élevage, etc.). Néanmoins, les techniques présentées pour la partie adultération sont d'ores et déjà largement utilisées par les services de répression des fraudes.

La recherche développe différentes approches et teste leur robustesse et leur fiabilité. Parmi celles qui ont été couronnées de succès, on peut citer i) les méthodes relatives à la détection de l'**adultération de l'espèce animale** (par exemple, l'incorporation frauduleuse de viande ou de lait d'une espèce animale dans un produit carné ou laitier), ii) les **méthodes spectrales**, simples d'utilisation, peu coûteuses et qui montrent un potentiel important, notamment pour authentifier l'alimentation de l'animal, car elles fournissent une signature globale du produit, reflet de sa composition, et iii) le **développement de bases de données d'isotopes stables** pour les produits alimentaires qui permettent de tester des échantillons inconnus.

La littérature montre qu'il est possible de discriminer certains types d'alimentation ou origines contrastés en utilisant des **méthodes analytiques quantifiant des composés spécifiques** ou des **méthodes plus globales**, fondées notamment sur les propriétés optiques des produits. Ces méthodes sont de **coût et de facilité d'utilisation variables**. Les méthodes globales, en particulier celles basées sur les propriétés optiques des produits présentent un intérêt particulier (rapides, ne nécessitant pas de recours à des produits chimiques et ne produisant pas de déchets) ; certaines d'entre elles pourraient rapidement être utilisées en routine sur un nombre important d'échantillons grâce au développement récent d'appareils de mesure portables (SPIR, par ex.). D'autres méthodes, telles que l'analyse des composés volatils ou phénoliques, sont beaucoup plus coûteuses et difficiles à mettre en œuvre, mais la possibilité qu'elles puissent être utilisées peut dissuader de fraudes. On peut imaginer utiliser ces méthodes par 'paliers' ou 'étapes', les plus faciles d'utilisation en premier ressort (premier tri), les plus coûteuses en dernier recours (par ex. pour parfaire la discrimination sur des échantillons encore incertains).

A signaler que les résultats peuvent être **imparfaits et sujets à certaines limites/confusions d'effets quand les méthodes sont utilisées isolément** et il y souvent des **complémentarités/synergies entre les différents outils et les différents tissus ou produits**. Il est clair que l'analyse d'un seul composé est très souvent insuffisante et que des analyses statistiques multivariées combinant plusieurs marqueurs sont nécessaires. Les résultats obtenus en situations d'**alternance de régimes**, plus difficiles à caractériser, mais fréquentes notamment pour la viande, renforcent l'idée de combiner différents composés traceurs et différents tissus, du fait des différences de profils de latence et/ou de persistance observés. Les **méthodes spectrales**, qui renvoient aux propriétés optiques du tissu ou du produit, donc à sa composition globale, semblent très prometteuses, même en situation d'alternance de régimes alimentaires. Elles ne renseignent cependant pas précisément sur les mécanismes biologiques ou chimiques sous-jacents conduisant à ces différences, d'où l'intérêt de poursuivre en parallèle les travaux sur les approches analytiques 'par composé' et les approches 'globales' de type analyses spectrales.

La détermination des conditions d'alimentation et de l'origine géographique des produits se heurte à certaines **difficultés inhérentes à l'activité d'élevage**, liées aux possibles déplacements des animaux ainsi qu'aux possibles consommations d'aliments de différentes sources et de différentes origines géographiques au cours de la vie de l'animal. L'analyse de tissus qui ont une 'croissance incrémentale' (poils, laine, sabots, par exemple), s'ils sont disponibles sur la carcasse, peut alors être mise à profit pour mieux caractériser l'historique des conditions d'alimentation et de l'origine géographique.

Cette synthèse cite des exemples montrant comment différentes techniques analytiques peuvent être utilisées pour discriminer, sur le produit, les processus utilisés au cours de la chaîne alimentaire. Les travaux réalisés jusqu'à présent ont cependant pour beaucoup été de type **'preuve de concept'**, c'est-à-dire qu'ils ont comparé des modalités contrastées d'élaboration du produit, favorables à la discrimination de ces modalités, et souvent travaillé sur un nombre assez faible d'échantillons. Il est nécessaire maintenant de tester la fiabilité de ces méthodes dans des conditions qui les challengent, sur des effectifs plus importants et de développer des bases de données plus importantes, afin de passer au stade d'opérationnalité.

Références bibliographiques

Abdulmawjood, A.; Bulte, M., 2002. Identification of ostrich meat by restriction fragment length polymorphism (RFLP) analysis of cytochrome b gene. *Journal of Food Science*, 67 (5): 1688-1691. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb08706.x

Abilleira, E.; Virto, M.; Najera, A.I.; Albisu, M.; Perez-Elortondo, F.J.; de Gordoa, J.R.; Renobales, M.; Barron, L.J.R., 2011. Effects of seasonal changes in feeding management under part-time grazing on terpene concentrations of ewes' milk. *Journal of Dairy Research*, 78 (2): 129-135. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029910000750

Agabriel, C.; Cornu, A.; Journal, C.; Sibra, C.; Grolier, P.; Martin, B., 2007. Tanker milk variability according to farm feeding practices: Vitamins A and E, carotenoids, color, and terpenoids. *Journal of Dairy Science*, 90 (10): 4884-4896. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0171

Agrimonti, C.; Pirondini, A.; Marmiroli, M.; Marmiroli, N., 2015. A quadruplex PCR (qxPCR) assay for adulteration in dairy products. *Food Chemistry*, 187: 58-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.017

Aida, A.A.; Man, Y.B.C.; Wong, C.M.V.L.; Raha, A.R.; Son, R., 2005. Analysis of raw meats and fats of pigs using polymerase chain reaction for Halal authentication. *Meat Science*, 69 (1): 47-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.06.020

Al-Jowder, O.; Defernez, M.; Kemsley, E.K.; Wilson, R.H., 1999. Mid-infrared spectroscopy and chemometrics for the authentication of meat products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47 (8): 3210-3218. http://dx.doi.org/10.1021/jf981196d

Alamprese, C.; Casale, M.; Sinelli, N.; Lanteri, S.; Casiraghi, E., 2013. Detection of minced beef adulteration with turkey meat by UV-vis, NIR and MIR spectroscopy. *Lwt-Food Science and Technology*, 53 (1): 225-232. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.01.027

Alfaia, C.P.M.; Alves, S.P.; Martins, S.I.V.; Costa, A.S.H.; Fontes, C.M.G.A.; Lemos, J.P.C.; Bessa, R.J.B.; Prates, J.A.M., 2009. Effect of the feeding system on intramuscular fatty acids and conjugated linoleic acid isomers of beef cattle, with emphasis on their nutritional value and discriminatory ability. *Food Chemistry*, 114 (3): 939-946. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.10.041

Ali, M.E.; Hashim, U.; Dhahi, T.S.; Mustafa, S.; Man, Y.B.C.; Latif, M.A., 2012a. Analysis of Pork Adulteration in Commercial Burgers Targeting Porcine-Specific Mitochondrial Cytochrome B Gene by TaqMan Probe Real-Time Polymerase Chain Reaction. *Food Analytical Methods*, 5 (4): 784-794. http://dx.doi.org/10.1007/s12161-011-9311-4

Ali, M.E.; Hashim, U.; Mustafa, S.; Man, Y.B., 2012b. Swine-Specific PCR-RFLP Assay Targeting Mitochondrial Cytochrome B Gene for Semiquantitative Detection of Pork in Commercial Meat Products. *Food Analytical Methods*, 5 (3): 613-623. http://dx.doi.org/10.1007/s12161-011-9290-5

Alichanidis, E.; Moatsou, G.; Polychroniadou, A., 2016. *Composition and Properties of Non-cow Milk and Products*. London: Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd (*Non-Bovine Milk and Milk Products*). http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803361-6.00005-3

Alikord, M.; Momtaz, H.; Keramat, J.; Kadivar, M.; Rad, A.H., 2018. Species identification and animal authentication in meat products: a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12 (1): 145-155. http://dx.doi.org/10.1007/s11694-017-9625-z

Amaral, J.; Meira, L.; Oliveira, M.B.P.P.; Mafra, I., 2016. Advances in Authenticity Testing for Meat Speciation. In: Downey, G., ed. *Advances in Food Authenticity Testing*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition), 369-414. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100220-9.00014-x

Amaral, J.S.; Santos, C.G.; Melo, V.S.; Costa, J.; Oliveira, M.B.P.P.; Mafra, I., 2015. Identification of duck, partridge, pheasant, quail, chicken and turkey meats by species-specific PCR assays to assess the authenticity of traditional game meat Alheira sausages. *Food Control*, 47: 190-195. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.07.009

Amaral, J.S.; Santos, C.G.; Melo, V.S.; Oliveira, M.B.P.P.; Mafra, I., 2014. Authentication of a traditional game meat sausage (Alheira) by species-specific PCR assays to detect hare, rabbit, red deer, pork and cow meats. *Food Research International*, 60: 140-145. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.11.003

Andres, A.I.; Cava, R.; Martin, D.; Ventanas, J.; Ruiz, J., 2005. Lipolysis in dry-cured ham: Influence of salt content and processing conditions. *Food Chemistry*, 90 (4): 523-533. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.05.013

Andueza, D.; Agabriel, C.; Constant, I.; Lucas, A.; Martin, B., 2013. Using visible or near infrared spectroscopy (NIRS) on cheese to authenticate cow feeding regimes. *Food Chemistry*, 141 (1): 209-214. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.086

Angelopoulou, I.; Botsialas, A.; Salapatas, A.; Petrou, P.S.; Haasnoot, W.; Makarona, E.; Jobst, G.; Goustouridis, D.; Siafaka-Kapadai, A.; Raptis, I.; Misiakos, K.; Kakabakos, S.E., 2015. Assessment of goat milk adulteration with a label-free monolithically integrated optoelectronic biosensor. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 407 (14): 3995-4004. http://dx.doi.org/10.1007/s00216-015-8596-3

Atanassova, S.; Stoyanchev, T.; Yorgov, D.; Nachev, V., 2018. Differentiation of fresh and frozen thawed poultry breast meat by near infrared spectroscopy. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24: 162-168.

Auerswald, K.; Schaufele, R.; Bellof, G., 2015. Routing of Fatty Acids from Fresh Grass to Milk Restricts the Validation of Feeding Information Obtained by Measuring C-13 in Milk. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63 (48): 10500-10507. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.5b03646

Aurousseau, B.; Bauchart, D.; Calichon, E.; Micol, D.; Priolo, A., 2004. Effect of grass or concentrate feeding systems and rate of growth on triglyceride and phospholipid and their fatty acids in the M-longissimus thoracis of lambs. *Meat Science*, 66 (3): 531-541. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00156-6

Aursand, M.; Standal, I.B.; Prael, A.; McEvoy, L.; Irvine, J.; Axelson, D.E., 2009. C-13 NMR Pattern Recognition Techniques for the Classification of Atlantic Salmon (Salmo salar L.) According to Their Wild, Farmed, and Geographical Origin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57 (9): 3444-3451. http://dx.doi.org/10.1021/jf8039268

Bahar, B.; Moloney, A.P.; Monahan, F.J.; Harrison, S.M.; Zazzo, A.; Scrimgeour, C.M.; Begley, I.S.; Schmidt, O., 2009. Turnover of carbon, nitrogen, and sulfur in bovine longissimus dorsi and psoas major muscles: Implications for isotopic authentication of meat. *Journal of Animal Science*, 87 (3): 905-913. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1360

Bahar, B.; Monahan, F.J.; Moloney, A.P.; O'Kiely, P.; Scrimgeour, C.M.; Schmidt, O., 2005. Alteration of the carbon and nitrogen stable isotope composition of beef by substitution of grass silage with maize silage. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 19 (14): 1937-1942. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.2007

Bahar, B.; Schmidt, O.; Moloney, A.P.; Scrimgeour, C.M.; Begley, I.S.; Monahan, F.J., 2008. Seasonal variation in the C, N and S stable isotope composition of retail organic and conventional Irish beef. *Food Chemistry*, 106 (3): 1299-1305. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.053

Ballin, N.Z., 2010. Authentication of meat and meat products. *Meat Science*, 86 (3): 577-587. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.06.001

Barbosa, I.C.R.; Kley, M.; Schaufele, R.; Auerswald, K.; Schroder, W.; Filli, F.; Hertwig, S.; Schnyder, H., 2009. Analysing the isotopic life history of the alpine ungulates Capra ibex and Rupicapra rupicapra rupicapra through their horns. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23 (15): 2347-2356. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.4157

Barre, J.P.G.; Epova, E.; Donard, O.F.X.; Robert, N.; Bérail, S., 2020. Potentiel d'authentification des jambons de Bayonne à l'aide des éléments traces et des rapports isotopiques du Strontium. *Journées Recherche Porcine*. Paris, 37-42. http://www.journees-recherche-porcine.com/texte/2020/genetique/g07.pdf

Bartlett, S.E.; Davidson, W.S., 1991. Identification of thunnus tuna species by the polymerase chain-reaction and direct sequence-analysis of their mitochondrial cytochrome-B genes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 48 (2): 309-317. http://dx.doi.org/10.1139/f91-043

Bateman, A.S.; Kelly, S.D.; Woolfe, M., 2007. Nitrogen isotope composition of organically and conventionally grown crops. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (7): 2664-2670. http://dx.doi.org/10.1021/jf0627726

Bell, J.G.; Preston, T.; Henderson, R.J.; Strachan, F.; Bron, J.E.; Cooper, K.; Morrison, D.J., 2007. Discrimination of wild and cultured european sea bass (Dicentrarchus labrax) using chemical and isotopic analyses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (15): 5934-5941. http://dx.doi.org/10.1021/jf0704561

Belloque, J.; Garcia, M.C.; Torre, M.; Marina, M.L., 2002. Analysis of soyabean proteins in meat products. A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 42 (5): 507-532. http://dx.doi.org/10.1080/20024091054238

Bentivoglio, D.; Savini, S.; Finco, A.; Bucci, G.; Boselli, E., 2019. Quality and origin of mountain food products: the new European label as a strategy for sustainable development. *Journal of Mountain Science*, 16 (2): 428–440. http://dx.doi.org/10.1007/s11629-018-4962-x

Berdague, J.L.; Denoyer, C.; Lequere, J.L.; Semon, E., 1991. Volatile components of dry-cured ham. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39 (7): 1257-1261. http://dx.doi.org/10.1021/jf00007a012

Bergamaschi, M.; Aprea, E.; Betta, E.; Biasioli, F.; Cipolat-Gotet, C.; Cecchinato, A.; Bittante, G.; Gasperi, F., 2015. Effects of dairy system, herd within dairy system, and individual cow characteristics on the volatile organic compound profile of ripened model cheeses. *Journal of Dairy Science*, 98 (4): 2183-2196. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8807

Bertolini, F.; Ghionda, M.C.; D'Alessandro, E.; Geraci, C.; Chiofalo, V.; Fontanesi, L., 2015. A Next Generation Semiconductor Based Sequencing Approach for the Identification of Meat Species in DNA Mixtures. *Plos One*, 10 (4): 16. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0121701

Besle, J.M.; Viala, D.; Martin, B.; Pradel, P.; Meunier, B.; Berdague, J.L.; Fraisse, D.; Lamaison, J.L.; Coulon, J.B., 2010. Ultraviolet-absorbing compounds in milk are related to forage polyphenols. *Journal of Dairy Science*, 93 (7): 2846-2856. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2939

Biondi, L.; D'Urso, M.G.; Vasta, V.; Luciano, G.; Scerra, M.; Priolo, A.; Ziller, L.; Bontempo, L.; Caparra, P.; Camin, F., 2013. Stable isotope ratios of blood components and muscle to trace dietary changes in lambs. *Animal*, 7 (9): 1559-1566. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731113000645

Bobková, A.; Židek, R.; Flimelová, E.; Bobko, M.; Fiková, M., 2009. Application of PCR method for milk adulteration and milk products identification. *Potravinarstvo*, 1 (3): 1-3. http://www.potravinarstvo.com/dokumenty/potravinarstvo_no1_2009.pdf

Boerrigter-Eenling, R.; Alewijn, M.; Weesepoel, Y.; van Ruth, S., 2017. New approaches towards discrimination of fresh/chilled and frozen/thawed chicken breasts by HADH activity determination: Customized slope fitting and chemometrics. *Meat Science*, 126: 43-49. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.12.009

Boner, M.; Forstel, H., 2004. Stable isotope variation as a tool to trace the authenticity of beef. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378 (2): 301-310. http://dx.doi.org/10.1007/s00216-003-2347-6

Bong, Y.S.; Shin, W.J.; Lee, A.R.; Kim, Y.S.; Kim, K.; Lee, K.S., 2010. Tracing the geographical origin of beefs being circulated in Korean markets based on stable isotopes. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 24 (1): 155-159. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.4366

Bord Bia, 2017. *USDA process verified program. Information for farmer suppliers: Revised 01*: Irish Food Board, 17 p. https://farm.bordbia.ie/pics/Bord%20Bia%20USDA%20Process%20Verified%20Program%20Information%20for%20Farmer%20Suppliers.docx

Borges, E.M.; Volmer, D.A.; Gallimberti, M.; de Souza, D.F.; de Souza, E.L.; Barbosa, F., 2015. Evaluation of macro- and microelement levels for verifying the authenticity of organic eggs by using chemometric techniques. *Analytical Methods*, 7 (6): 2577-2584. http://dx.doi.org/10.1039/c4ay02986k

Boscari, E.; Barmintseva, A.; Pujolar, J.M.; Doukakis, P.; Mugue, N.; Congiu, L., 2014. Species and hybrid identification of sturgeon caviar: a new molecular approach to detect illegal trade. *Molecular Ecology Resources*, 14 (3): 489-498. http://dx.doi.org/10.1111/1755-0998.12203

Bottero, M.T.; Civera, T.; Anastasio, A.; Turi, R.M.; Rosati, S., 2002. Identification of cow's milk in "buffalo" cheese by duplex polymerase chain reaction. *Journal of Food Protection*, 65 (2): 362-366. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x-65.2.362

Bottero, M.T.; Civera, T.; Nucera, D.; Rosati, S.; Sacchi, P.; Turi, R.M., 2003. A multiplex polymerase chain reaction for the identification of cows', goats' and sheep's milk in dairy products. *International Dairy Journal*, 13 (4): 277-282. http://dx.doi.org/10.1016/s0958-6946(02)00170-x

Boyaci, I.H.; Temiz, H.T.; Uysal, R.S.; Velioglu, H.M.; Yadegari, R.J.; Rishkan, M.M., 2014. A novel method for discrimination of beef and horsemeat using Raman spectroscopy. *Food Chemistry*, 148: 37-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.006

Bramanti, E.; Sortino, C.; Onor, M.; Beni, F.; Raspi, G., 2003. Separation and determination of denatured alpha(s1)-, alpha(s2)-, beta- and kappa-caseins by hydrophobic interaction chromatography in cows', ewes' and goats' milk, milk mixtures and cheeses. *Journal of Chromatography A*, 994 (1-2): 59-74. http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9673(03)00483-7

Bugaud, C.; Buchin, S.; Coulon, J.B.; Hauwuy, A.; Dupont, D., 2001. Influence of the nature of alpine pastures on plasmin activity, fatty acid and volatile compound composition of milk. *Lait*, 81 (3): 401-414.

Butler, G.; Nielsen, J.H.; Larsen, M.K.; Rehberger, B.; Stergiadis, S.; Canever, A.; Leifert, C., 2011a. The effects of dairy management and processing on quality characteristics of milk and dairy products. *Njas-Wageningen Journal of Life Sciences*, 58 (3-4): 97-102. http://dx.doi.org/10.1016/j.njas.2011.04.002

Butler, G.; Nielsen, J.H.; Slots, T.; Seal, C.; Eyre, M.D.; Sanderson, R.; Leifert, C., 2008. Fatty acid and fat-soluble antioxidant concentrations in milk from high- and low-input conventional and organic systems: seasonal variation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88 (8): 1431-1441. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.3235

Butler, G.; Stergiadis, S.; Seal, C.; Eyre, M.; Leifert, C., 2011b. Fat composition of organic and conventional retail milk in northeast England. *Journal of Dairy Science*, 94 (1): 24-36. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3331

Calderon, F.; Chauveau-Duriot, B.; Pradel, P.; Martin, B.; Graulet, B.; Doreau, M.; Noziere, P., 2007. Variations in carotenoids, vitamins A and E, and color in cow's plasma and milk following a shift from hay diet to diets containing increasing levels of Carotenoids and vitamin E. *Journal of Dairy Science*, 90 (12): 5651-5664. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0264

Calderon, F.; Tornambe, G.; Martin, B.; Pradel, P.; Chauveau-Duriot, B.; Noziere, P., 2006. Effects of mountain grassland maturity stage and grazing management on carotenoids in sward and cow's milk. *Animal Research*, 55 (6): 533-544. http://dx.doi.org/10.1051/animres:2006031

Camerini, S.; Montepeloso, E.; Casella, M.; Crescenzi, M.; Marianella, R.M.; Fuselli, F., 2016. Mass spectrometry detection of fraudulent use of cow whey in water buffalo, sheep, or goat Italian ricotta cheese. *Food Chemistry*, 197: 1240-1248. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.073

Camin, F.; Bontempo, L.; Heinrich, K.; Horacek, M.; Kelly, S.D.; Schlicht, C.; Thomas, F.; Monahan, F.J.; Hoogewerff, J.; Rossmann, A., 2007. Multi-element (H,C,N,S) stable isotope characteristics of lamb meat from different European regions. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 389 (1): 309-320. http://dx.doi.org/10.1007/s00216-007-1302-3

Campos, N.D.; Oliveira, K.D.; Almeida, M.R.; Stephani, R.; de Oliveira, L.F.C., 2014. Classification of Frankfurters by FT-Raman Spectroscopy and Chemometric Methods. *Molecules*, 19 (11): 18980-18992. http://dx.doi.org/10.3390/molecules191118980

Cantalapiedra-Hijar, G.; Ortigues-Marty, I.; Schiphorst, A.M.; Robins, R.J.; Tea, I.; Prache, S., 2016. Natural N-15 Abundance in Key Amino Acids from Lamb Muscle: Exploring a New Horizon in Diet Authentication and Assessment of Feed Efficiency in Ruminants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64 (20): 4058-4067. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00967

Capo, R.C.; Stewart, B.W.; Chadwick, O.A., 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 82 (1-3): 197-225. http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(97)00102-x

Capuano, E.; Boerrigter-Eenling, R.; van der Veer, G.; van Ruth, S.M., 2013. Analytical authentication of organic products: an overview of markers. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (1): 12-28. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5914

Carpio, A.; Bonilla-Valverde, D.; Arce, C.; Rodriguez-Estevez, V.; Sanchez-Rodriguez, M.; Arce, L.; Valcarcel, M., 2013. Evaluation of hippuric acid content in goat milk as a marker of feeding regimen. *Journal of Dairy Science*, 96 (9): 5426-5434. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-6396

Cartoni, G.; Coccioli, F.; Jasionowska, R.; Masci, M., 1999. Determination of cows' milk in goats' milk and cheese by capillary electrophoresis of the whey protein fractions. *Journal of Chromatography A*, 846 (1-2): 135-141. http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9673(98)01032-2

Cassar-Malek, I.; Jurie, C.; Bernard, C.; Barnola, I.; Micol, D.; Hocquette, J.F., 2009. Pasture-feeding of charolais steers influences skeletal muscle metabolism and gene expression. *Journal of Physiology and Pharmacology*, 60: 83-90.

Chartrin, P.; Berri, C.; Lebihan-Duval, E.; Quentin, M.; Baeza, E., 2005. Lipid and fatty acid composition of fresh and cured-cooked breast meat of standard, certified and label chickens. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 69 (5): 219-225.

Chen, R.K.; Chang, L.W.; Chung, Y.Y.; Lee, M.H.; Ling, Y.C., 2004. Quantification of cow milk adulteration in goat milk using high-performance liquid chromatography with electrospray ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 18 (10): 1167-1171. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.1460

Chen, Y.; Wu, Y.; Wang, J.; Xu, B.; Zhong, Z.; Xia, J., 2009. Identification of cervidae DNA in feedstuff using a real-time polymerase chain reaction method with the new fluorescence intercalating dye EvaGreen. *Journal of Aoac International*, 92 (1): 175-180.

Cheng, X.; He, W.L.; Huang, F.; Huang, M.; Zhou, G.H., 2014. Multiplex real-time PCR for the identification and quantification of DNA from duck, pig and chicken in Chinese blood curds. *Food Research International*, 60: 30-37. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.047

Chilliard, Y.; Glasser, F.; Ferlay, A.; Bernard, L.; Rouel, J.; Doreau, M., 2007. Diet, rumen biohydrogenation and nutritional quality of cow and goat milk fat. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109 (8): 828-855. http://dx.doi.org/10.1002/ejlt.200700080

Chisholm, J.; Conyers, C.; Booth, C.; Lawley, W.; Hird, H., 2005. The detection of horse and donkey using real-time PCR. *Meat Science*, 70 (4): 727-732. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.03.009

Coletta, L.D.; Pereira, A.L.; Coelho, A.A.D.; Savino, V.J.M.; Menten, J.F.M.; Correr, E.; Franca, L.C.; Martinelli, L.A., 2012. Barn vs. free-range chickens: Differences in their diets determined by stable isotopes. *Food Chemistry*, 131 (1): 155-160. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.051

Collomb, M.; Butikofer, U.; Sieber, R.; Jeangros, B.; Bosset, J.O., 2002. Correlation between fatty acids in cows' milk fat produced in the Lowlands, Mountains and Highlands of Switzerland and botanical composition of the fodder. *International Dairy Journal*, 12 (8): 661-666. http://dx.doi.org/10.1016/s0958-6946(02)00062-6

Commission européenne, 2003. Règlement (UE) n°1379/2013 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2013 portant organisation commune des marchés dans le secteur des produits de la pêche et de l'aquaculture, modifiant les règlements (CE) n ° 1184/2006 et (CE) n ° 1224/2009 du Conseil et abrogeant le règlement (CE) n ° 104/2000 du Conseil. *JOUE L 354, 28.12.2013, p. 1–21.*

Coppa, M.; Chassaing, C.; Ferlay, A.; Agabriel, C.; Laurent, C.; Borreani, G.; Barcarolo, R.; Baars, T.; Kusche, D.; Harstad, O.M.; Verbic, J.; Golecky, J.; Delavaud, C.; Chilliard, Y.; Martin, B., 2015a. Potential of milk fatty acid composition to predict diet composition and authenticate feeding systems and altitude origin of European bulk milk. *Journal of Dairy Science*, 98 (3): 1539-1551. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8794

Coppa, M.; Chassaing, C.; Sibra, C.; Cornu, A.; Verbic, J.; Golecky, J.; Engel, E.; Ratel, J.; Boudon, A.; Ferlay, A.; Martin, B., 2019. Forage system is the key driver of mountain milk specificity. *Journal of Dairy Science*, 102 (11): 10483-10499. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2019-16726

Coppa, M.; Farruggia, A.; Ravaglia, P.; Pomies, D.; Borreani, G.; Le Morvan, A.; Ferlay, A., 2015b. Frequent moving of grazing dairy cows to new paddocks increases the variability of milk fatty acid composition. *Animal*, 9 (4): 604-613. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731114003000

Coppa, M.; Ferlay, A.; Borreani, G.; Revello-Chion, A.; Tabacco, E.; Tornambe, G.; Pradel, P.; Martin, B., 2015c. Effect of phenological stage and proportion of fresh herbage in cow diets on milk fatty acid composition. *Animal Feed Science and Technology*, 208: 66-78. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.07.006

Coppa, M.; Gorlier, A.; Lonati, M.; Martin, B.; Russo, E.M.; Lombardi, G., 2012a. The management of the transition from hay- to pasture-based diets affects milk fatty acid kinetics. *Dairy Science & Technology*, 92 (3): 279-295. http://dx.doi.org/10.1007/s13594-012-0065-6

Coppa, M.; Martin, B.; Agabriel, C.; Chassaing, C.; Sibra, C.; Constant, I.; Graulet, B.; Andueza, D., 2012b. Authentication of cow feeding and geographic origin on milk using visible and near-infrared spectroscopy. *Journal of Dairy Science*, 95 (10): 5544-5551. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-5272

Coppa, M.; Martin, B.; Pradel, P.; Leotta, B.; Priolo, A.; Vasta, V., 2011. Effect of a Hay-Based Diet or Different Upland Grazing Systems on Milk Volatile Compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (9): 4947-4954. http://dx.doi.org/10.1021/jf2005782

Costa, H.; Mafra, I.; Oliveira, M.B.P.P.; Amaral, J.S., 2016. Game: Types and Composition. *Encyclopedia of Food and Health, vol. 3*. Elsevier, 177-183. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-384947-2.00345-7

Cottenet, G.; Sonnard, V.; Blancpain, C.; Ho, H.Z.; Leong, H.L.; Chuah, P.F., 2016. A DNA macro-array to simultaneously identify 32 meat species in food samples. *Food Control*, 67: 135-143. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.02.042

Cozzolino, D.; De Mattos, D.; Martins, D.V., 2002a. Visible/near infrared reflectance spectroscopy for predicting composition and tracing system of production of beef muscle. *Animal Science*, 74: 477-484. http://dx.doi.org/10.1017/s1357729800052632

Cozzolino, R.; Passalacqua, S.; Salemi, S.; Garozzo, D., 2002b. Identification of adulteration in water buffalo mozzarella and in ewe cheese by using whey proteins as biomarkers and matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*, 37 (9): 985-991. http://dx.doi.org/10.1002/jms.358

Cozzolino, R.; Passalacqua, S.; Salemi, S.; Malvagna, P.; Spina, E.; Garozzo, D., 2001. Identification of adulteration in milk by matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*, 36 (9): 1031-1037. http://dx.doi.org/10.1002/jms.206

Croissant, A.E.; Washburn, S.P.; Dean, L.L.; Drake, M.A., 2007. Chemical properties and consumer perception of fluid milk from conventional and pasture-based production systems. *Journal of Dairy Science*, 90 (11): 4942-4953. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0456

Cunsolo, V.; Muccilli, V.; Saletti, R.; Foti, S., 2013. MALDI-TOF mass spectrometry for the monitoring of she-donkey's milk contamination or adulteration. *Journal of Mass Spectrometry*, 48 (2): 148-153. http://dx.doi.org/10.1002/jms.3138

Danezis, G.P.; Tsagkaris, A.S.; Camin, F.; Brusic, V.; Georgiou, C.A., 2016. Food authentication: Techniques, trends & emerging approaches. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 85 (Part A, special Issue): 123-132. http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.026

Dardenne, P.; Fumière, O.; Romnee, J.M.; Berben, G., 2001. *Développement de systèmes analytiques pour le contrôle de l'authenticité de viandes certifiées*: Rapport de projet NP/42/022, 112 p.

De Noni, I.; Battelli, G., 2008. Terpenes and fatty acid profiles of milk fat and "Bitto" cheese as affected by transhumance of cows on different mountain pastures. *Food Chemistry*, 109 (2): 299-309. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.12.033

de Oliveira, L.; Carvalho, P.C.F.; Prache, S., 2012. Fat spectro-colorimetric characteristics of lambs switched from a low to a high dietary carotenoid level for various durations before slaughter. *Meat Science*, 92 (4): 644-650. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.06.012

De Ruyck, H.; De Ridder, H.; Van Renterghem, R.; Van Wambeke, F., 1999. Validation of HPLC method of analysis of tetracycline residues in eggs and broiler meat and its application to a feeding trial. *Food Additives and Contaminants*, 16 (2): 47-56.

De Smet, S.; Balcaen, A.; Claeys, E.; Boeckx, P.; Van Cleemput, O., 2004. Stable carbon isotope analysis of different tissues of beef animals in relation to their diet. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 18 (11): 1227-1232. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.1471

Dejong, N.; Visser, S.; Olieman, C., 1993. Determination of milk-proteins by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 652 (1): 207-213. http://dx.doi.org/10.1016/0021-9673(93)80661-q

del Moral, F.G.; Guillen, A.; del Moral, L.G.; O'Valle, F.; Martinez, L.; del Moral, R.G., 2009. Duroc and Iberian pork neural network classification by visible and near infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 90 (4): 540-547. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.07.027

Dennis, M.J., 1998. Recent developments in food authentication. *Analyst*, 123 (9): 151R-156R.

Devincenzi, T.; Delfosse, O.; Andueza, D.; Nabinger, C.; Prache, S., 2014. Dose-dependent response of nitrogen stable isotope ratio to proportion of legumes in diet to authenticate lamb meat produced from legume-rich diets. *Food Chemistry*, 152: 456-461. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.164

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Prache, S., 2019. How does barley supplementation in lambs grazing alfalfa affect meat sensory quality and authentication? *Animal*, 13 (2): 427-434. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118001477

Di Girolamo, F.; Masotti, A.; Salvatori, G.; Scapaticci, M.; Muraca, M.; Putignani, L., 2014. A Sensitive and Effective Proteomic Approach to Identify She-Donkey's and Goat's Milk Adulterations by MALDI-TOF MS Fingerprinting. *International Journal of Molecular Sciences*, 15 (8): 13697-13719. http://dx.doi.org/10.3390/ijms150813697

Dian, P.H.M.; Andueza, D.; Barbosa, C.M.P.; Amoureux, S.; Jestin, M.; Carvalho, P.C.F.; Prado, I.N.; Prache, S., 2007a. Methodological developments in the use of visible reflectance spectroscopy for discriminating pasture-fed from concentratefed lamb carcasses. *Animal*, 1 (8): 1198-1208. http://dx.doi.org/10.1017/s175173110700047x

Dian, P.H.M.; Andueza, D.; Jestin, M.; Prado, I.N.; Prache, S., 2008. Comparison of visible and near infrared reflectance spectroscopy to discriminate between pasture-fed and concentrate-fed lamb carcasses. *Meat Science*, 80 (4): 1157-1164. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.009

Dian, P.H.M.; Chauveau-Duriot, B.; Prado, I.N.; Prache, S., 2007b. A dose-response study relating the concentration of carotenoid pigments in blood and reflectance spectrum characteristics of fat to carotenoid intake level in sheep. *Journal of Animal Science*, 85 (11): 3054-3061. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2006-477

Dias, L.G.; Correia, D.M.; Sa-Morais, J.; Sousa, F.; Pires, J.M.; Peres, A.M., 2008. Raw bovine meat fatty acids profile as an origin discriminator. *Food Chemistry*, 109 (4): 840-847. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.01.008

Djurdievic, N.; Sheu, S.C.; Hsieh, Y.H.P., 2005. Quantitative detection of poultry in cooked meat products. *Journal of Food Science*, 70 (9): C586-C593. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb08309.x

Donarski, J.; Heinrich, K., 2016. *British beef origin project II - Improvement of the British beef isotope landscape map (isoscape) for Scotland and northern Ireland*: Fera Science Ltd, (FS515009: Final report), 45 p. https://www.foodstandards.gov.scot/downloads/Beef_Origin_Project__II_____Improvement_of_the_British_Beef_Isotope_Landscape_Map__Isoscape__for_Scotland_and_Northern_Ireland.pdf

Dooley, J.J.; Paine, K.E.; Garrett, S.D.; Brown, H.M., 2004. Detection of meat species using TaqMan real-time PCR assays. *Meat Science*, 68 (3): 431-438. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.04.010

Doosti, A.; Dehkordi, P.G.; Rahimi, E., 2014. Molecular assay to fraud identification of meat products. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 51 (1): 148-152. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-011-0456-3

Downey, G., 2016. *Advances in Food Authenticity Testing*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 798 p.

Draisci, R.; Lucentini, L.; Boria, P.; Lucarelli, C., 1995. Micro high-performance liquid-chromatography for the determination of nicarbazin in chicken tissues, eggs, poultry feed and litter. *Journal of Chromatography A*, 697 (1-2): 407-414. http://dx.doi.org/10.1016/0021-9673(94)00960-h

Druml, B.; Grandits, S.; Mayer, W.; Hochegger, R.; Cichna-Markl, M., 2015a. Authenticity control of game meat products - A single method to detect and quantify adulteration of fallow deer (Dama dama), red deer (Cervus elaphus) and sika deer (Cervus nippon) by real-time PCR. *Food Chemistry*, 170: 508-517. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.048

Druml, B.; Hochegger, R.; Cichna-Markl, M., 2015b. Duplex real-time PCR assay for the simultaneous determination of the roe deer (Capreolus capreolus) and deer (sum of fallow deer, red deer and sika deer) content in game meat products. *Food Control*, 57: 370-376. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.04.023

Drummond, M.G.; Brasil, B.S.A.F.; Dalsecco, L.S.; Brasil, R.S.A.F.; Teixeira, L.V.; Oliveira, D.A.A., 2013. A versatile real-time PCR method to quantify bovine contamination in buffalo products. *Food Control*, 29 (1): 131-137. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.051

Duckett, S.K.; Pratt, S.L.; Pavan, E., 2009. Corn oil or corn grain supplementation to steers grazing endophyte-free tall fescue. II. Effects on subcutaneous fatty acid content and lipogenic gene expression. *Journal of Animal Science*, 87 (3): 1120-1128. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1420

Dupont, D.; Muller-Renaud, S., 2006. Quantification of proteins in dairy products using an optical biosensor. *Journal of Aoac International*, 89 (3): 843-848.

Dupont, D.; Rolet-Repecaud, O.; Senocq, D., 2003. A new approach to monitoring proteolysis phenomena using antibodies specifically directed against the enzyme cleavage site on its substrate. *Analytical Biochemistry*, 317 (2): 240-246. http://dx.doi.org/10.1016/s0003-2697(03)00115-5

Dvorak, P.; Suchy, P.; Strakova, E.; Dolezalova, J., 2010. Variation in Egg Yolk Colour in Different Systems of Rearing Laying Hens. *Acta Veterinaria Brno*, 79: S13-S19. http://dx.doi.org/10.2754/avb201079S9S013

Ehtesham, E.; Baisden, W.T.; Keller, E.D.; Hayman, A.R.; Van Hale, R.; Frew, R.D., 2013. Correlation between precipitation and geographical location of the delta H-2 values of the fatty acids in milk and bulk milk powder. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 111: 105-116. http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.026

Engel, E.; Ferlay, A.; Cornu, A.; Chilliard, Y.; Agabriel, C.; Bielicki, G.; Martin, B., 2007. Relevance of isotopic and molecular biomarkers for the authentication of milk according to production zone and type of feeding of the cow. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (22): 9099-9108. http://dx.doi.org/10.1021/jf0714620

Engel, E.; Ratel, J., 2018. Authentification de l'alimentation des animaux d'élevage. In: (coord.), B.V., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui) Chapitre 13, 393-406.

Erasmus, S.W.; Manley, M.; Muller, M.; Hoffman, L.C., 2016. MicroNIR spectroscopy for the authentication of south African lamb. *Proceedings of 62nd international congress of meat science and technology: Meat for global sustainability*. Bangkok, Thailand, 14–19 August, 4 p. http://icomst-proceedings.helsinki.fi/papers/2016_03_03.pdf

Erasmus, S.W.; Muller, M.; Butler, M.; Hoffman, L.C., 2018. The truth is in the isotopes: Authenticating regionally unique South African lamb. *Food Chemistry*, 239: 926-934. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.026

Fajardo, V.; Gonzalez, I.; Lopez-Calleja, I.; Martin, I.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2006. PCR-RFLP authentication of meats from red deer (Cervus elaphus), fallow deer (Dama dama), roe deer (Capreolus capreolus), cattle (Bos taurus), sheep (Ovis aries), and goat (Capra hircus). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (4): 1144-1150. http://dx.doi.org/10.1021/jf051766r

Fajardo, V.; Gonzalez, I.; Lopez-Calleja, I.; Martin, I.; Rojas, M.; Pavon, M.A.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2007. Analysis of mitochondrial DNA for authentication of meats from chamois (Rupicapra rupicapra), pyrenean ibex (Capra pyrenaica), and mouflon (Ovis ammon) by polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism. *Journal of Aoac International*, 90 (1): 179-186.

Fajardo, V.; Gonzalez, I.; Martin, I.; Rojas, M.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2008. Differentiation of European wild boar (Sus scrofa scrofa) and domestic swine (Sus scrofa domestica) meats by PCR analysis targeting the mitochondrial D-loop and the nuclear melanocortin receptor 1 (MC1R) genes. *Meat Science*, 78 (3): 314-322. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.06.018

Fajardo, V.; Gonzalez, I.; Martin, I.; Rojas, M.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2009. A LightCycler TaqMan PCR assay for quantitative detection of chamois (Rupicapra rupicapra) and pyrenean ibex (Capra pyrenaica) in experimental meat mixtures. *International Journal of Food Science and Technology*, 44 (10): 1997-2004. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.02020.x

Fajardo, V.; Gonzalez, I.; Rojas, M.; Garcia, T.; Martin, R., 2010. A review of current PCR-based methodologies for the authentication of meats from game animal species. *Trends in Food Science & Technology*, 21 (8): 408-421. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2010.06.002

Fang, X.; Zhang, C., 2016. Detection of adulterated murine components in meat products by TaqMan (c) real-time PCR. *Food Chemistry*, 192: 485-490. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.020

Fanton, C.; Delogu, G.; Maccioni, E.; Podda, G.; Seraglia, R.; Traldi, P., 1998. Matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry in the dairy industry 2. The protein fingerprint of ewe cheese and its application to detection of adulteration by bovine milk. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 12 (20): 1569-1573. http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1097-0231(19981030)12:20<1569::aid-rcm341>3.0.co;2-f

Farrokhi, R.; Joozani, R.J., 2011. Identification of pork genome in commercial meat extracts for Halal authentication by SYBR green I real-time PCR. *International Journal of Food Science and Technology*, 46 (5): 951-955. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02577.x

Farruggia, A.; Pomies, D.; Coppa, M.; Ferlay, A.; Verdier-Metz, I.; Le Morvan, A.; Bethier, A.; Pompanon, F.; Troquier, O.; Martin, B., 2014. Animal performances, pasture biodiversity and dairy product quality: How it works in contrasted mountain grazing systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 185: 231-244. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.001

Fasolato, L.; Novelli, E.; Salmaso, L.; Corain, L.; Camin, F.; Perini, M.; Antonetti, P.; Balzan, S., 2010. Application of Nonparametric Multivariate Analyses to the Authentication of Wild and Farmed European Sea Bass (Dicentrarchus labrax). Results of a Survey on Fish Sampled in the Retail Trade. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 (20): 10979-10988. http://dx.doi.org/10.1021/jf1015126

Faulkner, H.; O'Callaghan, T.F.; McAuliffe, S.; Hennessy, D.; Stanton, C.; O'Sullivan, M.G.; Kerry, J.P.; Kilcawley, K.N., 2018. Effect of different forage types on the volatile and sensory properties of bovine milk. *Journal of Dairy Science*, 101 (2): 1034-1047. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2017-13141

Fedele, V.; Rubino, R.; Claps, S.; Sepe, L.; Morone, G., 2005. Seasonal evolution of volatile compounds content and aromatic profile in milk and cheese from grazing goat. *Small Ruminant Research*, 59 (2-3): 273-279. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2005.05.013

Feligini, M.; Bonizzi, I.; Curik, V.C.; Parma, P.; Greppi, G.F.; Enne, G., 2005. Detection of adulteration in Italian Mozzarella cheese using mitochondrial DNA templates as biomarkers. *Food Technology and Biotechnology*, 43 (1): 91-95.

Ferlay, A.; Martin, B.; Pradel, P.; Coulon, J.B.; Chilliard, Y., 2006. Influence of grass-based diets on milk fatty acid composition and milk lipolytic system in tarentaise and Montbeliarde cow breeds. *Journal of Dairy Science*, 89 (10): 4026-4041. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72446-8

Fernandes, T.J.R.; Costa, J.; Oliveira, M.B.P.P.; Mafra, I., 2017. DNA barcoding coupled to HRM analysis as a new and simple tool for the authentication of Gadidae fish species. *Food Chemistry*, 230: 49-57. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.015

Ferreira, I.M.P.L.V.O.; Oliveira, M.B.P.P., 2003. Determination of caseinomacropeptide by an RP-HPLC method and monitoring of the addition of rennet whey to powdered milk. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 26 (1): 99-107. http://dx.doi.org/10.1081/jlc-120017155

Ferreira, M.; Caetano, M.; Antunes, P.; Costa, J.; Gil, O.; Bandarra, N.; Pousao-Ferreira, P.; Vale, C.; Reis-Henriques, M.A., 2010. Assessment of contaminants and biomarkers of exposure in wild and farmed seabass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73 (4): 579-588. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.01.019

Fornal, E.; Montowska, M., 2019. Species-specific peptide-based liquid chromatography-mass spectrometry monitoring of three poultry species in processed meat products. *Food Chemistry*, 283: 489-498. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.074

Fraisse, D.; Carnat, A.; Viala, D.; Pradel, P.; Besle, J.M.; Coulon, J.B.; Felgines, C.; Lamaison, J.L., 2007. Polyphenolic composition of a permanent pasture: Variations related to the period of harvesting. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87 (13): 2427-2435. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2918

Franke, B.M.; Hadorn, R.; Bosset, J.O.; Gremaud, G.; Kreuzer, M., 2008. Is authentication of the geographic origin of poultry meat and dried beef improved by combining multiple trace element and oxygen isotope analysis? *Meat Science*, 80 (3): 944-947. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.03.018

Fuentes, A.; Masot, R.; Fernandez-Segovia, I.; Ruiz-Rico, M.; Alcaniz, M.; Barat, J.M., 2013. Differentiation between fresh and frozen-thawed sea bream (Sparus aurata) using impedance spectroscopy techniques. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19: 210-217. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2013.05.001

Gagaoua, M.; Monteils, V.; Couvreur, S.; Picard, B., 2017. Identification of Biomarkers Associated with the Rearing Practices, Carcass Characteristics, and Beef Quality: An Integrative Approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (37): 8264-8278. http://dx.doi.org/10.1021/acsjafc.7b03239

Gamboa-Delgado, J.; Molina-Poveda, C.; Godinez-Siordia, D.E.; Villarreal-Cavazos, D.; Ricque-Marie, D.; Cruz-Suarez, L.E., 2014. Application of stable isotope analysis to differentiate shrimp extracted by industrial fishing or produced through aquaculture practices. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 71 (10): 1520-1528. http://dx.doi.org/10.1139/cjfas-2014-0005

Gandemer, G., 2002. Lipids in muscles and adipose tissues, changes during processing and sensory properties of meat products. *Meat Science*, 62 (3): 309-321. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00128-6

Gaspardo, B.; Lavrencic, A.; Levart, A.; Del Zotto, S.; Stefanon, B., 2010. Use of milk fatty acids composition to discriminate area of origin of bulk milk. *Journal of Dairy Science*, 93 (8): 3417-3426. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2788

Gebbing, T.; Schellberg, J.; Kühbauch, W., 2004. Switching from grass to maize diet changes the C isotope signature of meat and fat during fattening of steers. *Land use systems in grassland dominated regions. Proceedings of the 20th General Meeting of the European Grassland Federation* Luzern, Switzerland, 21-24 June 2004, 1130-1132.

Gessner, J.; Wurtz, S.; Kirschbaum, F.; Wirth, M., 2008. Biochemical composition of caviar as a tool to discriminate between aquaculture and wild origin. *Journal of Applied Ichthyology*, 24: 52-56. http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0426.2008.01092.x

Giaccone, D.; Revello-Chion, A.; Galassi, L.; Bianchi, P.; Battelli, G.; Coppa, M.; Tabacco, E.; Borreani, G., 2016. Effect of milk thermisation and farming system on cheese sensory profile and fatty acid composition. *International Dairy Journal*, 59: 10-19. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.02.047

Giaretta, N.; Di Giuseppe, A.M.A.; Lippert, M.; Parente, A.; Di Maro, A., 2013. Myoglobin as marker in meat adulteration: A UPLC method for determining the presence of pork meat in raw beef burger. *Food Chemistry*, 141 (3): 1814-1820. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.124

Girad, J.P.; Culioli, J.; Denoyer, C.; Berdague, J.L.; Touraille, C., 1993. Comparison between 2 populations of 2 poultry species according to their fat-composition. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 57 (1): 9-15.

Girish, P.S.; Anjaneyulu, A.S.R.; Viswas, K.N.; Anand, M.; Rajkumar, N.; Shivakumar, B.M.; Bhaskar, S., 2004. Sequence analysis of mitochondrial 12S rRNA gene can identify meat species. *Meat Science*, 66 (3): 551-556. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00158-x

Girish, P.S.; Anjaneyulu, A.S.R.; Viswas, K.N.; Santhosh, F.H.; Bhilegaonkar, K.N.; Agarwal, R.K.; Kondaiah, N.; Nagappa, K., 2007. Polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism of mitochondrial 12S rRNA gene: A simple method for identification of poultry meat species. *Veterinary Research Communications*, 31 (4): 447-455. http://dx.doi.org/10.1007/s11259-006-3390-5

Girish, P.S.; Anjaneyulu, A.S.R.; Viswas, K.N.; Shivakumar, B.M.; Anand, M.; Patel, M.; Sharma, B., 2005. Meat species identification by polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism (PCR-RFLP) of mitochondrial 12S rRNA gene. *Meat Science*, 70 (1): 107-112. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.12.004

Gonzalez-Martin, I.; Gonzalez-Perez, C.; Mendez, J.H.; Marques-Macias, E.; Poveda, F.S., 1999. Use of isotope analysis to characterize meat from Iberian-breed swine. *Meat Science*, 52 (4): 437-441. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(99)00027-3

Griboff, J.; Baroni, M.V.; Horacek, M.; Wunderlin, D.A.; Monferran, M.V., 2019. Multielemental plus isotopic fingerprint enables linking soil, water, forage and milk composition, assessing the geographical origin of Argentinean milk. *Food Chemistry*, 283: 549-558. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.067

Guo, B.L.; Wei, Y.M.; Pan, J.R.; Li, Y., 2010. Stable C and N isotope ratio analysis for regional geographical traceability of cattle in China. *Food Chemistry*, 118 (4): 915-920. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.062

Hagren, V.; Connolly, L.; Elliott, C.T.; Lovgren, T.; Tuomola, M., 2005. Rapid screening method for halofuginone residues in poultry eggs and liver using time-resolved fluorometry combined with the all-in-one dry chemistry assay concept. *Analytica Chimica Acta*, 529 (1-2): 21-25. http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2004.07.028

Hahn, G.; Piene, A.K.; Janisch, S.; Wicke, M., 2013. Study on the physiological water/protein ratio in breast fillet from chicken reared in 2012. *WSPA 2013 - EggMeat 2013 - XXI European Symposium on the Quality of Poultry Meat, XV European Symposium on the Quality of Eggs and Egg Products : proceedings: World?s Poultry Science Journal, Volume 69, Supplement*. Bergamo: 15-19/09/2013. WPSA, 1-4.

Haider, N.; Nabulsi, I.; Al-Safadi, B., 2012. Identification of meat species by PCR-RFLP of the mitochondrial COI gene. *Meat Science*, 90 (2): 490-493. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.09.013

Hammershoj, M.; Johansen, N.F., 2016. Review: The effect of grass and herbs in organic egg production on egg fatty acid composition, egg yolk colour and sensory properties. *Livestock Science*, 194: 37-43. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2016.11.001

Harrison, S.M.; Monahan, F.J.; Zazzo, A.; Bahar, B.; Moloney, A.P.; Scrimgeour, C.M.; Schmidt, O., 2007. Three-dimensional growth of bovine hoof as recorded by carbon stable isotope ratios. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 21 (24): 3971-3976. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.3309

Harrison, S.M.; Schmidt, O.; Moloney, A.P.; Kelly, S.D.; Rossmann, A.; Schellenberg, A.; Camin, F.; Perini, M.; Hoogewerff, J.; Monahan, F.J., 2011. Tissue turnover in ovine muscles and lipids as recorded by multiple (H, C, O, S) stable isotope ratios. *Food Chemistry*, 124 (1): 291-297. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.035

Heaton, K.; Kelly, S.D.; Hoogewerff, J.; Woolfe, M., 2008. Verifying the geographical origin of beef: The application of multi-element isotope and trace element analysis. *Food Chemistry*, 107 (1): 506-515. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.010

Hebert, P.D.N.; Cywinska, A.; Ball, S.L.; DeWaard, J.R., 2003. Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 270 (1512): 313-321. http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2002.2218

Hellberg, R.S.; Hernandez, B.C.; Hernandez, E.L., 2017. Identification of meat and poultry species in food products using DNA barcoding. *Food Control*, 80: 23-28. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.04.025

Herrero-Martinez, J.M.; Simo-Alfonso, E.F.; Ramis-Ramos, G.; Gelfi, C.; Righetti, P.G., 2000. Determination of cow's milk and ripening time in nonbovine cheese by capillary electrophoresis of the ethanol-water protein fraction. *Electrophoresis*, 21 (3): 633-640. http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1522-2683(20000201)21:3<633::aid-elps633>3.0.co;2-d

Heude, C.; Elbayed, K.; Jezequel, T.; Fanuel, M.; Lugan, R.; Heintz, D.; Benoit, P.; Piotto, M., 2016. Metabolic Characterization of Caviar Specimens by H-1 NMR Spectroscopy: Towards Caviar Authenticity and Integrity. *Food Analytical Methods*, 9 (12): 3428-3438. http://dx.doi.org/10.1007/s12161-016-0540-4

Hird, H.; Chisholm, J.; Brown, J., 2005. The detection of commercial duck species in food using a single probe-multiple species-specific primer real-time PCR assay. *European Food Research and Technology*, 221 (3-4): 559-563. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-005-1197-1

Hobson, K.A., 1999. Tracing origins and migration of wildlife using stable isotopes: a review. *Oecologia*, 120 (3): 314-326. http://dx.doi.org/10.1007/s004420050865

Hocquette, J.F.; Cassar-Malek, I.; Bernard-Capel, C.; Picard, B., 2009. Functional genomics and new markers for beef production - minireview. *Animal Science Papers and Reports*, 27 (4): 273-279.

Horvatovich, P.; Miesch, M.; Hasselmann, C.; Marchioni, E., 2000. Supercritical fluid extraction of hydrocarbons and 2-alkylcyclobutanones for the detection of irradiated foodstuffs. *Journal of Chromatography A*, 897 (1-2): 259-268. http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9673(00)00810-4

Huang, J.Y.; He, Z.Y.; Cao, J.; Hong, J.; Wu, Z.J.; Gao, H.Y.; Liao, X.Y., 2018. Electrochemical immunosensor detection for lactoferrin in milk powder. *International Journal of Electrochemical Science*, 13 (8): 7816-7826. http://dx.doi.org/10.20964/2018.08.47

Huang, Y.; Andueza, D.; de Oliveira, L.; Zawadzki, F.; Prache, S., 2015a. Comparison of visible and near infrared reflectance spectroscopy on fat to authenticate dietary history of lambs. *Animal*, 9 (11): 1912-1920. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115001172

Huang, Y.; Andueza, D.; de Oliveira, L.; Zawadzki, F.; Prache, S., 2015b. Visible spectroscopy on carcass fat combined with chemometrics to distinguish pasture-fed, concentrate-fed and concentrate-finished pasture-fed lambs. *Meat Science*, 101: 5-12. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.10.024

Huet, A.C.; Mortier, L.; Daeseleire, E.; Fodey, T.; Elliott, C.; Delahaut, P., 2005. Development of an ELISA screening test for nitroimidazoles in egg and chicken muscle. *Analytica Chimica Acta*, 534 (1): 157-162. http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2004.06.037

Hung, C.J.; Ho, H.P.; Chang, C.C.; Lee, M.R.; Franje, C.A.; Kuo, S.I.; Lee, R.J.; Chou, C.C., 2011. Electrochemical profiling using copper nanoparticle-plated electrode for identification of ostrich meat and evaluation of meat grades. *Food Chemistry*, 126 (3): 1417-1423. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.123

Hurley, I.P.; Coleman, R.C.; Ireland, H.E.; Williams, J.H.H., 2006. Use of sandwich IgG ELISA for the detection and quantification of adulteration of milk and soft cheese. *International Dairy Journal*, 16 (7): 805-812. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.07.009

Hurtaud, C.; Dutreuil, M.; Coppa, M.; Agabriel, C.; Martin, B., 2014. Characterization of milk from feeding systems based on herbage or corn silage with or without flaxseed and authentication through fatty acid profile. *Dairy Science & Technology*, 94 (2): 103-123. http://dx.doi.org/10.1007/s13594-013-0147-0

Ivanova, I.; Ivanov, G.; Shikov, V.; Ivanova, S., 2014. Analytical Method for Differentiation of Chilled and Frozen-Thawed Chicken Meat. *Acta Universitatis Cibiniensis. Series E: Food Technology*, 18 (2): 43-53. http://dx.doi.org/10.2478/aucft-2014-0013

Iwobi, A.; Sebah, D.; Kraemer, I.; Losher, C.; Fischer, G.; Busch, U.; Huber, I., 2015. A multiplex real-time PCR method for the quantification of beef and pork fractions in minced meat. *Food Chemistry*, 169: 305-313. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.139

Jahren, A.H.; Kraft, R.A., 2008. Carbon and nitrogen stable isotopes in fast food: Signatures of corn and confinement. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (46): 17855-17860. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0809870105

Jakes, W.; Gerdova, A.; Defernez, M.; Watson, A.D.; McCallum, C.; Limer, E.; Colquhoun, I.J.; Williamson, D.C.; Kemsley, E.K., 2015. Authentication of beef versus horse meat using 60 MHz H-1 NMR spectroscopy. *Food Chemistry*, 175: 1-9. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.110

Jonker, K.M.; Tilburg, J.; Hagele, G.H.; De Boer, E., 2008. Species identification in meat products using real-time PCR. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 25 (5): 527-533. http://dx.doi.org/10.1080/02652030701584041

Kaffarnik, S.; Schroder, M.; Lehnert, K.; Baars, T.; Vetter, W., 2014. delta C-13 values and phytanic acid diastereomer ratios: combined evaluation of two markers suggested for authentication of organic milk and dairy products. *European Food Research and Technology*, 238 (5): 819-827. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-014-2158-3

Kaminaridesa, S.E.; Koukiassa, P., 2002. Detection of bovine milk in ovine yoghurt by electrophoresis of para-kappa-casein. *Food Chemistry*, 78 (1): 53-55. http://dx.doi.org/10.1016/s0308-8146(01)00351-x

Kamruzzaman, M.; Sun, D.W.; ElMasry, G.; Allen, P., 2013. Fast detection and visualization of minced lamb meat adulteration using NIR hyperspectral imaging and multivariate image analysis. *Talanta*, 103: 130-136. http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2012.10.020

Kane, D.E.; Hellberg, R.S., 2016. Identification of species in ground meat products sold on the US commercial market using DNA-based methods. *Food Control*, 59: 158-163. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.020

Karoui, R.; Hassoun, A.; Ethuin, P., 2017. Front face fluorescence spectroscopy enables rapid differentiation of fresh and frozen-thawed sea bass (Dicentrarchus labrax) fillets. *Journal of Food Engineering*, 202: 89-98. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.018

Kelly, S.; Heaton, K.; Hoogewerff, J., 2005. Tracing the geographical origin of food: The application of multi-element and multi-isotope analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 16 (12): 555-567. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2005.08.008

Kesmen, Z.; Gulluce, A.; Sahin, F.; Yetim, H., 2009. Identification of meat species by TaqMan-based real-time PCR assay. *Meat Science*, 82 (4): 444-449. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.02.019

Kim, J.S.; Hwang, I.M.; Lee, G.H.; Park, Y.M.; Choi, J.Y.; Jamila, N.; Khan, N.; Kim, K.S., 2017. Geographical origin authentication of pork using multi-element and multivariate data analyses. *Meat Science*, 123: 13-20. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.08.011

Koppel, R.; Daniels, M.; Felderer, N.; Brunen-Nieweler, C., 2013. Multiplex real-time PCR for the detection and quantification of DNA from duck, goose, chicken, turkey and pork. *European Food Research and Technology*, 236 (6): 1093-1098. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-013-1973-2

Kornexl, B.E.; Werner, T.; Rossmann, A.; Schmidt, H.L., 1997. Measurement of stable isotope abundances in milk and milk ingredients - A possible tool for origin assignment and quality control. *Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung a-Food Research and Technology*, 205 (1): 19-24. http://dx.doi.org/10.1007/s002170050117

Kotoura, S.; Murakami-Yamaguchi, Y.; Kizu, K.; Nakamura, M.; Fuchu, H.; Miake, K.; Sugiyama, M.; Narita, H., 2012. Establishment of a sandwich ELISA for the determination of beef content in processed foods by using monoclonal antibodies to myoglobin. *Food and Agricultural Immunology*, 23 (3): 289-301. http://dx.doi.org/10.1080/09540105.2011.624176

Krouse, H.R.; Grinenko, V.A., 1991. *Stable isotopes: natural and anthropogenic sulphur in the environment - SCOPE 43*. Paris (France): Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) ; United Nations Development Programme, 440 p.

Kumar, D.; Singh, S.P.; Karabasanavar, N.S.; Singh, R.; Umapathi, V., 2014. Authentication of beef, carabeef, chevon, mutton and pork by a PCR-RFLP assay of mitochondrial cytb gene. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 51 (11): 3458-3463. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-012-0864-z

Lago, F.C.; Herrero, B.; Madrinan, M.; Vieites, J.M.; Espineira, M., 2011. Authentication of species in meat products by genetic techniques. *European Food Research and Technology*, 232 (3): 509-515. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-010-1417-1

Laube, I.; Zagon, J.; Spiegelberg, A.; Butschke, A.; Kroh, L.W.; Broll, H., 2007. Development and design of a 'ready-to-use' reaction plate for a PCR-based simultaneous detection of animal species used in foods. *International Journal of Food Science and Technology*, 42 (1): 9-17. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01154.x

Leduc, F.; Krzewinski, F.; Le Fur, B.; N'Guessan, A.; Malle, P.; Kol, O.; Duflos, G., 2012. Differentiation of fresh and frozen/thawed fish, European sea bass (Dicentrarchus labrax), gilthead seabream (Sparus aurata), cod (Gadus morhua) and salmon (Salmo salar), using volatile compounds by SPME/GC/MS. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (12): 2560-2568. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5673

Lee, S.J.; Chen, M.C.; Lin, C.W., 2001. Detection of cows' milk in goats' milk by capillary zone electrophoresis. *Australian Journal of Dairy Technology*, 56 (1): 24-27.

Lenas, D.S.; Triantafillou, D.J.; Chatziantoniou, S.; Nathanailides, C., 2011. Fatty acid profile of wild and farmed gilthead sea bream (Sparus aurata). *Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit-Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 6 (4): 435-440. http://dx.doi.org/10.1007/s00003-011-0695-2

Levieux, D.; Venien, A., 1994. Rapid, sensitive two-site ELISA for detection of cows' milk in goats' or ewes' milk using monoclonal antibodies. *Journal of Dairy Research*, 61 (1): 91-99. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029900028089

Li, L.; Boyd, C.E.; Sun, Z.L., 2016. Authentication of fishery and aquaculture products by multi-element and stable isotope analysis. *Food Chemistry*, 194: 1238-1244. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.123

Liu, L.H.; Chen, F.C.; Dorsey, J.L.; Hsieh, Y.H.P., 2006. Sensitive monoclonal antibody-based sandwich ELISA for the detection of porcine skeletal muscle in meat and feed products. *Journal of Food Science*, 71 (1): M1-M6. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb12393.x

Liu, N.J.; Koot, A.; Hettinga, K.; De Jong, J.; van Ruth, S.M., 2018. Portraying and tracing the impact of different production systems on the volatile organic compound composition of milk by PTR-(Quad)MS and PTR-(ToF)MS. *Food Chemistry*, 239: 201-207. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.099

Lopez-Andreo, M.; Aldeguer, M.; Guillen, I.; Gabaldon, J.A.; Puyet, A., 2012. Detection and quantification of meat species by qPCR in heat-processed food containing highly fragmented DNA. *Food Chemistry*, 134 (1): 518-523. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.111

Lopez-Calleja, I.; Gonzalez, I.; Fajardo, V.; Martin, I.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2005. Application of polymerase chain reaction to detect adulteration of sheep's milk with goats' milk. *Journal of Dairy Science*, 88 (9): 3115-3120. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72993-3

Lopez-Calleja, I.; Gonzalez, I.; Fajardo, V.; Martin, I.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2007a. Quantitative detection of goats' milk in sheep's milk by real-time PCR. *Food Control*, 18 (11): 1466-1473. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.11.006

Lopez-Calleja, I.; Gonzalez, I.; Fajardo, V.; Martin, I.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2007b. Real-time TaqMan PCR for quantitative detection of cows' milk in ewes' milk mixtures. *International Dairy Journal*, 17 (7): 729-736. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2006.09.005

López, L.B.; Binaghi, M.J.; Greco, C.B.; Mambrín, M.C.; Valencia, M.E., 2011. Identificación de especies cárnicas en productos cárnicos cocidos: utilización de SDS-page como método de screening. *Revista chilena de nutrición*, 38 (2): 187-196. http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182011000200009

Lopparelli, R.M.; Cardazzo, B.; Balzan, S.; Giaccone, V.; Novelli, E., 2007. Real-time TaqMan polymerase chain reaction detection and quantification of cow DNA in pure water buffalo mozzarella cheese: Method validation and its application on commercial samples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (9): 3429-3434. http://dx.doi.org/10.1021/jf0637271

Lucas, A.; Agabriel, C.; Martin, B.; Ferlay, A.; Verdier-Metz, I.; Coulon, J.B.; Rock, E., 2006. Relationships between the conditions of cow's milk production and the contents of components of nutritional interest in raw milk farmhouse cheese. *Lait*, 86 (3): 177-202. http://dx.doi.org/10.1051/lait:2005049

Macari, S.; Graulet, B.; Andueza, D.; Prache, S., 2017. Nitrogen stable isotope and carotenoid pigments signatures in the meat as tools to trace back the diet: Comparison between two sheep breeds. *Small Ruminant Research*, 153: 107-113. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.05.013

Maede, D., 2006. A strategy for molecular species detection in meat and meat products by PCR-RFLP and DNA sequencing using mitochondrial and chromosomal genetic sequences. *European Food Research and Technology*, 224 (2): 209-217. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-006-0320-2

Mafra, I.; Ferreira, I.M.P.L.V.O.; Faria, M.A.; Oliveira, B.P.P., 2004. A novel approach to the quantification of bovine milk in ovine cheeses using a duplex polymerase chain reaction method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 (16): 4943-4947. http://dx.doi.org/10.1021/jf049635y

Mafra, I.; Roxo, A.; Ferreira, I.M.P.L.V.O.; Oliveira, M.B.P.P., 2007. A duplex polymerase chain reaction for the quantitative detection of cowsl milk in goats' milk cheese. *International Dairy Journal*, 17 (9): 1132-1138. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2007.01.009

Mamani-Linares, L.W.; Gallo, C.; Alomar, D., 2012. Identification of cattle, llama and horse meat by near infrared reflectance or transflectance spectroscopy. *Meat Science*, 90 (2): 378-385. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.08.002

Manca, G.; Camin, F.; Coloru, G.C.; Del Caro, A.; Depentori, D.; Franco, M.A.; Versini, G., 2001. Characterization of the geographical origin of pecorino sardo cheese by casein stable isotope (C-13/C-12 and N-15/N-14) ratios and free amino acid ratios. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49 (3): 1404-1409. http://dx.doi.org/10.1021/jf000706c

Marchioni, E.; Horvatovich, N.; Charon, H.; Kuntz, F., 2005a. Detection of irradiated ingredients included in low quantity in non-irradiated food matrix. 1. Extraction and ESR analysis of bones from mechanically recovered poultry meat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (10): 3769-3773. http://dx.doi.org/10.1021/jf048101u

Marchioni, E.; Horvatovich, N.; Charon, H.; Kuntz, F., 2005b. Detection of irradiated ingredients included in low quantity in non-irradiated food matrix. 2. ESR analysis of mechanically recovered poultry meat and TL analysis of spices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53 (10): 3774-3778. http://dx.doi.org/10.1021/jf0481002

Marino, V.M.; Schadt, I.; Carpino, S.; Caccamo, M.; La Terra, S.; Guardiano, C.; Licitra, G., 2014. Effect of Sicilian pasture feeding management on content of alpha-tocopherol and beta-carotene in cow milk. *Journal of Dairy Science*, 97 (1): 543-551. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7005

Martin-Gomez, A.; Arroyo-Manzanares, N.; Rodriguez-Estevez, V.; Arce, L., 2019. Use of a non-destructive sampling method for characterization of Iberian cured ham breed and feeding regime using GC-IMS. *Meat Science*, 152: 146-154. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.018

Martin, B.; Graulet, B.; Uijttewaal, A.; Ferlay, A.; Coppa, M.; Rémond, D., 2019. Contribution of dairy products to dietary intakes and the influence of dairy cow forage. *Fourrages*, (239): 193-202.

Martin, I.; Garcia, T.; Fajardo, V.; Lopez-Calleja, I.; Rojas, M.; Hernandez, P.E.; Gonzalez, I.; Martin, R., 2007a. Mitochondrial markers for the detection of four duck species and the specific identification of Muscovy duck in meat mixtures using the polymerase chain reaction. *Meat Science*, 76 (4): 721-729. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.02.013

Martin, I.; Garcia, T.; Fajardo, V.; Lopez-Calleja, I.; Rojas, M.; Pavon, M.A.; Hernandez, P.E.; Gonzalez, I.; Martin, R., 2007b. Technical note: Detection of chicken, turkey, duck, and goose tissues in feedstuffs using species-specific polymerase chain reaction. *Journal of Animal Science*, 85 (2): 452-458. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2006-350

Martinelli, L.A.; Nardoto, G.B.; Chesson, L.A.; Rinaldi, F.D.; Ometto, J.P.H.B.; Cerling, T.E.; Ehleringer, J.R., 2011. Worldwide stable carbon and nitrogen isotopes of Big Mac (R) patties: An example of a truly "glocal" food. *Food Chemistry*, 127 (4): 1712-1718. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.046

Matsunaga, T.; Chikuni, K.; Tanabe, R.; Muroya, S.; Nakai, H.; Shibata, K.; Yamada, J.; Shinmura, Y., 1998. Determination of mitochondrial cytochrome B gene sequence for Red deer (Cervus elaphus) and the differentiation of closely related deer meats. *Meat Science*, 49 (4): 379-385. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(97)00145-9

Mayer, H.K.; Heidler, D.; Rockenbauer, C., 1997. Determination of the percentages of cows', ewes' and goats' milk in cheese by isoelectric focusing and cation-exchange HPLC of γ- and para-κ-caseins. *International Dairy Journal*, 7 (10): 619-628. http://dx.doi.org/10.1016/s0958-6946(97)00064-2

Meglia, G.E.; Jensen, S.K.; Lauridsen, C.; Waller, K.P., 2006. alpha-tocopherol concentration and stereoisomer composition in plasma and milk from dairy cows fed natural or synthetic vitamin E around calving. *Journal of Dairy Research*, 73 (2): 227-234. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029906001701

Meyer, R.; Hoffelein, C.; Candrian, U., 1995. Polymerase chain reaction restriction fragment length polymorphism analysis: A simple method for species identification in food. *Journal of Aoac International*, 78 (6): 1542-1551.

Mininni, A.N.; Pellizzari, C.; Cardazzo, B.; Carraro, L.; Balzan, S.; Novelli, E., 2009. Evaluation of real-time PCR assays for detection and quantification of fraudulent addition of bovine milk to caprine and ovine milk for cheese manufacture. *International Dairy Journal*, 19 (10): 617-623. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.04.003

Mitani, T.; Kobayashi, K.; Ueda, K.; Kondo, S., 2016. Discrimination of "grazing milk" using milk fatty acid profile in the grassland dairy area in Hokkaido. *Animal Science Journal*, 87 (2): 233-241. http://dx.doi.org/10.1111/asj.12422

Moatsou, G., 2010. Detection of Adulterations : identification of milk origin. *Handbook of Dairy Foods Analysis.* Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor and Francis Groups, 733-753. http://dx.doi.org/10.1201/ebk1439848173-38

Molkentin, J.; Lehmann, I.; Ostermeyer, U.; Rehbein, H., 2015. Traceability of organic fish - Authenticating the production origin of salmonids by chemical and isotopic analyses. *Food Control*, 53: 55-66. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.01.003

Molkentin, J.; Meisel, H.; Lehmann, I.; Rehbein, H., 2007. Identification of organically farmed Atlantic salmon by analysis of stable isotopes and fatty acids. *European Food Research and Technology*, 224 (5): 535-543. http://dx.doi.oorg/10.1007/s00217-006-0314-0

Moloney, A.P.; O'Riordan, E.G.; Schmidt, O.; Monahan, F.J., 2018. The fatty acid profile and stable isotope ratios of C and N of muscle from cattle that grazed grass or grass/clover pastures before slaughter and their discriminatory potential. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 57 (1): 84-94. http://dx.doi.org/10.1515/ijafr-2018-0009

Monahan, F.J.; Buckley, D.J.; Morrissey, P.A.; Lynch, P.B.; Gray, J.I., 1990. Effect of dietary α-tocopherol supplementation on α-tocopherol levels in porcine tissues and on susceptibility to lipid peroxidation. *Food Science and Nutrition*, 42 (4): 203-212. http://dx.doi.org/10.1080/09543465.1989.11904145

Monahan, F.J.; Schmidt, O.; Moloney, A.P., 2018. Meat provenance: Authentication of geographical origin and dietary background of meat. *Meat Science*, 144: 2-14. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.05.008

Monteiro, A.C.G.; Fontes, M.A.; Bessa, R.J.B.; Prates, J.A.M.; Lemos, J.P.C., 2012. Intramuscular lipids of Mertolenga-PDO beef, Mertolenga-PDO veal and "Vitela Tradicional do Montado"-PGI veal. *Food Chemistry*, 132 (3): 1486-1494. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.008

Montet, D.; Le Nguyen, D.D.; Leesing, R.; Goli, T.; Loiseau, G., 2009. Application of PCR-DGGE method in determining origin of fish: case studies of pangasius fish from Vietnam, tilapia from Thailand and sea bass from France. In: Montet, D.; Ray, R.C., eds. *Aquaculture microbiology and biotechnology*. Enfield: Science Publishers, 41-71.

Montgomery, J.; Evans, J.A.; Wildman, G., 2006. Sr-87/Sr-86 isotope composition of bottled British mineral waters for environmental and forensic purposes. *Applied Geochemistry*, 21 (10): 1626-1634. http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.07.002

Montiel-Sosa, J.F.; Ruiz-Pesini, E.; Montoya, J.; Roncales, P.; Lopez-Perez, M.J.; Perez-Martos, A., 2000. Direct and highly species-specific detection of pork meat and fat in meat products by PCR amplification of mitochondrial DNA. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48 (7): 2829-2832. http://dx.doi.org/10.1021/jf9907438

Montowska, M.; Alexander, M.R.; Tucker, G.A.; Barrett, D.A., 2014a. Rapid Detection of Peptide Markers for Authentication Purposes in Raw and Cooked Meat Using Ambient Liquid Extraction Surface Analysis Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 86 (20): 10257-10265. http://dx.doi.org/10.1021/ac502449w

Montowska, M.; Alexander, M.R.; Tucker, G.A.; Barrett, D.A., 2015. Authentication of processed meat products by peptidomic analysis using rapid ambient mass spectrometry. *Food Chemistry*, 187: 297-304. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.078

Montowska, M.; Pospiech, E., 2011a. Authenticity Determination of Meat and Meat Products on the Protein and DNA Basis. *Food Reviews International*, 27 (1): 84-100. http://dx.doi.org/10.1080/87559129.2010.518297

Montowska, M.; Pospiech, E., 2011b. Differences in two-dimensional gel electrophoresis patterns of skeletal muscle myosin light chain isoforms between Bos taurus, Sus scrofa and selected poultry species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91 (13): 2449-2456. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.4486

Montowska, M.; Pospiech, E., 2012a. Is Authentication of Regional and Traditional Food Made of Meat Possible? *Critical reviews in food science and nutrition*, 52 (6): 475-487. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2010.501408

Montowska, M.; Pospiech, E., 2012b. Myosin light chain isoforms retain their species-specific electrophoretic mobility after processing, which enables differentiation between six species: 2DE analysis of minced meat and meat products made from beef, pork and poultry. *Proteomics*, 12 (18): 2879-2889. http://dx.doi.org/10.1002/pmic.201200043

Montowska, M.; Rao, W.; Alexander, M.R.; Tucker, G.A.; Barrett, D.A., 2014b. Tryptic Digestion Coupled with Ambient Desorption Electrospray Ionization and Liquid Extraction Surface Analysis Mass Spectrometry Enabling Identification of Skeletal Muscle Proteins in Mixtures and Distinguishing between Beef, Pork, Horse, Chicken, and Turkey Meat. *Analytical Chemistry*, 86 (9): 4479-4487. http://dx.doi.org/10.1021/ac5003432

Morel, M., 1978. Catalogue électrophorétique des espèces de poissons - 1ère partie. *Science et Pêche*, 28: 2-9. https://archimer.ifremer.fr/doc/1978/publication-7144.pdf

Moreno-Rojas, J.M.; Vasta, V.; Lanza, A.; Luciano, G.; Ladroue, V.; Guillou, C.; Priolo, A., 2008. Stable isotopes to discriminate lambs fed herbage or concentrate both obtained from C(3) plants. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 22 (23): 3701-3705. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.3773

Moreno Rojas, J.M.; Serra, F.; Giani, I.; Moretti, V.M.; Reniero, F.; Guillou, C., 2007. The use of stable isotope ratio analyses to discriminate wild and farmed gilthead sea bream (Spares aurata). *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 21 (2): 207-211. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.2836

Morrison, D.J.; Preston, T.; Bron, J.E.; Hemderson, R.J.; Cooper, K.; Strachan, F.; Bell, J.G., 2007. Authenticating production origin of gilthead sea bream (Sparus aurata) by chemical and isotopic fingerprinting. *Lipids*, 42 (6): 537-545. http://dx.doi.org/10.1007/s11745-007-3055-3

Muller, L.; Bartak, P.; Bednar, P.; Frysova, I.; Sevcik, J.; Lemr, K., 2008. Capillary electrophoresis-mass spectrometry - a fast and reliable tool for the monitoring of milk adulteration. *Electrophoresis*, 29 (10): 2088-2093. http://dx.doi.org/10.1002/elps.200700794

Murugaiah, C.; Noor, Z.M.; Mastakim, M.; Bilung, L.M.; Selamat, J.; Radu, S., 2009. Meat species identification and Halal authentication analysis using mitochondrial DNA. *Meat Science*, 83 (1): 57-61. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.03.015

Nader, W.F.; Brendel, T.; Schubbert, R., 2016. Advances in DNA Fingerprinting for Food Authenticity Testing. In: Downey, G., ed. *Advances in Food Authenticity Testing*. Cambridge: Woodhead Publ Ltd (Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition), 7-33. http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-100220-9.00002-3

Nakashita, R.; Suzuki, Y.; Akamatsu, F.; Iizumi, Y.; Korenaga, T.; Chikaraishi, Y., 2008. Stable carbon, nitrogen, and oxygen isotope analysis as a potential tool for verifying geographical origin of beef. *Analytica Chimica Acta*, 617 (1-2): 148-152. http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2008.03.048

Nixon, G.J.; Wilkes, T.M.; Burns, M.J., 2015. Development of a real-time PCR approach for the relative quantitation of horse DNA. *Analytical Methods*, 7 (20): 8590-8596. http://dx.doi.org/10.1039/c5ay01867f

Noci, F.; Monahan, F.J.; French, P.; Moloney, A.P., 2005. The fatty acid composition of muscle fat and subcutaneous adipose tissue of pasture-fed beef heifers: Influence of the duration of grazing. *Journal of Animal Science*, 83 (5): 1167-1178.

Noziere, P.; Graulet, B.; Lucas, A.; Martin, B.; Grolier, P.; Doreau, M., 2006. Carotenoids for ruminants: From forages to dairy products. *Animal Feed Science and Technology*, 131 (3-4): 418-450. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.018

Nurnberg, K.; Wegner, J.; Ender, K., 1998. Factors influencing fat composition in muscle and adipose tissue of farm animals. *Livestock Production Science*, 56 (2): 145-156. http://dx.doi.org/10.1016/s0301-6226(98)00188-2

Nys, Y., 2000. Dietary carotenoids and egg yolk coloration - a review. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 64 (2): 45-54.

Nys, Y.; Jondreville, C.; Chemaly, M.; Roudaut, B., 2018. Qualités des œufs de consommation. In: Berthelot Valérie (coord.), ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui) Partie 2 - Déterminants alimentaires et non alimentaires en élevage de la qualité des produits (Chapitre 9), 316-333.

Oliveira, G.B.; Alewijn, M.; Boerrigter-Eenling, R.; van Ruth, S.M., 2015. Compositional Signatures of Conventional, Free Range, and Organic Pork Meat Using Fingerprint Techniques. *Foods*, 4 (3): 359-375. http://dx.doi.org/10.3390/foods4030359

Olsen, S.A.; Hansen, P.K.; Givskud, H.; Ervik, A.; Samuelsen, O.B., 2015. Changes in fatty acid composition and stable isotope signature of Atlantic cod (Gadus morhua) in response to laboratory dietary shifts. *Aquaculture*, 435: 277-285. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.039

Osorio, M.T.; Moloney, A.P.; Brennan, L.; Monahan, F.J., 2012. Authentication of beef production systems using a metabolomic-based approach. *Animal*, 6 (1): 167-172. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731111001418

Osorio, M.T.; Moloney, A.P.; Schmidt, O.; Monahan, F.J., 2011a. Beef Authentication and Retrospective Dietary Verification Using Stable Isotope Ratio Analysis of Bovine Muscle and Tail Hair. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (7): 3295-3305. http://dx.doi.org/10.1021/jf1040959

Osorio, M.T.; Moloney, A.P.; Schmidt, O.; Monahan, F.J., 2011b. Multielement Isotope Analysis of Bovine Muscle for Determination of International Geographical Origin of Meat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (7): 3285-3294. http://dx.doi.org/10.1021/jf1040433

Ottavian, M.; Facco, P.; Fasolato, L.; Novelli, E.; Mirisola, M.; Perini, M.; Barolo, M., 2012. Use of Near-Infrared Spectroscopy for Fast Fraud Detection in Seafood: Application to the Authentication of Wild European Sea Bass (Dicentrarchus labrax). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (2): 639-648. http://dx.doi.org/10.1021/jf203385e

Pascoal, A.; Prado, M.; Castro, J.; Cepeda, A.; Barros-Velazquez, J., 2004. Survey of authenticity of meat species in food products subjected to different technological processes, by means of PCR-RFLP analysis. *European Food Research and Technology*, 218 (3): 306-312. http://dx.doi.org/10.1007/s00217-003-0846-5

Pegels, N.; Garcia, T.; Martin, R.; Gonzalez, I., 2015. Market Analysis of Food and Feed Products for Detection of Horse DNA by a TaqMan Real-Time PCR. *Food Analytical Methods*, 8 (2): 489-498. http://dx.doi.org/10.1007/s12161-014-9914-7

Pegels, N.; Gonzalez, I.; Lopez-Calleja, I.; Fernandez, S.; Garcia, T.; Martin, R., 2012. Evaluation of a TaqMan real-time PCR assay for detection of chicken, turkey, duck, and goose material in highly processed industrial feed samples. *Poultry Science*, 91 (7): 1709-1719. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2011-01954

Pegels, N.; Lopez-Calleja, I.; Garcia, T.; Martin, R.; Gonzalez, I., 2013. Detection of rabbit and hare processed material in compound feeds by TaqMan real-time PCR. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 30 (5): 771-779. http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2013.794978

Perini, M.; Camin, F.; Bontempo, L.; Rossmann, A.; Piasentier, E., 2009. Multielement (H, C, N, O, S) stable isotope characteristics of lamb meat from different Italian regions. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 23 (16): 2573-2585. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.4140

Pfeiffer, I.; Burger, J.; Brenig, B., 2004. Diagnostic polymorphisms in the mitochondrial cytochrome b gene allow discrimination between cattle, sheep, goat, roe buck and deer by PCR-RFLP. *Bmc Genetics*, 5. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2156-5-30

Piasentier, E.; Valusso, R.; Camin, F.; Versini, G., 2003. Stable isotope ratio analysis for authentication of lamb meat. *Meat Science*, 64 (3): 239-247. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(02)00183-3

Piotrowski, C.; Garcia, R.; Garrido-Varo, A.; Pérez-Marín, D.; Riccioli, C.; Fearn, T., 2019. Short Communication: The potential of portable near infrared spectroscopy for assuring quality and authenticity in the food chain, using Iberian hams as an example. *Animal*, 13 (12): 3018-3021. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731119002003

Poonia, A.; Jha, A.; Sharma, R.; Singh, H.B.; Rai, A.K.; Sharma, N., 2017. Detection of adulteration in milk: A review. *International Journal of Dairy Technology*, 70 (1): 23-42. http://dx.doi.org/10.1111/1471-0307.12274

Prache, S.; Huang, Y.; Andueza, D., 2018. To what extent is a breed-specific database necessary to differentiate meat from pasture-fed and stall-fed lambs using visible spectroscopy? *Animal*, 12 (8): 1682-1689. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731117003366

Prache, S.; Kondjoyan, N.; Delfosse, O.; Chauveau-Duriot, B.; Andueza, D.; Cornu, A., 2009. Discrimination of pasture-fed lambs from lambs fed dehydrated alfalfa indoors using different compounds measured in the fat, meat and plasma. *Animal*, 3 (4): 598-605. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731108003881

Prache, S.; Martin, B.; Noziere, P.; Engel, E.; Besle, J.M.; Ferlay, A.; Micol, D.; Cornu, A.; Cassar-Malek, I.; Andueza, D., 2007. Diet authentication in ruminants from the composition of their products and tissues. *Productions Animales*, 20 (4): 295-307.

Prache, S.; Priolo, A.; Grolier, P., 2003a. Effect of concentrate finishing on the carotenoid content of perirenal fat in grazing sheep: its significance for discriminating grass-fed, concentrate-fed and concentrate-finished grazing lambs. *Animal Science*, 77: 225-233. http://dx.doi.org/10.1017/S1357729800058963

Prache, S.; Priolo, A.; Grolier, P., 2003b. Persistence of carotenoid pigments in the blood of concentrate-finished grazing sheep: Its significance for the traceability of grass-feeding. *Journal of Animal Science*, 81 (2): 360-367. http://dx.doi.org/10.2527/2003.812360x

Prache, S.; Theriez, M., 1999. Traceability of lamb production systems: carotenoids in plasma and adipose tissue. *Animal Science*, 69: 29-36. http://dx.doi.org/10.1017/s1357729800051067

Prieto, N.; Juarez, M.; Larsen, I.L.; Lopez-Campos, O.; Zijlstra, R.T.; Aalhus, J.L., 2015. Rapid discrimination of enhanced quality pork by visible and near infrared spectroscopy. *Meat Science*, 110: 76-84. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.07.006

Prieto, N.; Pawluczyk, O.; Dugan, M.E.R.; Aalhus, J.L., 2017. A Review of the Principles and Applications of Near-Infrared Spectroscopy to Characterize Meat, Fat, and Meat Products. *Applied Spectroscopy*, 71 (7): 1403-1426. http://dx.doi.org/10.1177/0003702817709299

Primrose, S.; Woolfe, M.; Rollinson, S., 2010. Food forensics: methods for determining the authenticity of foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 21 (12): 582-590. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2010.09.006

Priolo, A.; Cornu, A.; Prache, S.; Krogmann, M.; Kondjoyan, N.; Micol, D.; Berdague, J.L., 2004. Fat volatiles tracers of grass feeding in sheep. *Meat Science*, 66 (2): 475-481. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00136-0

Puertas, G.; Vázquez, M., 2020. UV-VIS-NIR spectroscopy and artificial neural networks for the cholesterol quantification in egg yolk. *Journal of Food Composition and Analysis*, 86: 103350. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103350

Pustjens, A.M.; Boerrigter-Eenling, R.; Koot, A.H.; Rozijn, M.; van Ruth, S.M., 2017. Characterization of Retail Conventional, Organic, and Grass Full-Fat Butters by Their Fat Contents, Free Fatty Acid Contents, and Triglyceride and Fatty Acid Profiling. *Foods*, 6 (4). http://dx.doi.org/10.3390/foods6040026

Quinto, C.A.; Tinoco, R.; Hellberg, R.S., 2016. DNA barcoding reveals mislabeling of game meat species on the US commercial market. *Food Control*, 59: 386-392. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.043

Rahman, M.M.; Ali, M.E.; Abd Hamid, S.B.; Bhassu, S.; Mustafa, S.; Al Amin, M.; Razzak, M.A., 2015. Lab-on-a-Chip PCR-RFLP Assay for the Detection of Canine DNA in Burger Formulations. *Food Analytical Methods*, 8 (6): 1598-1606. http://dx.doi.org/10.1007/s12161-015-0090-1

Rahmania, H.; Sudjadi; Rohman, A., 2015. The employment of FTIR spectroscopy in combination with chemometrics for analysis of rat meat in meatball formulation. *Meat Science*, 100: 301-305. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.10.028

Rahmati, S.; Julkapli, N.M.; Yehye, W.A.; Basirun, W.J., 2016. Identification of meat origin in food products-A review. *Food Control*, 68: 379-390. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.04.013

Ratel, J.; Engel, E., 2009. Determination of benzenic and halogenated volatile organic compounds in animal-derived food products by one-dimensional and comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1216 (45): 7889-7898. http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2009.09.012

Rea, S.; Chikuni, K.; Branciari, R.; Sangamayya, R.S.; Ranucci, D.; Avellini, P., 2001. Use of duplex polymerase chain reaction (duplex-PCR) technique to identify bovine and water buffalo milk used in making mozzarella cheese. *Journal of Dairy Research*, 68 (4): 689-698. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029901005106

Reale, S.; Campanella, A.; Merigioli, A.; Pilla, F., 2008. A novel method for species identification in milk and milk-based products. *Journal of Dairy Research*, 75 (1): 107-112. http://dx.doi.org/10.1017/s0022029907003020

Rees, G.; Kelly, S.D.; Cairns, P.; Ueckermann, H.; Hoelzl, S.; Rossmann, A.; Scotter, M.J., 2016. Verifying the geographical origin of poultry: The application of stable isotope and trace element (SITE) analysis. *Food Control*, 67: 144-154. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.02.018

Ren, Y.F.; Li, X.; Liu, Y.M.; Yang, L.T.; Cai, Y.C.; Quan, S.; Pan, L.W.; Chen, S.S., 2017. A novel quantitative real-time PCR method for identification and quantification of mammalian and poultry species in foods. *Food Control*, 76: 42-51. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.01.003

Renna, M.; Lussiana, C.; Cornale, P.; Fortina, R.; Mimosi, A., 2012. Changes in goat milk fatty acids during abrupt transition from indoor to pasture diet. *Small Ruminant Research*, 108 (1-3): 12-21. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2012.06.007

Renou, J.P.; Bielicki, G.; Deponge, C.; Gachon, P.; Micol, D.; Ritz, P., 2004a. Characterization of animal products according to geographic origin and feeding diet using nuclear magnetic resonance and isotope ratio mass spectrometry. Part II: Beef meat. *Food Chemistry*, 86 (2): 251-256. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.08.021

Renou, J.P.; Deponge, C.; Gachon, P.; Bonnefoy, J.C.; Coulon, J.B.; Garel, J.P.; Verite, R.; Ritz, P., 2004b. Characterization of animal products according to geographic origin and feeding diet using nuclear magnetic resonance and isotope ratio mass spectrometry: cow milk. *Food Chemistry*, 85 (1): 63-66. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.06.003

Restaino, E.; Fassio, A.; Cozzolino, D., 2011. Discrimination of meat pates according to the animal species by means of near infrared spectroscopy and chemometrics. *Cyta-Journal of Food*, 9 (3): 210-213. http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2010.512396

Reynaud, A.; Fraisse, D.; Cornu, A.; Farruggia, A.; Pujos-Guillot, E.; Besle, J.M.; Martin, B.; Lamaison, J.L.; Paquet, D.; Doreau, M.; Graulet, B., 2010. Variation in Content and Composition of Phenolic Compounds in Permanent Pastures According to Botanical Variation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58 (9): 5485-5494. http://dx.doi.org/10.1021/jf1000293

Rhodes, C.N.; Lofthouse, J.H.; Hird, S.; Rose, P.; Reece, P.; Christy, J.; Macarthur, R.; Brereton, P.A., 2010. The use of stable carbon isotopes to authenticate claims that poultry have been corn-fed. *Food Chemistry*, 118 (4): 927-932. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.113

Ribani, A.; Schiavo, G.; Utzeri, V.J.; Bertolini, F.; Geraci, C.; Bovo, S.; Fontanesi, L., 2018. Application of next generation semiconductor based sequencing for species identification and analysis of within-species mitotypes useful for authentication of meat derived products. *Food Control*, 91: 58-67. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.03.034

Richter, E.K.; Spangenberg, J.E.; Willems, H.; Kreuzer, M.; Leiber, F., 2012. Stable carbon isotope composition of perirenal adipose tissue fatty acids from Engadine sheep grazing either mountain or lowland pasture. *Journal of Animal Science*, 90 (3): 905-913. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2011-4284

Ripoll, G.; Lobon, S.; Joy, M., 2018. Use of visible and near infrared reflectance spectra to predict lipid peroxidation of light lamb meat and discriminate dam's feeding systems. *Meat Science*, 143: 24-29. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.006

Ripp, F.; Krombholz, C.F.; Liu, Y.; Weber, M.; Schafer, A.; Schmidt, B.; Koppel, R.; Hankeln, T., 2014. All-Food-Seq (AFS): a quantifiable screen for species in biological samples by deep DNA sequencing. *Bmc Genomics*, 15. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2164-15-639

Rivaroli, D.; Prunier, A.; Meteau, K.; do Prado, I.N.; Prache, S., 2019. Tannin-rich sainfoin pellet supplementation reduces fat volatile indoles content and delays digestive parasitism in lambs grazing alfalfa. *Animal*, 13 (9): 1883-1890. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118003543

Rodriguez, M.A.; Garcia, T.; Gonzalez, I.; Asensio, L.; Hernandez, P.E.; Martin, R., 2003a. Qualitative PCR for the detection of chicken and pork adulteration in goose and mule duck foie gras. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83 (11): 1176-1181. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1527

Rodriguez, M.A.; Garcia, T.; Gonzalez, I.; Asensio, L.; Hernandez, P.E.; Martin, R., 2004. Quantitation of mule duck in goose foie gras using TaqMan real-time polymerase chain reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 (6): 1478-1483. http://dx.doi.org/10.1021/jf035240n

Rodriguez, M.A.; Garcia, T.; Gonzalez, I.; Asensio, L.; Mayoral, B.; Lopez-Calleja, I.; Hernandez, P.E.; Martin, R., 2003b. Identification of goose, mule duck, chicken, turkey, and swine in foie gras by species-specific polymerase chain reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51 (6): 1524-1529. http://dx.doi.org/10.1021/jf025784+

Rodriguez, M.A.; Garcia, T.; Gonzalez, I.; Hernandez, P.E.; Martin, R., 2005. TaqMan real-time PCR for the detection and quantitation of pork in meat mixtures. *Meat Science*, 70 (1): 113-120. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.12.005

Rogers, K.M., 2009. Stable Isotopes as a Tool To Differentiate Eggs Laid by Caged, Barn, Free Range, and Organic Hens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57 (10): 4236-4242. http://dx.doi.org/10.1021/jf803760s

Rohman, A.; Sismindari; Erwanto, Y.; Man, Y.B.C., 2011. Analysis of pork adulteration in beef meatball using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Meat Science*, 88 (1): 91-95. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.007

Rohrle, F.T.; Moloney, A.P.; Black, A.; Osorio, M.T.; Sweeney, T.; Schmidt, O.; Monahan, F.J., 2011a. alpha-Tocopherol stereoisomers in beef as an indicator of vitamin E supplementation in cattle diets. *Food Chemistry*, 124 (3): 935-940. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.023

Rohrle, F.T.; Moloney, A.P.; Osorio, M.T.; Luciano, G.; Priolo, A.; Caplan, P.; Monahan, F.J., 2011b. Carotenoid, colour and reflectance measurements in bovine adipose tissue to discriminate between beef from different feeding systems. *Meat Science*, 88 (3): 347-353. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.01.005

Rojas, M.; Gonzalez, I.; Fajardo, V.; Martin, I.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2008. Polymerase Chain Reaction-Restriction Fragment Length Polymorphism Authentication of Raw Meats from Game Birds. *Journal of Aoac International*, 91 (6): 1416-1422.

Rojas, M.; Gonzalez, I.; Fajardo, V.; Martin, I.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2009. Identification of raw and heat-processed meats from game bird species by polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism of the mitochondrial D-loop region. *Poultry Science*, 88 (3): 669-679. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2008-00261

Rojas, M.; Gonzalez, I.; Pavon, M.A.; Pegels, N.; Hernandez, P.E.; Garcia, T.; Martin, R., 2011. Development of a real-time PCR assay to control the illegal trade of meat from protected capercaillie species (Tetrao urogallus). *Forensic Science International*, 210 (1-3): 133-138. http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.021

Romero, C.; PerezAndujar, O.; Olmedo, A.; Jimenez, S., 1996. Detection of cow's milk in ewe's or goat's milk by HPLC. *Chromatographia*, 42 (3-4): 181-184. http://dx.doi.org/10.1007/bf02269650

Rossmann, A.; Haberhauer, G.; Holzl, S.; Horn, P.; Pichlmayer, F.; Voerkelius, S., 2000. The potential of multielement stable isotope analysis for regional origin assignment of butter. *European Food Research and Technology*, 211 (1): 32-40. http://dx.doi.org/10.1007/s002170050585

Rossmann, A.; Schlicht, C., 2007. Stable isotope analysis for origin assignment of animal products. *Fleischwirtschaft*, 87 (8): 104-109.

Rouge, P.; Cornu, A.; Biesse-Martin, A.S.; Lyan, B.; Rochut, N.; Graulet, B., 2013. Identification of quinoline, carboline and glycinamide compounds in cow milk using HRMS and NMR. *Food Chemistry*, 141 (3): 1888-1894. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.072

Rozanski, K.; Araguasaraguas, L.; Gonfiantini, R., 1992. Relation between long-term trends of o-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, 258 (5084): 981-985. http://dx.doi.org/10.1126/science.258.5084.981

Rummel, S.; Dekant, C.H.; Holzl, S.; Kelly, S.D.; Baxter, M.; Marigheto, N.; Quetel, C.R.; Larcher, R.; Nicolini, G.; Froschl, H.; Ueckermann, H.; Hoogewerff, J., 2012. Sr isotope measurements in beef-analytical challenge and first results. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 402 (9): 2837-2848. http://dx.doi.org/10.1007/s00216-012-5759-3

Safdar, M.; Abasiyanik, M.F., 2013. Development of fast multiplex real-time PCR assays based on EvaGreen fluorescence dye for identification of beef and soybean origins in processed sausages. *Food Research International*, 54 (2): 1652-1656. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.09.013

Sanchez-Pena, C.M.; Luna, G.; Garcia-Gonzalez, D.L.; Aparicio, R., 2005. Characterization of French and Spanish dry-cured hams: influence of the volatiles from the muscles and the subcutaneous fat quantified by SPME-GC. *Meat Science*, 69 (4): 635-645. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2004.10.015

Santos, C.G.; Melo, V.S.; Amaral, J.S.; Estevinho, L.; Oliveira, M.B.P.P.; Mafra, I., 2012. Identification of hare meat by a species-specific marker of mitochondrial origin. *Meat Science*, 90 (3): 836-841. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.10.018

Saull, J.; Duggan, C.; Hobbs, G.; Edwards, T., 2016. The detection of Atlantic cod (Gadus morhua) using loop mediated isothermal amplification in conjunction with a simplified DNA extraction process. *Food Control*, 59: 306-313. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.038

Schmidt, O.; Quilter, J.M.; Bahar, B.; Moloney, A.P.; Scrimgeour, C.M.; Begley, I.S.; Monahan, F.J., 2005. Inferring the origin and dietary history of beef from C, N and S stable isotope ratio analysis. *Food Chemistry*, 91 (3): 545-549. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.036

Schmutzler, M.; Beganovic, A.; Bohler, G.; Huck, C.W., 2015. Methods for detection of pork adulteration in veal product based on FT-NIR spectroscopy for laboratory, industrial and on-site analysis. *Food Control*, 57: 258-267. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.04.019

Schnyder, H.; Schwertl, M.; Auerswald, K.; Schaufele, R., 2006. Hair of grazing cattle provides an integrated measure of the effects of site conditions and interannual weather variability on delta C-13 of temperate humid grassland. *Global Change Biology*, 12 (7): 1315-1329. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01169.x

Schwendel, B.H.; Wester, T.J.; Morel, P.C.H.; Fong, B.; Tavendale, M.H.; Deadman, C.; Shadbolt, N.M.; Otter, D.E., 2017. Pasture feeding conventional cows removes differences between organic and conventionally produced milk. *Food Chemistry*, 229: 805-813. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.104

Schwertl, M.; Auerswald, K.; Schaufele, R.; Schnyder, H., 2005. Carbon and nitrogen stable isotope composition of cattle hair: ecological fingerprints of production systems? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 109 (1-2): 153-165. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.01.015

Seckin, A.K.; Yilmaz, B.; Tosun, H., 2017. Real-time PCR is a potential tool to determine the origin of milk used in cheese production. *Lwt-Food Science and Technology*, 77: 332-336. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.065

Segato, S.; Galaverna, G.; Contiero, B.; Berzaghi, P.; Caligiani, A.; Marseglia, A.; Cozzi, G., 2017. Identification of Lipid Biomarkers To Discriminate between the Different Production Systems for Asiago PDO Cheese. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (45): 9888-9893. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03629

Sentandreu, M.A.; Fraser, P.D.; Halket, J.; Patel, R.; Bramley, P.M., 2010. A Proteomic-Based Approach for Detection of Chicken in Meat Mixes. *Journal of Proteome Research*, 9 (7): 3374-3383. http://dx.doi.org/10.1021/pr9008942

Sentandreu, M.A.; Sentandreu, E., 2014. Authenticity of meat products: Tools against fraud. *Food Research International*, 60: 19-29. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.03.030

Serrano, E.; Cornu, A.; Kondjoyan, N.; Agabriel, J.; Micol, D., 2011. Traceability of grass feeding in beef: terpenes, 2,3-octanedione and skatole accumulation in adipose tissue of young bulls. *Animal*, 5 (4): 641-649. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731110002296

Serrano, E.; Cornu, A.; Kondjoyan, N.; Figueredo, G.; Agabriel, J.; Micol, D., 2007a. Terpene accumulation in muscle and fatty tissues of calves supplemented with essential oils. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 16 (2): 168-179. http://dx.doi.org/10.22358/jafs/66736/2007

Serrano, E.; Prache, S.; Chauveau-Duriot, B.; Agabriel, J.; Micol, D., 2006. Traceability of grass-feeding in young beef using carotenoid pigments in plasma and adipose tissue. *Animal Science*, 82: 909-918. http://dx.doi.org/10.1017/asc200698

Serrano, R.; Blanes, M.A.; Orero, L., 2007b. Stable isotope determination in wild and farmed gilthead sea bream (Sparus aurata) tissues from the western Mediterranean. *Chemosphere*, 69 (7): 1075-1080. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.04.034

Sharma, P.; Kumar, V.; Sinha, A.K.; Ranjan, J.; Kithsiri, H.M.P.; Venkateshwarlu, G., 2010. Comparative fatty acid profiles of wild and farmed tropical freshwater fish rohu (Labeo rohita). *Fish Physiology and Biochemistry*, 36 (3): 411-417. http://dx.doi.org/10.1007/s10695-009-9309-7

Shibata, M.; Matsumoto, K.; Oe, M.; Ohnishi-Kameyama, M.; Ojima, K.; Nakajima, I.; Muroya, S.; Chikuni, K., 2009. Differential expression of the skeletal muscle proteome in grazed cattle. *Journal of Animal Science*, 87 (8): 2700-2708. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1486

Shingfield, K.J.; Bonnet, M.; Scollan, N.D., 2013. Recent developments in altering the fatty acid composition of ruminant-derived foods. *Animal*, 7: 132-162. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731112001681

Shintu, L.; Caldarelli, S.; Franke, B.M., 2007. Pre-selection of potential molecular markers for the geographic origin of dried beef by HR-MAS NMR spectroscopy. *Meat Science*, 76 (4): 700-707. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.02.010

Simat, V.; Bogdanovic, T.; Krzelj, M.; Soldo, A.; Marsic-Lucic, J., 2012. Differences in chemical, physical and sensory properties during shelf life assessment of wild and farmed gilthead sea bream (Sparus aurata, L.). *Journal of Applied Ichthyology*, 28 (1): 95-101. http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0426.2011.01883.x

Simoniova, A.; Rohlik, B.A.; Skorpilova, T.; Petrova, M.; Pipek, P., 2013. Differentiation Between Fresh and Thawed Chicken Meats. *Czech Journal of Food Sciences*, 31 (2): 108-115.

Slots, T.; Butler, G.; Leifert, C.; Kristensen, T.; Skibsted, L.H.; Nielsen, J.H., 2009. Potentials to differentiate milk composition by different feeding strategies. *Journal of Dairy Science*, 92 (5): 2057-2066. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1392

Smith, B.N.; Epstein, S., 1971. 2 categories of c-13/c-12 ratios for higher plants. *Plant Physiology*, 47 (3): 380-384. http://dx.doi.org/10.1104/pp.47.3.380

Soares, S.; Amaral, J.S.; Oliveira, M.B.P.P.; Mafra, I., 2013. A SYBR Green real-time PCR assay to detect and quantify pork meat in processed poultry meat products. *Meat Science*, 94 (1): 115-120. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.12.012

Song, H.X.; Xue, H.Y.; Han, Y., 2011. Detection of cow's milk in Shaanxi goat's milk with an ELISA assay. *Food Control*, 22 (6): 883-887. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.11.019

Sousa, N.; Moreira, M.J.; Saraiva, C.; de Almeida, J.M.M.M., 2018. Applying Fourier Transform Mid Infrared Spectroscopy to Detect the Adulteration of Salmo salar with Oncorhynchus mykiss. *Foods*, 7 (4). http://dx.doi.org/10.3390/foods7040055

Stamoulis, P.; Stamatis, C.; Sarafidou, T.; Mamuris, Z., 2010. Development and application of molecular markers for poultry meat identification in food chain. *Food Control*, 21 (7): 1061-1065. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2009.12.027

Steinhilber, A.E.; Schmidt, F.F.; Naboulsi, W.; Planatscher, H.; Niedzwiecka, A.; Zagon, J.; Braeuning, A.; Lampen, A.; Joos, T.O.; Poetz, O., 2018. Species Differentiation and Quantification of Processed Animal Proteins and Blood Products in Fish

Feed Using an 8-Plex Mass Spectrometry-Based Immunoassay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66 (39): 10327-10335. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03934

Stergiadis, S.; Leifert, C.; Seal, C.J.; Eyre, M.D.; Larsen, M.K.; Slots, T.; Nielsen, J.H.; Butler, G., 2015. A 2-year study on milk quality from three pasture-based dairy systems of contrasting production intensities in Wales. *Journal of Agricultural Science*, 153 (4): 708-731. http://dx.doi.org/10.1017/s0021859614000963

Stergiadis, S.; Leifert, C.; Seal, C.J.; Eyre, M.D.; Nielsen, J.H.; Larsen, M.K.; Slots, T.; Steinshamn, H.; Butler, G., 2012. Effect of Feeding Intensity and Milking System on Nutritionally Relevant Milk Components in Dairy Farming Systems in the North East of England. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (29): 7270-7281. http://dx.doi.org/10.1021/jf301053b

Sun, S.M.; Guo, B.L.; Wei, Y.M.; Fan, M.T., 2012. Classification of geographical origins and prediction of delta C-13 and delta N-15 values of lamb meat by near infrared reflectance spectroscopy. *Food Chemistry*, 135 (2): 508-514. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.05.004

Sweeney, T.; Lejeune, A.; Moloney, A.P.; Monahan, F.J.; Mc Gettigan, P.; Downey, G.; Park, S.D.E.; Ryan, M.T., 2016. The application of transcriptomic data in the authentication of beef derived from contrasting production systems. *Bmc Genomics*, 17. http://dx.doi.org/10.1186/s12864-016-2851-7

Taboada, L.; Sanchez, A.; Perez-Martin, R.I.; Sotelo, C.G., 2017. A new method for the rapid detection of Atlantic cod (Gadus morhua), Pacific cod (Gadus macrocephalus), Alaska pollock (Gadus chalcogrammus) and ling (Molva molva) using a lateral flow dipstick assay. *Food Chemistry*, 233: 182-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.087

Taboada, L.; Sanchez, A.; Velasco, A.; Santaclara, F.J.; Perez-Martin, R.I.; Sotelo, C.G., 2014. Identification of Atlantic Cod (Gadus morhua), Ling (Molva molva), and Alaska Pollock (Gadus chalcogrammus) by PCR-ELISA Using Duplex PCR. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62 (24): 5699-5706. http://dx.doi.org/10.1021/jf500173j

Tamime, A.Y.; Barclay, M.N.I.; Law, A.J.R.; Leaver, J.; Anifantakis, E.M.; O'Connor, T.P., 1999. Kishk - a dried fermented milk cereal mixture. 2 Assessment of a variety of protein analytical techniques for determining adulteration and proteolysis. *Lait*, 79 (3): 331-339. http://dx.doi.org/10.1051/lait:1999328

Taylor, M.I.; Fox, C.; Rico, I.; Rico, C., 2002. Species-specific TaqMan probes for simultaneous identification of (Gadus morhua L.), haddock (Melanogrammus aeglefinus L.) and whiting (Merlangius merlangus L.). *Molecular Ecology Notes*, 2 (4): 599-601. http://dx.doi/org/10.1046/j.1471-8286.2002.00269.x

Tewfik, I., 2008. A rapid direct solvent extraction method for the extraction of cyclobutanones from irradiated chicken and liquid whole egg. *International Journal of Food Science and Technology*, 43 (1): 108-113. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01399.x

Thomas, F.; Jamin, E.; Wietzerbin, K.; Guerin, R.; Lees, M.; Morvan, E.; Billault, I.; Derrien, S.; Rojas, J.M.; Serra, F.; Guillou, C.; Aursand, M.; McEvoy, L.; Prael, A.; Robins, R.J., 2008. Determination of origin of Atlantic salmon (Salmo salar): The use of multiprobe and multielement isotopic analyses in combination with fatty acid composition to assess wild or farmed origin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (3): 989-997. http://dx.doi.org/10.1021/jf072370d

Tillmar, A.O.; Dell'Amico, B.; Welander, J.; Holmlund, G., 2013. A Universal Method for Species Identification of Mammals Utilizing Next Generation Sequencing for the Analysis of DNA Mixtures. *Plos One*, 8 (12). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0083761

Tomas, C.; Ferreira, I.M.P.L.V.O.; Faria, M.A., 2017. Codfish authentication by a fast Short Amplicon High Resolution Melting Analysis (SA-HRMA) method. *Food Control*, 71: 255-263. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.004

Tornambe, G.; Cornu, A.; Pradel, P.; Kondjoyan, N.; Carnat, A.P.; Petit, M.; Martin, B., 2006. Changes in terpene content in milk from pasture-fed cows. *Journal of Dairy Science*, 89 (6): 2309-2319. http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72302-5

Tres, A.; O'Neill, R.; van Ruth, S.M., 2011. Fingerprinting of fatty acid composition for the verification of the identity of organic eggs. *Lipid Technology*, 23 (2): 40-42. http://dx.doi.org/10.1002/lite.201100084

Ulrich, S.; Beindorf, P.M.; Biermaier, B.; Schwaiger, K.; Gareis, M.; Gottschalk, C., 2017. A novel approach for the determination of freshness and identity of trouts by MALDI-TOF mass spectrometry. *Food Control*, 80: 281-289. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.05.005

Valdivielso, I.; de Renobales, M.; Aldai, N.; Barron, L.J.R., 2017. Changes in terpenoid composition of milk and cheese from commercial sheep flocks associated with seasonal feeding regimens throughout lactation. *Journal of Dairy Science*, 100 (1): 96-105. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2016-11761

Valenti, B.; Biondi, L.; Campidonico, L.; Bontempo, L.; Luciano, G.; Di Paola, F.; Copani, V.; Ziller, L.; Camin, F., 2017. Changes in stable isotope ratios in PDO cheese related to the area of production and green forage availability. The case study of Pecorino Siciliano. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 31 (9): 737-744. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.7840

Valenti, B.; Martin, B.; Andueza, D.; Leroux, C.; Labonne, C.; Lahalle, F.; Larroque, H.; Brunschwig, P.; Lecomte, C.; Brochard, M.; Ferlay, A., 2013. Infrared spectroscopic methods for the discrimination of cows' milk according to the feeding system, cow breed and altitude of the dairy farm. *International Dairy Journal*, 32 (1): 26-32. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.02.014

Vallejo-Cordoba, B.; Cota-Rivas, M., 1998. Meat species identification by linear discriminant analysis of capillary electrophoresis protein profiles. *Journal of Capillary Electrophoresis*, 5 (5-6): 171-175.

Vallejo-Cordoba, B.; Rodriguez-Ramirez, R.; Gonzalez-Cordova, A.F., 2010. Capillary electrophoresis for bovine and ostrich meat characterisation. *Food Chemistry*, 120 (1): 304-307. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.09.080

van Ruth, S.; Alewijn, M.; Rogers, K.; Newton-Smith, E.; Tena, N.; Bollen, M.; Koot, A., 2011. Authentication of organic and conventional eggs by carotenoid profiling. *Food Chemistry*, 126 (3): 1299-1305. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.081

van Ruth, S.M.; Koot, A.H.; Brouwer, S.E.; Boivin, N.; Carcea, M.; Zerva, C.N.; Haugen, J.E.; Hohl, A.; Koroglu, D.; Mafra, I.; Rom, S., 2013. Eggspectation: organic egg authentication method challenged with produce from ten different countries. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 5 (1): 7-14. http://dx.doi.org/10.3920/qas2012.0114

Vasta, V.; Luciano, G.; Dimauro, C.; Rohrle, F.; Priolo, A.; Monahan, F.J.; Moloney, A.P., 2011. The volatile profile of longissimus dorsi muscle of heifers fed pasture, pasture silage or cereal concentrate: Implication for dietary discrimination. *Meat Science*, 87 (3): 282-289. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.11.003

Vasta, V.; Priolo, A., 2006. Ruminant fat volatiles as affected by diet. A review. *Meat Science*, 73 (2): 218-228. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.11.017

Vasta, V.; Ratel, J.; Engel, E., 2007. Mass spectrometry analysis of volatile compounds in raw meat for the authentication of the feeding background of farm animals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (12): 4630-4639. http://dx.doi.org/10.1021/jf063432n

Veloso, A.C.A.; Teixeira, N.; Ferreira, I.M.P.L.V.O., 2002. Separation and quantification of the major casein fractions by reverse-phase high-performance liquid chromatography and urea-polyacrylamide gel electrophoresis - Detection of milk adulterations. *Journal of Chromatography A*, 967 (2): 209-218. http://dx.doi.org/10.1016/s0021-9673(02)00787-2

Verrez-Bagnis, V.; Sotelo, C.G.; Mendes, R.; Silva, H.; Kappel, K.; Schröder, U., 2018. Methods for Seafood Authenticity Testing in Europe. In: Mérillon, J.-M.; Ramawat, K.G., eds. *Bioactive Molecules in Food*. Cham: Springer International Publishing, 1-55. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-54528-8_69-1

Viallon, C.; Martin, B.; Verdier-Metz, I.; Pradel, P.; Garel, J.P.; Coulon, J.B.; Berdague, J.L., 2000. Transfer of monoterpenes and sesquiterpenes from forages into milk fat. *Lait*, 80 (6): 635-641.

Vidacek, S.; Medic, H.; Botka-Petrak, K.; Nezak, J.; Petrak, T., 2008. Bioelectrical impedance analysis of frozen sea bass (Dicentrarchus labrax). *Journal of Food Engineering*, 88 (2): 263-271. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.010

Vidal, N.P.; Goicoechea, E.; Manzanos, M.J.; Guillen, M.D., 2014. Fourier transform infrared spectroscopy as a tool to study farmed and wild sea bass lipid composition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94 (7): 1340-1348. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6417

Vinci, G.; Preti, R.; Tieri, A.; Vieri, S., 2013. Authenticity and quality of animal origin food investigated by stable-isotope ratio analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (3): 439-448. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5970

Vlaeminck, B.; Fievez, V.; Cabrita, A.R.J.; Fonseca, A.J.M.; Dewhurst, R.J., 2006. Factors affecting odd- and branched-chain fatty acids in milk: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 131 (3-4): 389-417. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.017

von Bargen, C.; Brockmeyer, J.; Humpf, H.U., 2014. Meat Authentication: A New HPLC-MS/MS Based Method for the Fast and Sensitive Detection of Horse and Pork in Highly Processed Food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62 (39): 9428-9435. http://dx.doi.org/10.1021/jf503468t

von Bargen, C.; Dojahn, J.; Waidelich, D.; Humpf, H.U.; Brockmeyer, J., 2013. New Sensitive High-Performance Liquid Chromatography Tandem Mass Spectrometry Method for the Detection of Horse and Pork in Halal Beef. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (49): 11986-11994. http://dx.doi.org/10.1021/jf404121b

West, A.G.; Ayliffe, L.K.; Cerling, T.E.; Robinson, T.F.; Karren, B.; Dearing, M.D.; Ehleringer, J.R., 2004. Short-term diet changes revealed using stable carbon isotopes in horse tail-hair. *Functional Ecology*, 18 (4): 616-624. http://dx.doi.org/10.1111/j.0269-8463.2004.00862.x

Wolf, C.; Rentsch, J.; Hubner, P., 1999. PCR-RFLP analysis of mitochondrial DNA: A reliable method for species identification. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47 (4): 1350-1355. http://dx.doi.org/10.1021/jf9808426

Wu, R.G.; Wang, Z.P.; Fung, Y.S.; Seah, D.Y.P.; Yeung, W.S.B., 2014. Assessment of adulteration of soybean proteins in dairy products by 2D microchip-CE device. *Electrophoresis*, 35 (11): 1728-1734. http://dx.doi.org/10.1002/elps.201300559

Wu, Y.J.; Yang, Y.G.; Wang, B.; Liu, M.C.; Han, J.X.; Chen, Y., 2015. A Real-Time PCR Method Targeting Camel Ingredient for Food Authentication. *Journal of Aoac International*, 98 (6): 1640-1644. http://dx.doi.org/10.5740/jaoacint.15-155

Yusop, M.H.M.; Mustafa, S.; Man, Y.B.C.; Omar, A.R.; Mokhtar, N.F.K., 2012. Detection of Raw Pork Targeting Porcine-Specific Mitochondrial Cytochrome B Gene by Molecular Beacon Probe Real-Time Polymerase Chain Reaction. *Food Analytical Methods*, 5 (3): 422-429. http://dx.doi.org/10.1007/s12161-011-9260-y

Zazzo, A.; Harrison, S.M.; Bahar, B.; Moloney, A.P.; Monahan, F.J.; Scrimgeour, C.M.; Schmidt, O., 2007. Experimental determination of dietary carbon turnover in bovine hair and hoof. *Canadian Journal of Zoology-Revue Canadienne De Zoologie*, 85 (12): 1239-1248. http://dx.doi.org/10.1139/z07-110

Zazzo, A.; Moloney, A.P.; Monahan, F.J.; Scrimgeour, C.M.; Schmidt, O., 2008. Effect of age and food intake on dietary carbon turnover recorded in sheep wool. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 22 (18): 2937-2945. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.3693

Zazzo, A.; Monahan, F.J.; Moloney, A.P.; Green, S.; Schmidt, O., 2011. Sulphur isotopes in animal hair track distance to sea. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25 (17): 2371-2378. http://dx.doi.org/10.1002/rcm.5131

Zeleňáková, L.; Židek, R.; Čanigová, M.; Ziarovska, J.; Zajác, P.; Marsalkova, L.; Fikselová, M.; Golian, J., 2016. *Research And Practice: Quantification Of Raw And Heat-Treated Cow Milk in Sheep Milk, Cheese And Bryndza By ELISA Method.* http://dx.doi.org/10.5219/566

Zhang, C.L.; Fowler, M.R.; Scott, N.W.; Lawson, G.; Slater, A., 2007. A TaqMan real-time PCR system for the identification and quantification of bovine DNA in meats, milks and cheeses. *Food Control*, 18 (9): 1149-1158. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.07.018

Zhao, H.T.; Feng, Y.Z.; Chen, W.; Jia, G.F., 2019. Application of invasive weed optimization and least square support vector machine for prediction of beef adulteration with spoiled beef based on visible near-infrared (Vis-NIR) hyperspectral imaging. *Meat Science*, 151: 75-81. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.01.010

Zhao, Y.; Yang, S.M.; Wang, D.H., 2016a. Stable carbon and nitrogen isotopes as a potential tool to differentiate pork from organic and conventional systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96 (11): 3950-3955. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.7567

Zhao, Y.; Zhang, B.; Chen, G.; Chen, A.L.; Yang, S.M.; Ye, Z.H., 2013. Tracing the Geographic Origin of Beef in China on the Basis of the Combination of Stable Isotopes and Multielement Analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (29): 7055-7060. http://dx.doi.org/10.1021/jf400947y

Zhao, Y.; Zhang, B.; Guo, B.; Wang, D.H.; Yang, S.M., 2016b. Combination of multi-element and stable isotope analysis improved the traceability of chicken from four provinces of China. *Cyta-Journal of Food*, 14 (2): 163-168. http://dx.doi.org/10.1080/19476337.2015.1057235

Zvereva, E.A.; Kovalev, L.I.; Ivanov, A.V.; Kovaleva, M.A.; Zherdev, A.V.; Shishkin, S.S.; Lisitsyn, A.B.; Chernukha, I.M.; Dzantiev, B.B., 2015. Enzyme immunoassay and proteomic characterization of troponin I as a marker of mammalian muscle compounds in raw meat and some meat products. *Meat Science*, 105: 46-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.03.001

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants

Fichier 4 : Conclusions

Auteurs : Sophie Prache (coordination), Elisabeth Baeza-Campone, Antoine Clinquart, Joël Gautron, Bénédicte Lebret, Florence Lefevre, Bruno Martin, Véronique Santé-Lhoutellier.

Sommaire

Chapitre 2 : variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élevage et de transformation - les déterminants 689

2.10 Synthèse et Conclusions 690

2.10.1 Caractéristiques et importance des différents modes de production et transformation 690

2.10.2 Variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élaboration, de conservation et de consommation 696

2.10.3 Authentification de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits par des méthodes analytiques 726

2.10.4 Verrouillages, freins au changement, tensions entre acteurs de la filière 726

2.10.5 Nouveautés, lacunes, incertitudes, controverses 729

Références bibliographiques 732

2.10 Synthèse et Conclusions

Regard sur la bibliographie : Chapitre 2 - Conclusion

Ce chapitre est entré par un angle transversal entre les différentes filières animales. Il a cherché à analyser les points saillants pour chacune d'entre elles, les points de convergence et de divergences entre elles et a également analysé des études scientifiques ayant cette entrée transversale (méta-analyses sur les propriétés nutritionnelles des produits animaux biologiques; études transversales sur les acides gras omega 3 dans les produits animaux ; sur le niveau de contaminations chimiques des différents produits animaux ; sur la valorisation des co-produits dans les filières viandes de ruminants, etc.). Quand la conclusion reprenait un point particulier relevé dans les sections précédentes par filière, la bibliographie correspondante a parfois été citée, parfois non.

112 références ont été utilisées dans cette conclusion (73 sont déjà citées dans les différentes sections du chapitre), dont **82% datent de moins de 10 ans (45% de moins de 3 ans).** Ces références sont pour 86% d'entre elles des **articles scientifiques, dont 91% sont référencés dans le Web of Science.** Il y a **2 revues** principales (INRA Productions Animales et Animal) ; il s'agit de revues **généralistes** dans le domaine de **l'élevage**. La revue INRA Productions Animales est particulièrement citée pour ses numéros ou articles de synthèse ('De grands défis et des solutions pour l'élevage' en 2019 ; 'Le muscle et la viande' en 2015 ; l'évolution des performances des élevages allaitants de 1990 à 2012' en 2014; les débats sociétaux autour de l'élevage dans l'article de Delanoue et al. en 2018 ; l'intérêt de la diversité floristique des prairies pour les produits animaux avec l'article de Farruggia et al. en 2008, etc.). Il y a **13 auteurs principaux** (cités plus de 4 fois), 1 australien et 12 français (dont 8 de l'INRAE), mais aucun n'est cité plus de 6 fois, il n'y a donc pas de sur-représentation de l'un d'entre eux. La couverture peut paraître essentiellement française et INRAE-centrée, mais les publications de synthèse de la revue INRA Productions Animales sont basées sur la littérature internationale. Parmi les auteurs principaux, B. Lebret, B. Picard & A. Prunier sont citées pour leurs publications dans le Nº spécial de la revue INRA Productions Animales 'Le muscle et la viande' ; B. Lebret & A. Prunier pour leurs travaux sur les alternatives à la castration chirurgicale des porcs ; R. J. Polkinghorne & J. F. Hocquette pour leurs travaux sur l'adaptation à l'Europe d'un système australien de qualification de la viande ; E. Kesse-Guyot, J. Baudry, S. Hercberg, P. Galan & D. Lairon pour leurs travaux sur l'agriculture biologique, notamment les études épidémiologiques comparant petits vs. grands consommateurs de produits biologiques ; M. Duru pour ses travaux sur les liens entre conditions d'élevage et teneur en AGPI n-3 des produits animaux.

2.10.1 Caractéristiques et importance des différents modes de production et transformation

2.10.1.1 Evolution de la consommation et des comportements de consommation

Deux évolutions dans les comportements de consommation sont observées en parallèle qui peuvent paraître 'paradoxales'. D'une part une demande croissante de plats préparés « prêts à consommer » (+ 4,4% par an), au domicile comme en restauration hors domicile (RHD), en substitution partielle plus ou moins importante des produits bruts. D'autre part, un taux de croissance élevé de la consommation de produits bio, bien que cette dernière ne représente encore que 5% des achats alimentaires en France (contre 2,5% en 2013, Agence Bio). L'évolution des consommations alimentaires entre les enquêtes INCA 2 (2006-2007) et INCA 3 (2014-2015) montre ainsi une augmentation de 40% de la consommation de plats préparés à base de viande et de poisson et une augmentation de 53% des produits contenant des produits animaux 'ingrédients' (pizzas, quiches, sandwichs) (Pointereau, 2019). Par exemple, pour la viande de volaille, la part des achats de viande sous forme 'élaborés de volailles' (nuggets, panés, etc.) a été multipliée par 2 en 20 ans (31% vs 15%), alors que la part des achats de poulets entiers a été divisée par plus de 2 (24% vs. 52%). Cependant, certains consommateurs expriment des inquiétudes vis-à-vis de ces produits (accroissement de la distance –géographique, technologique- entre la matière première et le produit final qui entraîne un sentiment de perte de contrôle sur la production de l'aliment, des craintes sur la santé et peu de confiance dans les produits ultra transformés) et en parallèle, on observe une demande croissante pour les produits sous SIQO (dont le bio) et/ou vendus en circuits courts. La production biologique, bien que minoritaire, se développe ainsi dans toutes les filières. Le choix de produits sous SIQO est en effet une voie de ré-assurance, ces produits étant porteurs de crédibilité et de fiabilité concernant l'origine, les conditions de production ou de transformation, malgré leur prix généralement supérieur à celui des produits « standards ». En regard de ces tendances, le nouveau Plan National Nutrition Santé 2017-2022 du Haut Conseil de la Santé Publique recommande de privilégier l'utilisation de produits bruts et les modes de production respectueux de l'environnement (Pointereau, 2019) ; un de ses objectifs à 5 ans est de réduire de 20% la consommation de produits ultra transformés.

Ces deux tendances peuvent concerner un même consommateur, avec l'achat en semaine de produits « prêts à manger », peu chers et sans importance accordée à l'origine, pour la restauration hors domicile ou la préparation des repas du soir, et l'achat pour les week-ends ou les moments conviviaux, de produits de qualité supérieure certifiée, issus éventuellement de

circuits courts et d'un coût souvent plus élevé. A signaler que le temps de préparation culinaire a baissé de 4 h/semaine entre 1974 et 2010.

L'importance de ces deux tendances est cependant variable entre filières. La proportion de viande consommée sous forme transformée est historiquement élevée en filière porcine (75%, jambons, saucisses et saucissons, lardons, pâtés…), alors qu'elle est faible en viande ovine (viande hachée, saucisses). La part de viande bovine hachée (steak haché), quant à elle, a pratiquement doublé en 20 ans, passant de 25% en 1995 à 42% en 2016 (70% aux USA), alors que les morceaux entiers à bouillir et à braiser sont moins consommés (-23% entre 2010 et 2017 pour le bœuf à bouillir) en dépit d'un prix relatif favorable. Quant aux produits laitiers, on note une baisse de consommation du lait brut depuis 1990 (-15%), une substitution du lait entier par du lait écrémé et demi-écrémé, ainsi qu'une augmentation de la consommation des autres produits frais (+ 9%), sans changement pour le beurre et les fromages. Pour les poissons, si la consommation de produits bruts issus de la pêche et de l'aquaculture est stable, celle de produits préparés à base de poissons est en augmentation. Concernant la production biologique, la part des animaux en bio (ou en conversion) en France varie de 13% pour les poules pondeuses à 1% et 1,5% pour les porcs et les poulets de chair (10,9%, 9%, 7,1%, 6,2% et 5% pour le cheptel de brebis laitières, chèvres laitières, ovins allaitant, bovins lait, bovins allaitant). La part des autres SIQO est également très variable entre filières : 15% pour les fromages, 10% pour le lait et les volailles, 5% pour les œufs, 4% pour le porc et la charcuterie, 0,9% pour la viande bovine.

2.10.1.2 Points saillants dans chaque filière et spécificités/complémentarités des pays européens

En France, des plans de filière ont été élaborés en 2017 par les interprofessions à la demande du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation dans le cadre des Etats Généraux de l'Alimentation (EGA), afin de mieux répondre aux enjeux sociétaux et environnementaux, avec notamment des objectifs de montée en gamme des produits, tout en maintenant la compétitivité des filières.

Plusieurs filières visent déjà une amélioration qualitative de la production standard, qui bénéficiera de la marque 'Origine France', avec une qualité visée supérieure via une démarche RSE (Responsabilité sociale des entreprises, c'est à dire la prise en compte sur une base volontaire des enjeux sociaux et éthiques) ; c'est le cas des filières porcine, volaille, lait, ovine et viande bovine. Pour la filière porcine, par exemple, les critères d'amélioration concernent la qualité, la traçabilité, l'environnement, le bien-être, le social et des indicateurs d'utilisation d'antibiotiques et d'impacts environnementaux. Les filières se sont également engagées à créer des comités de liaison avec des ONG environnementales, de protection des animaux, des associations de consommateurs, avec l'objectif de s'appuyer sur ces comités pour définir les sujets à travailler prioritairement afin de mieux répondre à la demande sociétale. Concernant le développement des SIQO dont la production biologique, toutes les filières s'y engagent, dans des proportions variables cependant, avec une priorité le plus souvent donnée au Label Rouge ou aux AOP (Tableau ci-dessous).

Tableau 2.10.1. Les SIQO dans les filières françaises : situation en 2017 et objectifs des plans de filière d'ici 2022/2023 (source : plans de filière élaborés par les interprofessions suite aux EGA)

Filière	Situation 2017	Objectif 2022/2023
Viande bovine	LR : 3% offre Bio : 1,5%	LR : 40% Bio : doublement (3%)
Veau	LR/IGP : 4% Bio : 1%	LR/IGP : Réamorçage de la croissance de ce segment de marché Bio : doublement
Viande ovine	Agneaux vendus sous LR/IGP : 15% Brebis en bio : 5.5%	Agneaux vendus sous LR/IGP : 30% Brebis en bio : 11%
Viande porcine	LR : 4% Bio : 0,5% IGP : viande fraîche n=7 ; charcuteries-salaisons n=14	LR : 12% en 2027 Bio : 10% en 2027 IGP : doublement du nombre et augmentation des volumes Renforcer les démarches sous AOP-races locales pour créer un segment très haut de gamme à l'image du porc ibérique espagnol
Volaille	LR : 16% Bio : 1%	LR : +15% (132 à 152 millions de volailles) Bio : +50% (10 à 15 millions de volailles)

	Export de volailles LR : 4%	Export de volailles LR : 8% Ventes de volailles bio et LR en RHD : +20%
Lait de vache	Bio : 2,4% de l'offre AOP (n=50) : 9,9% de l'offre en 2016	Bio : doublement AOP : à consolider en faisant évoluer CDC pour mieux répondre aux attentes sociétales
Caprine	Fromages Bio : 1% en 2016 Formages AOP : 6% en 2016	Bio : +30% (selon évolution demande) AOP : +10% Maintenir les productions fermières (20%)
Ovins Lait	Lait Bio : 8% collecte nationale (22 millions litres) Fromages AOP : 44% des achats	Lait Bio : 11% collecte nationale (30 millions litres) (selon évolution demande) Formages AOP : 50% des achats Encouragement de la production fermière
Œufs		Augmenter le bio et LR (sans objectif chiffré)
Aquaculture	Bio : 8% de la production	Augmenter le bio et LR (sans objectif chiffré)

Par ailleurs, le constat est fait d'une diminution de la consommation de tous les produits animaux en France depuis 2000, à l'exception de la viande de volailles. Entre 2000 et 2017 : -11%, -8%, -51%, pour les viandes bovine, porcine et ovine ; -18%, -17%, -8%, -5% pour le lait de consommation, les autres produits laitiers frais, le beurre, les fromages ; -12% pour les œufs ; elle baisse aussi pour le poisson (FranceAgriMer, 2017). Le seul produit dont la consommation a augmenté est la viande de volailles (+13% entre 2000 et 2017). Le constat est fait aussi de citoyens/consommateurs plus exigeants (qualité, praticité, bien-être animal et environnement)

Les points saillants dans chaque filière et les spécificités/complémentarités des pays européens sont les suivants :

Filière œufs : Demande en œufs de poules élevées en systèmes alternatifs en forte progression (pour œufs coquille, mais aussi depuis peu pour les ovoproduits). Pour répondre à la directive européenne 'bien-être' applicable au 01/01/2012, de lourds investissements ont été réalisés en France, limitant aujourd'hui les capacités de transformation vers des productions alternatives (CNPO, 2018). La production française est encore largement orientée sur l'élevage en cages, alors que la demande s'oriente vers les productions alternatives (58% des poules pondeuses sont actuellement élevées en cages en France, alors que la moyenne européenne est de 56%). D'autres pays européens ont fait le choix d'abandonner la production en cages pour celle au sol lors de la mise en conformité de leurs bâtiments avec la directive bien-être en 2012 (Allemagne, Pays Bas, où ce mode d'élevage représente moins de 10% du volume total). L'objectif de la filière avicole française est d'atteindre 50% de production issus de poules hors cages en 2021, d'augmenter le bio et le Label Rouge (mais sans objectif chiffré). Certains pays se sont engagés à un abandon total des cages d'ici 2025, de même que certaines enseignes de la distribution. Ceci pose la question de la reconversion des producteurs d'œufs en cage et des importations, du fait de ruptures probables d'approvisionnement. Par ailleurs, l'élimination des poussins mâles par broyage sera interdit en France fin 2021 et des discussions sont en cours au niveau européen sur l'interdiction de l'épointage ; ces évolutions réglementaires vont induire des surcoûts importants pour l'ensemble de la filière (CNPO, 2018). L'étiquetage du mode d'élevage est obligatoire sur les œufs coquille depuis 2004. Les consommateurs ont été un « driver » puissant pour faire évoluer les systèmes de production des poules pondeuses, « driver » qui a aussi orienté la demande des industriels vers plus d'œufs issus de poules en plein air. Une étude questionne les conditions de mise en œuvre d'un étiquetage sur le modèle de l'œuf pour d'autres produits animaux tels que le lait ou la viande ((Janssen *et al.*, 2016), voir chapitre 5). Les auteurs montrent qu'en moyenne les consommateurs ont non seulement une attitude positive à l'égard de systèmes d'élevage plus respectueux du bien-être des animaux avec un accès extérieur et un espace suffisant, mais qu'ils sont également disposés à payer un prix plus élevé pour les produits issus de tels systèmes. L'étiquetage du mode de production est à l'étude au Conseil National de l'Alimentation pour les autres filières animales. Plusieurs ONG de protection animale, distributeurs et producteurs de volailles se sont regroupés dans l'association Etiquette Bien-être animal pour proposer en 2018 un nouvel étiquetage informant sur le niveau de bien-être animal et les conditions d'élevage de l'animal dont est issu le produit. Cette étiquette est déjà présente en magasins sur certains produits de viande de volailles, cette association souhaitant proposer un référentiel pour le porc en 2020 puis progressivement pour les autres filières animales. La production française d'œufs permet de couvrir 97% de la consommation nationale, avec néanmoins des échanges significatifs (les exportations représentent 12% de la production et

les importations comptent pour 15% de la consommation ; importations d'œufs coquilles, exportations d'ovoproduits (CNPO, 2018)).

La viande et les produits de porc sont les produits carnés les plus consommés en Europe et en France. Le mode d'élevage est assez standardisé (un modèle dominant, les systèmes alternatifs étant minoritaires), la très grande majorité des porcs produits en Europe et en France étant élevés en bâtiments sur caillebotis. Ce système présente le coût de production le plus faible, et par conséquent un prix de vente de la viande aux consommateurs peu élevé relativement aux autres viandes. Cette production est très fortement régionalisée, tant au niveau européen que français. On observe de grandes différences entre pays européens (compétiteurs) dans l'évolution de la production de porcs. Sur les 10 dernières années : + 28% en Espagne, + 5% en Allemagne (érosion récente après une forte hausse) vs -5% en France, où la production de 1,9 millions de tonnes en 2018 permet d'atteindre 100% d'auto approvisionnement (IFIP, 2019 ; Peyraud *et al.*, 2019). La part des produits sous SIQO est faible (5,5% de la production, dont 4,8% pour le Label Rouge et 0,5% pour l'agriculture biologique en 2017), mais avec une forte dynamique : le récent plan de filière français se donne pour objectifs de passer à 10% et 12% de la production en bio et en Label Rouge en 2027 et de doubler le nombre d'IGP. Ce plan vise à mieux répondre à la diversité des demandes des consommateurs en termes de produits et de façons de produire en proposant une nouvelle segmentation du marché de la viande de porc. La filière Bleu-Blanc-Cœur représente 9% de la production en France. La demande d'une meilleure considération du bien-être animal a entraîné une réduction de la pratique de la castration chirurgicale des porcs mâles en France et dans plusieurs pays européens (la production de porcs mâles entiers concerne déjà 36% des porcs mâles élevés dans l'UE (Prunier et Bonneau, 2019) ; elle est majoritaire depuis de nombreuses années en Espagne, Irlande et Royaume Uni et est en progression en Belgique, Allemagne et France avec 20% des mâles), ce qui peut accroître les risques de défauts d'odeur/flaveur de la viande et des produits transformés. Si la diversité de l'offre en viande fraîche est relativement faible, 75% de la viande de porc est consommée sous forme de produits transformés, issus de pièces anatomiques, mais aussi de procédés de transformation variés avec une très grande diversité de produits entiers ou divisés, crus et séchés (salés ou fumés), fermentés ou, pour la plupart commercialisés prêts à consommer. En France, le jambon cuit supérieur est le premier produit de charcuterie-salaison consommé (22% des volumes), le jambon sec est lui un produit cru souvent associé à une image festive voire gastronomique (4% des volumes des produits de charcuterie).

La très grande majorité de la production de viande porcine française correspond à des « porcs charcutiers » issus de croisements entre lignées « paternelles » et « maternelles », utilisées également en production biologique ou Label Rouge. Hormis la valorisation des races locales dans des filières de niche dont plusieurs sont sous AOP, on observe une tendance à l'homogénéisation des races, alors que le panel des ressources génétiques disponibles permettrait d'accroître la diversité de la production. Il existe des gènes à effet majeur sur la qualité de la viande (dont le gène halothane, associé aux viandes PSE qui présentent des défauts majeurs de propriétés technologiques et organoleptiques : viande molle, exsudative, plus claire, et plus dure après cuisson).

Des problèmes de viande déstructurée (perte de l'aspect fibreux des muscles profonds du jambon voire la longe, entraînant des défauts de texture et de tranchage du jambon cuit et des pertes économiques importantes) sont apparus depuis 20 ans et touchent environ 15% des jambons en France actuellement ; c'est un problème crucial, compte tenu de l'augmentation des ventes en libre-service.

Les industriels prennent en compte les demandes des consommateurs : jambons de porcs élevés sans antibiotiques (après le sevrage), produits à teneur réduite en sel ou plus récemment sans nitrites ajoutés, jambons bio. L'élimination ou la diminution progressive de l'utilisation des additifs technologiques alimentaires (phosphates, sel, nitrites, etc.) pour l'élaboration des produits transformés est une tendance de fond depuis une vingtaine d'années, qui s'amplifie, induisant un niveau d'exigence croissant de la part des transformateurs concernant la qualité de la matière première (pièces de découpe, viandes fraîches). Les objectifs nutritionnels de la diminution de la teneur en sel qui concernent fortement les charcuteries ont fait évoluer les pratiques des transformateurs qui proposent une offre croissante de jambons cuits à teneur en sel réduite (-25%) et travaillent également à réduire le taux de sel d'autres charcuteries. L'élaboration de ces produits nécessite une matière première aux propriétés technologiques élevées et une maîtrise encore plus importante par l'industriel des différentes étapes de transformation afin de conserver des rendements de fabrication satisfaisants et de maintenir la qualité sanitaire. Une question croissante concerne l'impact des nitrites sur la santé et la possibilité de diminuer leur teneur dans les produits de charcuteries ; la diminution de l'apport en nitrites est un enjeu majeur pour les industriels, notamment quant à la maîtrise de la qualité microbiologique, les produits sans nitrites se conservant moins longtemps (environ 8 j pour les produits zéro nitrite vs 3 à 4 semaines avec sel nitrité).

Dans la filière viande de volailles, 25% de la viande est sous SIQO en France. Le Label Rouge y étant historique, la production biologique est peu développée, d'autant plus qu'elle se trouve en distorsion de concurrence avec la production biologique des autres pays de l'UE, du fait du renforcement du CDC en France (choix d'un âge supérieur à l'abattage, différences dans

l'accès à l'extérieur). La viande issue des systèmes de production dits 'alternatifs' est surtout destinée à la vente en carcasses entières et à la découpe, celle issue des systèmes 'standards' aux produits transformés. A signaler que 70% de la viande de poulet consommée en RHD est importée (Peyraud *et al.*, 2019). Les consommateurs ont une image plutôt négative de la production de volailles, qu'ils qualifient d'industrielle (Sonntag *et al.*, 2019). L'étiquetage du bien-être animal et des conditions d'élevage est déjà effectif pour certains produits, à l'initiative en 2018 de plusieurs ONG de protection animale, distributeurs et producteurs de volailles, qui se sont regroupés dans l'association Etiquette Bien-être animal. Des défauts de qualité sont apparus récemment en lien avec la sélection pour la vitesse de croissance et le rendement en filet, sans solutions pour le moment, sauf à entraîner des baisses de performance et donc une augmentation du prix de production (Baeza *et al.*, 2019). Ces défauts rappellent ceux de la déstructuration de la viande de porc. Leur prévalence en France est de 66%, 53% et 11% des filets de poulets standard pour les défauts de 'white stripping', 'wooden breast' et 'filet spaghetti' respectivement (Baeza *et al.*, 2019). Etonnamment, le plan des filières avicoles françaises n'évoque pas ces défauts. A signaler que certains produits transformés élaborés de volaille sont riches en lipides, sucres et sel, alors que la viande brute 'initiale' est riche en protéines, faible en lipides et en AG saturés.

La filière <u>viande ovine</u> européenne se caractérise par une grande diversité de systèmes de production et de types d'animaux produits (depuis des agneaux très jeunes pré-ruminants jusqu'à des ovins adultes) et donc une grande diversité dans les propriétés des carcasses et des viandes. Il y a de fortes particularités culturelles dans les préférences alimentaires liées à la plus ou moins grande importance des systèmes laitiers et des systèmes herbagers. Les points forts de cette filière sont l'image de 'naturalité', ainsi que le nombre de signes de qualité et la part des produits sous SIQO (48 signes de qualité AOP ou IGP et Europe (Erasmus *et al.*, 2017) ; 7,1% du cheptel européen est certifié bio ; en France : 10,7% de la production de viande est sous SIQO). Les points critiques sont une faible attractivité de la viande ovine chez les jeunes et le risque de défauts de flaveur. Il y a peu de produits transformés, l'offre produit est donc peu variée et l'un des enjeux de la filière est de revaloriser la viande ovine auprès des jeunes, notamment à travers le développement de nouveaux produits adaptés aux nouveaux modes de consommation et faciles à cuisiner (viande hachée, plat 'portion', prêt à cuire, merguez, nuggets, boulettes, fingers, viande marinée, etc.) et de mieux connaître et prendre en compte la diversité des attentes des consommateurs (viande bio, de terroir, halal, etc.). Le plan de filière français souligne le besoin d'un maillage des abattoirs de proximité sur le territoire, comme pour la viande bovine.

V<u>iande bovine.</u> En France, une part importante de la viande bovine est produite par la filière laitière : en 2017, la production de gros bovins finis, en tonnes équivalents carcasses (TEC), se compose à environ 33% d'animaux de type laitier (vaches de réforme, jeunes bovins) (Veysset et Delaby 2019)[1]. Le récent plan de filière français intègre l'évolution à la baisse de la consommation de viande. Pour mieux prendre en compte les évolutions de consommation, il propose deux éléments de rupture : i) mieux satisfaire les attentes qualitatives (propriétés organoleptiques et sociétales), en soulignant la nécessité de nouveaux indicateurs de la qualité des produits plus connectés aux attentes sociétales et ii) de renforcer la contractualisation (objectif de 30% de la production de gros bovins). La filière souhaite ainsi inclure des critères organoleptiques minimaux dans les cahiers des charges de tous les signes officiels de qualité, y compris le bio. Le plan de filière mise sur une segmentation 'produits' pour créer de la valeur, monter en gamme et honorer les différents marchés. Il vise une montée en gamme de la qualité des produits à travers : i) l'amélioration de l'image de la viande bovine sur les volets sanitaires, éthique, environnement et bien être, ii) la garantie de la qualité organoleptique, iii) la création de valeur ajoutée et une meilleure rémunération des acteurs. Il indique des objectifs chiffrés d'ici 2023 concernant i) le pourcentage de viande bovine sous SIQO (objectifs ambitieux pour le SIQO Label Rouge), ii) la réduction de l'empreinte carbone de la viande bovine (-15%). L'échelle territoriale y est évoquée notamment pour ce qui concerne le transport des animaux et le maillage des outils d'abattage sur le territoire, avec la nécessité d'abattoirs de proximité viables. Il pointe aussi la valorisation des co-produits dans l'alimentation animale et la réduction du gaspillage. A signaler que le plan de filière pour la génétique des ruminants vise des progrès basés sur les races pures et à renforcer le lien entre la race et le produit dans les filières de qualité, mais que le recours au croisement n'est pas évoqué. La filière se heurte à la variabilité entre animaux dans les propriétés organoleptiques (tendreté, notamment) qu'il est encore difficile de maîtriser. Le steak haché a été une innovation majeure pour la filière qui a permis de régler pour partie le déséquilibre de valorisation économique avant-arrière de la carcasse, en permettant de trouver un débouché aux muscles avant, difficiles à valoriser, et aux carcasses mal conformées. Trente pour cent de la carcasse est ainsi valorisée en France. Sa consommation est en constante augmentation en France : + 14% entre 2010 et 2017, alors que la consommation de viande bovine au total, de viande bovine à rôtir et de bœuf à bouillir ont baissé respectivement de 16%, 14% et 23% sur la même période Les effectifs animaux baissent en France (en 10 ans, -9% de bovins et -20% de veaux (Peyraud *et al.*, 2019).

[1] Veysset, P. ; Delaby, L., 2019. Analyse des plans de filières bovines et génétique. Document interne des groupes filière INRA.

Filière poissons. Image de produits 'nature' et plus diététiques que la viande, les poissons sont perçus comme chers et peu disponibles, et les consommateurs expriment souvent un sentiment de manque de compétences (connaissance du produit et habitude à le cuisiner). Des reproches sont exprimés envers l'aquaculture intensive concernant la densité dans les cages d'élevage et l'utilisation d'antibiotiques). Les poissons constituent la principale source d'AG longs (C>18) polyinsaturés n-3 dans l'alimentation humaine : les lipides de la chair sont caractérisés par une forte proportion d'AGPI –LC n-3, en comparaison des animaux terrestres, l'EPA et le DHA pouvant représenter jusqu'à 25% des lipides de la chair des poissons gras. Cependant, la crise de l'ESB, les critiques sur la pêche minotière et le règlement européen visant à réduire les teneurs en polluants environnementaux ont entraîné de profondes modifications des pratiques d'élevage qui se répercutent sur la composition à la fois des aliments et de la chair des poissons d'élevage : évolution forte de l'origine des matières premières utilisées dans l'aliment des salmonidés, avec incorporation progressive de farines et huiles végétales en substitution des farines et huiles de poissons (89% de matières premières d'origine marine en 1999 vs 29% en 2013). Egalement, recherches de nouvelles sources alimentaires comme les farines d'insectes, algues, levures, et autres co-produits. Le concept de 'fortification du poisson' (enrichissement alimentaire en AGPI n-3 et antioxydants) est bien accepté, de même que les évolutions dans l'origine des matières premières utilisées dans l'aliment des salmonidés. Il faut signaler que l'utilisation des protéines animales transformées est interdite pour les SIQO (autorisée seulement pour les productions standards). Les poissons d'élevage souffrent cependant d'un défaut d'image par rapport aux poissons sauvages (notamment vis-à-vis des propriétés organoleptiques). La part de la production en bio est de 8% en France, avec un développement important ces 10 dernières années. Le plan de filière français cherche à élargir et diversifier l'offre produits pour répondre aux nouveaux modes de consommation (tartinables, tartares, brochettes, terrines, rillettes, sans arêtes, prêt à cuire, plats préparés) et à développer les informations pour les consommateurs (origine, méthodes d'élevage, informations nutritionnelles). Le poisson bénéficie de procédés de conservation ancestraux qui le transforment en un produit beaucoup plus facile d'usage (filets séchés, fumés, surimi).

Les poissons incluent une grande variété : i) d'espèces, ii) de produits bruts ou transformés, iii) de milieux d'élevage (structures d'élevage, pisciculture continentale/marine, production extensive en étang/intensive), iv) de modes de production (une même espèce peut être produite dans des systèmes d'élevage différents). Les propriétés organoleptiques diffèrent très fortement d'une espèce à l'autre et entre poissons d'eau douce et marins. A signaler une forte variabilité intra-lot des propriétés des produits, en lien avec la domestication récente des espèces aquacoles. Un défaut majeur d'aspect et de texture ('gaping' : détachement des feuillets musculaires et apparition de trous dans le filet), est particulièrement impactant chez certaines espèces dont salmonidés. Ses causes exactes sont mal connues et son déterminisme probablement multifactoriel (biologique et technologique).

La consommation est de 22 (Europe) et 24 (France) kg/an/habitant, et représente 6,5 et 8,3% des apports protéiques. Comme pour viande, la consommation a évolué vers des produits prêts à cuisiner (filets, pavés, darnes). En France, seulement 22% des poissons sont issus de la pisciculture, dont moins de 2% issus de pisciculture française.

Des éléments spécifiques aux poissons : qualité de l'eau (O_2, CO_2), température (car animaux poïkilothermes).

Produits laitiers

Produits laitiers issus de lait de vache. Taille de cheptel très variable en Europe : majorité de troupeaux de très petite taille dans 8 pays ex-URSS (<10 vaches) et troupeaux de grande taille au Danemark, RU, Pays-Bas et Suède. Le regard sur les troupeaux de très grande taille est très variable entre pays européens (problème en France, où la taille moyenne du troupeau est de 67 vaches).

La part de lait produit collecté par industrie laitière est très importante (93,7% en 2017).

Produits laitiers issus de lait de chèvre. Les chèvres représentent 30% du cheptel laitier en Grèce, 20% en Espagne, 11% en France. 73% du lait est collecté, le reste est transformé à la ferme. La France est le 1er producteur en Europe (+40% de volume collecté entre 2000 et 2017).

Produits laitiers issus de lait de brebis : la production est localisée dans le Sud de l'Europe (Grèce, Italie, France, Roumanie). Le secteur montre des exportations dynamiques (+43% depuis 2010, AOP Feta depuis la Grèce, Pecorino depuis l'Italie, Roquefort depuis la France).

SIQO (AOP, IGP, STG) dans pratiquement tous les pays, mais surtout en Italie et en France (96 des AOP laitières de l'UE, soit plus de la moitié); parmi ces produits, les fromages arrivent en 2ème position (17% des produits). En 2012, est apparue la mention européenne facultative 'produit de montagne' (qui peut se cumuler avec les autres : AOP, IGP ou STG) ; en 2016, 11% du lait a été produit en zone de montagne (13% en valeur, dans les Alpes et le Massif Central).

L'UE est le 1er producteur mondial de *lait biologique* (3% de la production européenne en 2013). Il représente 13% du lait produit en France, 6% du lait liquide consommé dans l'UE en 2016 ; il a beaucoup progressé (+30% entre 2012 et 2016 dans l'UE) et devrait continuer à progresser. La consommation des autres produits laitiers bio occupe une part plus modeste, mais en progression. Le marché chinois du lait infantile bio se développe actuellement, ce qui a incité certains pays européens à augmenter la production de poudre de lait, de lactosérum ou de lait UHT bio. Mais il existe des différences entre pays dans le niveau de soutien au bio (beaucoup plus faible en Angleterre qu'en Autriche), et dans certains pays la production biologique est devenue intensive (exploitations très spécialisées et peu autonomes, dont l'approvisionnement en céréales pourrait devenir problématique). Une intensification trop importante de la production est susceptible de détourner une partie des consommateurs de lait bio vers d'autres laits différenciés, comme le lait de foin en Autriche ou le lait de pâturage en France.

Le récent plan de filière français propose de i) développer les signes de qualité et ii) des produits diversifiés qui répondent aux attentes de la société (travail en élevage, sanitaire, bien-être animal, environnement), segmentés selon les modes de production ou les territoires (tableau 38).

Il y a peu de lait bio en filière caprine, car les 'univers' du bio et de la filière lait de chèvre se recoupent sur des valeurs de naturalité, d'authenticité ; le bénéfice apporté par le mode de production bio est donc peu perceptible par les consommateurs. En outre un problème éthique se pose autour du devenir des chevreaux et des chèvres de réforme : environ 50% des chevreaux sont engraissés pour la production de viande, 25% sont utilisés pour le renouvellement des troupeaux, le reste est équarri, de même que 40 à 45% des chèvres réformées. Ce problème s'intensifie (+40% à 50% de lait de chèvre collecté en France entre 2000 et 2017, donc production accrue de chevreaux). Les outils d'abattage sont par ailleurs fortement concentrés (Poitou-Charentes : 2/3 des abattages), ce qui place les éleveurs des autres régions en difficulté pour valoriser leurs animaux.

Lait de brebis : la filière française souhaite encourager la production fermière.

De façon générale, les échanges entre pays sont importants pour valoriser au mieux en alimentation humaine l'ensemble des produits (et/ou des morceaux) des filières animales, en jouant sur la diversité des habitudes alimentaires dans les différents pays et leurs complémentarités. Ainsi, par exemple, les pays occidentaux consomment préférentiellement les filets de poulets et exportent vers l'Asie, l'Afrique et l'Amérique du Sud les cuisses-pilons et les ailes. Pour le porc, les consommateurs français consomment de majoritairement des produits transformés dont en premier lieu du jambon cuit ; la France importe d'Europe des jambons désossés pour la transformation en jambon cuit ainsi que des produits transformés cuits (depuis l'Allemagne) ou secs (depuis l'Espagne et l'Italie), alors qu'une large part des autres pièces de la carcasse (longe ; et surtout abats et graisses) est exportée notamment vers les pays tiers. Pour la viande ovine, le bassin laitier des Pyrénées Atlantiques en France produit des agneaux de lait très peu consommés en France et exportés vers L'Espagne et l'Italie, consommateurs habituels de ce produit du fait de l'importance de leur cheptel laitier.

2.10.2 Variabilité des propriétés des produits animaux selon les conditions d'élaboration, de conservation et de consommation

Pour chaque filière animale considérée dans cette expertise, nous avons choisi de décliner la qualité selon différents volets (propriétés commerciales, organoleptiques, nutritionnelles, sanitaires, technologiques, d'usage, d'image, …) et d'identifier les facteurs de variation et leur importance pour chacun de ces volets. Comme il peut y avoir des antagonismes entre ces différents volets de la qualité pour un mode de production ou pour des pratiques d'élevage données, nous avons choisi 'd'entrer' aussi par cet angle en illustrant ces antagonismes/synergies sur quelques exemples. Plusieurs études sur la viande de porc montrent par exemple une altération des propriétés organoleptiques (viande plus claire et plus exsudative) et technologiques (diminution de la capacité de rétention d'eau et du rendement technologique) avec les progrès réalisés sur les propriétés commerciales (teneur en viande maigre) et les performances zootechniques (vitesse de croissance, efficacité alimentaire). Par ailleurs, une pratique d'élevage peut avoir des effets positifs sur certaines propriétés et des effets négatifs sur d'autres. Par exemple, en aquaculture, le remplacement des matières premières alimentaires d'origine marine par des matières premières d'origine végétale terrestre améliore les propriétés d'image (moindre impact sur une ressource sauvage) et les propriétés sanitaires (moindre niveau de contaminants liés aux farines et huiles de poisson), mais dégrade les propriétés nutritionnelles (baisse des teneurs en acides gras eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA)) et commerciales (baisse des rendements de découpe en lien avec une adiposité accrue). Pour la viande d'agneau, l'élevage à l'herbe est favorable aux propriétés nutritionnelles et d'image du produit, mais défavorable à ses propriétés organoleptiques (risques d'odeurs indésirables) et commerciales (risque d'état d'engraissement insuffisant) ; le mode de production biologique renforce encore ces antagonismes (par rapport à l'élevage conventionnel). De même, pour la viande porcine, le mode de production biologique (vs. conventionnel) est favorable aux propriétés d'image et nutritionnelles, mais selon les

pratiques d'élevage, peut être défavorable aux propriétés technologiques et commerciales. Pour la production extensive de races locales de porcs (filières AOP) vs. la production conventionnelle, on observe des antagonismes entre d'une part les propriétés organoleptiques, d'image, technologiques et nutritionnelles, et d'autre part les propriétés commerciales et d'usage (prix). Pour le mode de production alternatif vs. standard chez le poulet, on observe des antagonismes pour presque tous les volets de la qualité. Pour la viande porcine, la non castration des porcs mâles est favorable aux propriétés d'image (bien-être animal) et commerciales (teneur en viande maigre plus élevée), mais défavorable aux propriétés organoleptiques (risques d'odeurs indésirables à la cuisson). On observe aussi des antagonismes pour les produits laitiers relativement au traitement thermique du lait. D'un côté, les autorités sanitaires déconseillent aux personnes à risque (personnes âgées, enfants, femmes enceintes) la consommation de produits laitiers fabriqués à partir de lait cru, du fait des risques de toxi-infections liés à la présence potentielle de flores pathogènes, mais des études récentes de cohortes montrent que la consommation de lait cru et de fromages au lait cru pourrait être bénéfique pour la santé (diminution des allergies et d'autres maladies atopiques, ainsi que des pathologies respiratoires, capacités pulmonaires accrues). Les mécanismes impliqués sont encore mal connus, mais les scientifiques avancent l'hypothèse que la diversité microbienne des fromages pourrait influencer la diversité du microbiote intestinal à travers la diversité des microorganismes ingérés.

Ces antagonismes identifiés renforcent la nécessité d'une évaluation multicritère de la qualité. Celle-ci est cependant rendue complexe par la variabilité de l'évaluation des propriétés organoleptiques (variabilité entre consommateurs, entre pays d'habitudes alimentaires différentes, complexité de l'odeur/flaveur du produit qui, de plus, rend difficile l'utilisation de proxys) et les interactions fréquentes avec les autres propriétés qualitatives (nutritionnelles, technologiques, commerciales), …ainsi que la qualité d'image, elle-même difficile à appréhender. On peut signaler aussi que la variété des produits (particulièrement élevée dans les produits de porc, par exemple) peut induire des attentes qualitatives variées et spécifiques selon les acteurs de la filière (producteurs, abatteurs, transformateurs, distributeurs, consommateurs) complexifiant la notion de qualité.

La construction de la qualité se fait tout au long de la chaîne alimentaire, sa dégradation potentielle aussi. Beaucoup de facteurs de variation sont impliqués qui jouent sur tous les volets de la qualité, depuis les caractéristiques des animaux (espèce, génétique, type sexuel, âge), les conditions de production, de transport et d'abattage pour la viande et la chair de poisson, de transformation, de conservation, de commercialisation, jusqu'à la préparation et la consommation. La transformation des produits bruts permet d'augmenter la durée de conservation, d'élaborer des produits aux propriétés organoleptiques élevées, typiques et de haute valeur à partir de pièces « nobles » (par exemple, jambons secs et charcuteries, fromages), de mieux valoriser les pièces les moins nobles et/ou les moins demandées (viande bovine à braiser utilisée pour faire des steaks hachés, viandes séparées mécaniquement, pièces « grasses » et abats de porc valorisés en pâtés, saucisserie ou plats cuisinés, etc.), de diversifier l'offre et de proposer des produits faciles à préparer ou cuisiner. Pour certains de ces produits, la transformation permet de trouver de la plus-value économique dans un marché concurrentiel où les entreprises agro-alimentaires sont dans une recherche permanente d'innovations. Les facteurs de variabilité de la qualité des produits transformés sont nombreux. Pour la viande de volailles, par exemple, la qualité des produits transformés dépend des procédés technologiques (formulation, conditions de malaxage, taux d'incorporation de viandes séparées mécaniquement, fumaison, etc.), des modalités de conservation (mode de conditionnement, durée de conservation) et des modalités de cuisson (mode, durée et intensité). Pour le fromage, les propriétés dépendent avant tout des procédés technologiques, mais aussi des caractéristiques initiales des laits, le poids respectif de ces 2 étapes (production, transformation) variant selon le volet de la qualité considéré. Les propriétés organoleptiques du fromage dépendent avant tout de la technologie fromagère, alors que la composition du lait influe davantage sur les propriétés nutritionnelles.

Ces facteurs de variation ont été explicités et hiérarchisés pour les produits bruts dans chaque filière (voir tableaux pour chaque filière), puis synthétisés. Cependant, la variété des modes de transformation, la complexité des différentes étapes et les données disponibles dans la littérature n'ont pas permis de réaliser une synthèse des facteurs de variabilité des produits transformés, à l'exception du jambon cuit et du jambon sec.

2.10.2.1 Synthèse des effets des principaux facteurs de variation des propriétés des produits animaux bruts

A partir des tableaux réalisés pour les différentes filières (voir les différentes sections de ce chapitre), nous pouvons dégager les principaux facteurs de variation des différentes propriétés des produits animaux :

Propriétés commerciales :

- Poids : génétique, âge
- Rendements carcasse et viande : génétique, âge, sexe/type sexuel
- Engraissement (porcs, ruminants, poissons) : génétique, âge, sexe/type sexuel, conduite alimentaire
- Couleur coquille (œuf) : génétique

- Fraîcheur et propriétés fonctionnelles (œuf) : durée et température de conservation
- Matière grasse et protéique (lait) : espèce, génétique, stade physiologique, alimentation
- Cellules somatiques (lait) : santé, espèce, stade physiologique
- Flore totale (lait) : conditions de traite et de conservation

Propriétés organoleptiques :

- Couleur : espèce, génétique, âge, type de muscle, alimentation (viande bovine et ovine, lait, chair de poisson et jaune d'œuf) conditions de pré-abattage, abattage et conservation, modalités de cuisson
- Texture/Tendreté : espèce, génétique, âge, type de muscle, stade physiologique (lait), conditions de pré-abattage, abattage et conservation, modalités de cuisson
- Jutosité : génétique, âge, conditions de pré-abattage et abattage, modalités de cuisson
- Flaveur : espèce, type de muscle, sexe (porc), âge (ovins), alimentation, conditions de conservation, environnement d'élevage (poisson), modalités de cuisson.

Propriétés nutritionnelles :

- Teneur en lipides : alimentation, espèce (lait), stade physiologique (lait), génétique, âge, type de muscle, sexe/type sexuel, modalités de cuisson
- Profil en acides gras : alimentation, espèce (lait), génétique, type de muscle, âge
- Teneur en minéraux et vitamines : alimentation, mode d'élevage, âge, type de muscle, modalités de cuisson
- Teneur en protéines et acides aminés : espèce (lait), génétique (lait), stade physiologique (lait), âge, modalités de cuisson

Propriétés technologiques :

- Aptitude à la transformation : génétique, âge, conditions de pré-abattage, d'abattage et de conservation
- Aptitude à la conservation : alimentation, type de muscle, conditions de pré-abattage, d'abattage et de conservation
- Aptitude à la transformation et conservation du gras (porc) : génétique, alimentation, type sexuel, localisation anatomique
- Aptitude à la fumaison (poisson) : âge
- Foisonnement (blanc d'œuf ou œuf entier) : âge, durée et température de conservation
- Emulsifiant, colorant, liant (jaune d'œuf ou œuf entier) : alimentation
- Rendement fromager (lait) : espèce, génétique, stade physiologique
- Aptitude à la coagulation (lait) : espèce, génétique, stade physiologique, santé
- Intégrité des protéines (lait) : santé, conditions de conservation
- Intégrité des globules gras (lait) : santé, conditions de traite
- Flores indésirables (lait) : conditions de traite et de conservation

En conclusion, les facteurs majeurs de variation des propriétés des produits animaux sont les suivants :

- Propriétés commerciales : espèce, génétique, âge, conduite alimentaire (porc, bovins et ovins), stade physiologique (lait), santé (lait), sexe, conditions de conservation (œuf, lait)
- Propriétés organoleptiques : espèce, génétique, âge, sexe/type sexuel, type de muscle, stade physiologique (lait), alimentation, conditions de pré-abattage, abattage et conservation, modalités de cuisson
- Propriétés nutritionnelles : espèce, génétique, âge, sexe/type sexuel, type de muscle, stade physiologique (lait), alimentation, modalités de préparation/cuisson
- Propriétés technologiques : génétique, âge, stade physiologique, alimentation, type de muscle ou de tissu gras, conditions de traite (lait), de pré-abattage, d'abattage et de conservation

Les facteurs majeurs de variation des propriétés des produits animaux bruts (non transformés) liés aux caractéristiques individuelles de l'animal sont l'espèce animale, la génétique (race ou souche), l'âge et le sexe (ou le type sexuel). Le stade physiologique (début, milieu ou fin de lactation) est également un déterminant majeur de la qualité du lait. Les conditions de traite influencent surtout ses propriétés commerciales et technologiques. Les propriétés organoleptiques et nutritionnelles des viandes bovines, ovines et porcines varient beaucoup avec le muscle/morceau. Les conditions de pré-abattage, d'abattage et de conservation impactent fortement les propriétés organoleptiques, technologiques et sanitaires de la viande et de la chair de poisson. Les modalités de conservation influencent aussi les propriétés technologiques et commerciales des œufs et du lait. L'alimentation est le facteur d'élevage le plus impactant des propriétés organoleptiques, nutritionnelles et technologiques des produits animaux (ruminants, monogastriques et poissons). Les propriétés d'image, quant à elles, sont liées aux conditions d'élevage (par ex. accès au plein air, pâturage, taille du groupe, surface disponible par animal, modalités de logement, respect de bonnes pratiques en matière de bien-être animal et/ou d'environnement) et de transformation (utilisation d'ingrédients naturels, caractère artisanal d'une fabrication), ainsi qu'à la provenance du produit (provenance

locale, produit de montagne, etc.). Les modalités de cuisson influencent les propriétés organoleptiques et nutritionnelles des viandes. Il faut noter que la plupart des cahiers des charges des SIQO prennent des engagements relatifs à ces facteurs de variation (sauf les modalités de cuisson) et que les propriétés d'image se construisent souvent autour de signes de qualité ou de mentions valorisantes.

Les propriétés sanitaires des produits sont un prérequis incontournable. Les contaminations microbiologiques incluent les agents pathogènes pour l'homme (bactéries, virus et parasites) dont les animaux sont les principaux réservoirs. Les contaminations chimiques concernent i) des contaminants qui s'accumulent au cours de la chaîne alimentaire, l'animal étant contaminé par ce qu'il mange ou par son milieu de vie (phase d'élevage), ii) des composés néoformés issus des procédés de transformation (cuisson, fumaison, etc.) et qui sont délétères pour la santé humaine (amines hétérocycliques, par ex.), et iii) des additifs ajoutés dans les recettes. Les modes d'élevage, les procédés de transformation et les modes de consommation jouent donc un rôle important dans les voies de contamination possibles (Figure ci-dessous). Les propriétés sanitaires sont d'abord fortement dépendantes des conditions en élevage et des pratiques sanitaires et mesures d'hygiène et de bio-sécurité mises en place par l'éleveur. Parmi les conditions d'élevage, à noter la densité animale, la qualité des aliments offerts aux animaux (par ex. maîtrise de la contamination par les polluants organiques persistants de l'aliment, maîtrise de la qualité de l'ensilage), l'accès au plein air et la durée d'élevage (exposition plus importante à certains pathogènes - *Campylobacter* pour les volailles, parasites pour les herbivores- et/ou aux contaminants de l'environnement). La mixité d'espèces dans une même exploitation a des effets variables selon que le pathogène est multi-hôtes ou spécifique à une espèce. La mixité peut soit favoriser la transmission inter-espèces pour les pathogènes multi-hôtes (effet de dissémination et/ou d'amplification, exemple : porcs et bovins) ; à l'inverse, elle peut offrir des services de régulation des bioagresseurs pour les pathogènes relativement spécialisés (ex. des strongles dans le cas de la mixité bovins/ovins). De plus, les processus d'abattage, les conditions de transport des carcasses et des viandes, les modalités de transformation (hachage, par exemple, ou températures/durée de chauffage), de conservation puis de cuisson ont également des effets majeurs sur les propriétés sanitaires. Enfin, intervient la formulation du produit (dont les additifs).

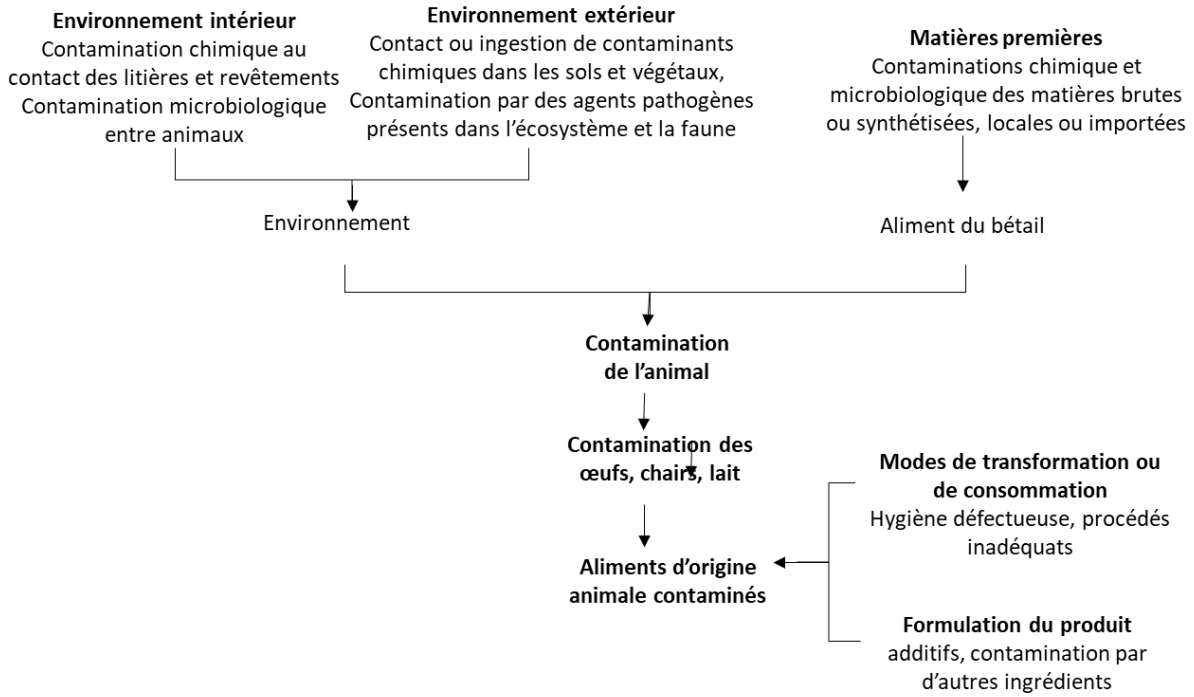


Figure 2.10.1 les voies de contaminations microbiologiques et chimiques des aliments d'origine animale

2.10.2.2 Propriétés les plus stables vs. les plus affectées par les conditions d'élaboration du produit et étapes majeures où se construit et se dégrade la qualité

Un point important pour proposer des leviers d'amélioration de la qualité est de repérer les étapes majeures où se construit et où se dégrade la qualité et quelles propriétés sont les plus affectées vs. les plus stables. A partir des contributions des différentes filières animales :

Propriétés les plus stables vs. les plus affectées par les conditions d'élaboration du produit

Certaines propriétés varient peu avec les conditions de production et/ou de transformation. C'est le cas, par exemple, des teneurs en protéines et minéraux et du profil en acides aminés de la viande et de la chair de poisson 'bruts' qui sont stables pour une espèce et un type de muscle et très peu affectés par le génotype, le type sexuel, l'âge de l'animal et ses conditions d'élevage. Seuls les teneurs en minéraux dans les abats, comme le foie, peuvent être affectées par la teneur en minéraux dans la ration (Mourot (2015), exemple des teneurs en fer et cuivre pour le porc). De même, pour le lait, si sa teneur en protéines totales peut être très variable, en revanche, la composition de celles-ci varie nettement moins. Le constat est le même pour les œufs. Il y a donc peu de leviers pour modifier cette composition, qui d'ailleurs est déjà quasiment optimale en regard des besoins de l'homme.

D'autres propriétés sont au contraire très variables. C'est le cas, par exemple, de la teneur en lipides des produits bruts, ainsi que de la composition en acides gras de ces lipides, qui influencent les propriétés nutritionnelles, organoleptiques et de santé des produits d'origine animale, et qui varient beaucoup selon les conditions de production et parfois de transformation du produit (également, avec la localisation anatomique du morceau, pour la viande). Du fait de la consommation insuffisante en Europe d'acides gras omega-3, à la fois du précurseur (ALA : apports de 0,9 g/j vs. recommandations de 1,8 g/j) et des dérivés à longue chaîne, notamment de l'EPA et du DHA (apports de 137 et 101 mg/j vs. recommandations de 250 mg/j pour chacun) conduisant à un rapport omega-6/omega-3 de 10 vs. recommandations de 4) (Anses, 2015), de nombreuses études ont été réalisées dans les différentes filières animales pour enrichir les produits bruts et/ou transformés en AG d'intérêt (AGPI n-3). Ces études combinent en général un apport en antioxydant à l'apport en AGPI n-3, pour protéger les AGPI de la peroxydation à laquelle ils sont sensibles.

Si la composition des matières grasses du fromage et des composés liposolubles dépend avant tout des conditions de production du lait, en particulier de l'alimentation des animaux (la transformation fromagère ne faisant que les concentrer à un niveau variable selon le type de fromages), en revanche, la teneur du fromage en matières protéiques, minéraux et vitamines hydrosolubles est principalement le reflet des procédés technologiques, les caractéristiques initiales du lait jouant un rôle secondaire. Ainsi, la teneur en calcium des fromages est extrêmement variable (facteur de 10 en fonction du type de fromage). La teneur initiale du lait en calcium ne semble pas avoir d'effet sur celle du fromage ; en revanche, les traitements technologiques qui agissent sur la répartition entre le calcium micellaire et le calcium soluble du lait sont susceptibles de moduler la rétention du calcium dans le fromage. C'est la chronologie des étapes d'acidification et d'égouttage qui joue. Si l'acidification est suivie d'égouttage, les minéraux solubilisés pendant l'acidification sont éliminés dans le lactosérum. Si l'égouttage se fait avant ou pendant l'acidification, les minéraux restent dans le caillé. De même, la variabilité de la teneur en vitamines hydrosolubles (essentiellement du groupe B) observée dans le fromage est principalement liée à l'effet des procédés technologiques, et les teneurs en peptides anti-hypertenseurs montrent une très grande variabilité selon le type de fromages, plus élevées dans les fromages à affinage long (pâte pressée non cuite) que dans les fromages à pâte molle.

Pour les propriétés sanitaires également variables, les modes d'élevage, les procédés de transformation et les modes de consommation jouent un rôle important dans les voies et l'intensité des possibles contaminations microbiologiques et chimiques.

C'est le cas aussi des teneurs en composés malodorants dans la viande de porcs et d'ovins, qui influencent fortement les propriétés organoleptiques et conduisent à orienter les procédés de transformation. Ces teneurs varient beaucoup avec les caractéristiques de l'animal (maturité sexuelle, donc type sexuel et âge de l'animal) et les conditions d'élevage. La maturité sexuelle peut en effet entraîner des défauts d'odeur/flaveur en lien avec les hormones mâles. Ces odeurs résultent de l'accumulation dans la viande de deux composés malodorants : l'androsténone, synthétisée par les testicules, et le scatol qui résulte du métabolisme du tryptophane (dans le gros intestin pour les porcs, dans le rumen pour les ovins) et dont la dégradation hépatique est inhibée par les hormones sexuelles, si bien qu'une proportion relativement importante peut passer dans l'organisme (Prunier et Bonneau, 2019 ; Parois *et al.*, 2018) .

Les propriétés d'image varient également beaucoup avec les conditions d'élevage et de transformation. Toutes les filières soulignent l'écart de qualité perçue lorsque des informations sont communiquées aux consommateurs sur les conditions d'élaboration du produit (élevage et transformation ; mais aussi animal d'élevage vs. sauvage, comme dans le cas du poisson) et son origine, alors que les propriétés intrinsèques du produit ne sont pas forcément différentes. Il faut signaler que des critères de qualité jugés négatifs sur un produit standard peuvent être bien acceptés par les consommateurs si le produit est différencié. En France, la forte pression des consommateurs et des citoyens quant au bien-être animal se traduit par une place importante accordée à cette question dans les plans de filières proposés suite aux EGA, avec la mise en place de comités de liaison avec la société civile, les ONG de protection des animaux, les associations de consommateurs et la recherche (filières avicoles, porcine, bovine, ovine, caprine). A signaler une étude danoise sur le poisson d'élevage indiquant un consentement à payer de +25% pour un label bien-être animal.

Quelques étapes majeures où se construit et se dégrade la qualité

Etapes d'élevage

La sélection génétique a été majoritairement orientée sur les propriétés commerciales. Les propriétés commerciales sont à la base du paiement aux éleveurs et elles intéressent particulièrement les professionnels des filières animales. Pour le lait, elles sont basées sur des critères sanitaires et de composition. Pour les autres produits animaux (viandes, poissons, œufs), elles reposent sur des critères de poids et d'aspect, et parfois d'homogénéité du lot. Elles ne préjugent cependant pas d'autres propriétés importantes pour les consommateurs, telles que les propriétés organoleptiques et/ou nutritionnelles (Bonny *et al.*, 2016). Il y a ainsi un constat de primauté accordée aux propriétés commerciales des produits animaux en Europe. Cette priorité a fortement orienté la sélection génétique (pour la production laitière ou la vitesse de croissance, l'efficacité alimentaire, la masse musculaire et le rendement en muscles ; contre l'adiposité corporelle), le type d'animal (spécialisation productive vers le lait ou la viande, par exemple), et les pratiques d'élevage (nutrition, logement des animaux, spécialisation des élevages). Elle a permis des gains considérables (de production quantitative, rendement, vitesse de croissance, efficacité alimentaire, proportion de viande maigre dans la carcasse, etc.) dans toutes les filières, et a contribué à l'exportation de produits animaux vers l'Europe ou les pays tiers.

Mais elle a conduit à une réduction de la diversité génétique chez les animaux de rente. Pour le poulet, par exemple, l'approvisionnement du marché mondial ne dépend plus que de 2 sélectionneurs situés aux USA. Pour le porc, la grande majorité des porcs charcutiers en France sont issus de croisements entre 4 races. Les races locales sont alors un critère de différenciation pour les propriétés d'image, organoleptiques et nutritionnelles. Les laits issus de races locales sont ainsi souvent plus riches en AGPI que celui des vaches Holstein, génotype dominant dans le troupeau laitier. Les races à viande locales, moins sélectionnées que les races allaitantes dominantes (Charolaise, Limousine, Blonde d'Aquitaine) présentent des teneurs en gras intramusculaire plus élevées (viandes plus persillées), ce qui est plus favorable pour les qualités organoleptiques, notamment la flaveur. Le même constat peut être fait pour la viande porcine où les races locales non sélectionnées pour leurs performances zootechniques présentent une plus forte adiposité et des caractéristiques musculaires qui, associées à des systèmes de production spécifiques, contribuent à l'élaboration de viandes et produits aux propriétés organoleptiques élevées. La préservation des races locales, au-delà de la préservation de la biodiversité et de l'activité économique de leurs territoires de production, est donc un enjeu pour le maintien de propriétés constitutives de la qualité, autres que les seules caractéristiques commerciales.

Plusieurs études montrent que cette orientation majoritaire de la sélection génétique vers les propriétés commerciales (augmentation de la teneur en muscle des pièces, de la vitesse de croissance, de l'efficacité alimentaire et diminution de l'adiposité) pratiquée depuis les années 1960 dans les principales races porcines a entraîné une altération des propriétés technologiques (diminution de la capacité de rétention d'eau et du rendement technologique suite à un métabolisme musculaire plus glycolytique) et organoleptiques (viande plus claire et plus exsudative). De même, la priorité donnée au rendement en viande maigre et aux propriétés commerciales entraîne, pour la viande bovine, des déceptions des consommateurs quant aux propriétés organoleptiques (tendreté, flaveur). Elle peut aussi rendre difficile, voire impossible, l'adoption de pratiques plus agro-écologiques dans certaines filières animales. Ainsi, la sélection pour l'accroissement de la masse musculaire et la réduction du tissu adipeux chez les bovins allaitants (et à un degré moindre chez les ovins allaitants) rend maintenant difficile la finition des jeunes animaux à l'herbe, pourtant favorable à la qualité nutritionnelle et d'image de la viande. Les animaux manquent de précocité (aptitude à déposer du gras intramusculaire précocement), ce qui affecte le degré de finition et les qualités organoleptiques de la viande (manque de persillé). Après le sevrage, les jeunes bovins mâles issus des systèmes allaitants sont en majorité exportés vers des ateliers d'engraissement, où ils sont engraissés avec des rations à base d'ensilage de maïs et/ou de concentrés. Ces verrous sur l'engraissement des jeunes bovins à l'herbe impactent négativement les propriétés nutritionnelles de la viande (Berthelot et Gruffat, 2018 ; Duru *et al.*, 2017a), ses propriétés d'image et l'acceptabilité sociale de l'élevage (Delaby *et al.*, 2018), les performances environnementales des systèmes d'élevage (Morel *et al.*, 2016 ; Provenza *et al.*, 2019) ainsi que l'intensité de la compétition feed/food (Duru *et al.*, 2017b). Ils ne permettent pas non plus la complète valorisation de la viande produite en agriculture biologique. L'orientation vers des systèmes d'élevage plus herbagers et agro-écologiques questionne ainsi la génétique (critères de sélection et croisements) pour amener de la précocité. Des recherches étudient actuellement l'intérêt d'un croisement de races bovines françaises, classiquement tardives, avec des races herbagères précoces (type Angus) pour produire de la viande à partir d'animaux jeunes engraissés à l'herbe. Bien qu'à un degré moindre, les mêmes problèmes existent dans la filière des ovins allaitants (sélection pour le développement musculaire et contre le tissu adipeux entraînant des difficultés pour finir les agneaux à l'herbe). La filière ovine française s'est beaucoup orientée vers la production d'agneaux de bergerie, dont l'itinéraire technique est plus simple et qui permet un approvisionnement régulier de la filière aval en agneaux jeunes et de qualité peu variable. Ainsi, l'orientation vers des systèmes d'élevage plus agro-écologiques, avec engraissement des agneaux à l'herbe questionne la

génétique (précocité de finition et résistance au parasitisme, plutôt que la seule recherche de forts potentiels de croissance et développement musculaire) (Prache *et al.*, 2018).

Dans la filière porcine, compte tenu de l'importance des produits transformés et des effets défavorables sur les propriétés technologiques de la viande de la sélection génétique, visant surtout l'amélioration des performances zootechniques, un indice de qualité technologique de la viande (IQV, combinant des mesures de pH, de couleur et de rétention d'eau des muscles du jambon) a été inclus dans les objectifs de sélection des populations porcines françaises au début des années 1980, d'abord dans l'objectif d'éviter de dégrader les propriétés technologiques, et seulement depuis quelques années de les améliorer.

Pour la viande/chair de poisson, la sélection a privilégié la masse musculaire et le rendement en viande/chair, au détriment, peut-être, de la structure des tissus. L'attention est actuellement portée sur des défauts qui apparaissent fréquemment dans les tissus musculaires de plusieurs espèces animales (volailles, porcs et poissons). Ainsi, dans la production de poulet standard, sélectionné sur le rendement en filet, deux types de défauts du tissu musculaire sont désormais largement présents : le « wooden breast » et le « white stripping », dont la prévalence a fortement progressé au cours de la dernière décennie, en France, en Europe et dans le monde. La physiologie et la fonction du tissu musculaire sont altérées, avec le développement d'une fibrose et l'accumulation de tissu adipeux, qui au-delà du bien-être des animaux, altèrent les propriétés organoleptiques, nutritionnelles et technologiques, et conduisent à valoriser ces filets dans des produits 'prêts à consommer'. Chez le porc, le défaut dit de « viande déstructurée », détectable seulement après l'abattage, se traduit par la perte de l'intégrité tissulaire et l'apparition de défauts d'aspect et de texture du jambon cuit (trous dans les tranches, texture « pommade ») entrainant des pertes économiques importantes. A ce jour, l'étiologie de ces défauts n'est pas totalement élucidée, mais les scientifiques suggèrent que la sélection excessive vers des animaux de plus en plus lourds et présentant un rendement élevé en muscles (filets pour la volaille, jambon pour le porc) soit en cause. Ces exemples soulèvent des interrogations sur les effets collatéraux d'une sélection basée majoritairement sur un critère de productivité/rendement.

Enfin, la spécialisation de l'orientation productive (lait/viande/ponte) conduit aussi à des difficultés (voire des impasses) de valorisation de certains animaux ne remplissant pas les 'canons' de la qualité commerciale (animaux mâles dans les filières laitières et de ponte, notamment poussins et chevreaux, mais aussi chèvres de réforme). Ces impasses relancent le débat sur les races mixtes présentant un bon compromis entre viande et œufs ou lait et viande (comme la race Lacaune en brebis laitière qui permet d'engraisser des agneaux lourds) ou sur le croisement de races (Dezetter *et al.*, 2019). Il y a cependant un fort attachement des éleveurs, et au-delà de l'ensemble de la filière, à la notion de race, dont les démarches sous signe de qualité. Les gouvernements français et allemands viennent d'annoncer l'interdiction du broyage des poussins mâles en 2021. Il y a donc un besoin de recherche pour construire/instruire des solutions en rupture.

Des gènes responsables de défauts majeurs des propriétés technologiques de la viande porcine ont été identifiés (RYR1 et PRKAG3). Une méta-analyse sur les effets du gène RYR1 a confirmé l'effet délétère de l'allèle n sur de nombreux caractères de qualité (diminution du pH, augmentation des pertes en eau et de la luminance), y compris pour le génotype Nn par rapport au génotype NN ; de plus, il est bien établi que la fréquence de défaut de déstructuration de la viande est plus élevée chez les animaux porteurs de l'allèle n. Cependant, peu d'études explorent l'héritabilité de certains composants importants de la variabilité de certaines propriétés, en particulier celles déterminant la qualité sensorielle ou nutritionnelle. Il existe des variations interindividuelles importantes de la composition en AG du lait de ruminants, qui ont fait l'objet de travaux récents car cette variabilité peut être utilisée pour sélectionner les animaux dont le lait présente un profil en acides gras plus favorable à la santé humaine. La proportion de DHA dans la chair des poissons pourrait aussi être un caractère potentiellement héritable, mais il n'y a pas encore de familles ou de lignées sélectionnées sur ce caractère. De même, il y a encore des incertitudes sur le niveau d'héritabilité de la teneur du lait en calcium, qui varie beaucoup selon les études (de 0,1 à 0,6). Dans la filière porcine, le contrôle des niveaux d'androsténone des viandes de porcs mâles entiers par la voie génétique (sélection) est possible, mais il est nécessaire de veiller à ne pas altérer d'autres caractères, comme les performances de reproduction, ou d'autres composantes de la qualité des viandes (projet de recherche en cours). Concernant le scatol, autre composé responsable des odeurs indésirables des viandes porcines et ovines, les principaux leviers d'action ne concernent pas la sélection, mais la conduite d'élevage.

Les caractéristiques individuelles de l'animal qui influencent la qualité de ses produits : la race/type génétique, le type sexuel et l'âge

Le type génétique ou la race constitue un facteur important de variation des propriétés organoleptiques, cet effet pouvant être modulé par les conditions d'élevage. Les études comparatives présentent toutefois souvent le biais de considérer des animaux de stades physiologiques différents en raison des différences de maturité physiologique entre races. Ainsi, chez les bovins, des différences de précocité peuvent influencer la couleur et la tendreté de la viande. Les types génétiques anglo-

saxons et les races laitières, plus précoces que les races à viande continentales, présentent une viande plus rouge à un âge donné. Pour la qualité en bouche, la principale composante discriminée entre races est la tendreté, qui impacte fortement l'appréciation globale de la viande ; les différences sont liées aux caractéristiques des fibres musculaires (proportion de fibres blanches rapides glycolytiques inférieure dans les races laitières), de tissu conjonctif et à la teneur en lipides intramusculaires (LIM) qui varient entre races. Une étude portant sur 11 races bovines européennes a montré que les animaux de race Pirenaica produisent des viandes très tendres, juteuses et de flaveur élevée, alors que les animaux de race Simmental conduisent à des viandes dures, de moindre flaveur et moins juteuses (Lebret *et al.*, 2015). Au-delà de la race, le gène culard a un effet positif sur la tendreté de la viande bovine (Guillemin *et al.*, 2009).

Dans l'espèce porcine, certaines races donnent des viandes de propriétés organoleptiques élevées, dont les races à performances de croissance élevées Duroc (riche en LIM) ou Hampshire (appréciée en Europe du Nord), ainsi que les races locales à croissance lente et forte adiposité et dont la qualité gustative des produits est reconnue (Lebret *et al.*, 2015).

Le type sexuel peut aussi fortement influencer les propriétés organoleptiques via la composition de la chair. Dans l'espèce bovine, la viande des femelles et des mâles castrés est jugée plus tendre que celle des mâles entiers (c'est la raison pour laquelle les mâles entiers ne sont pas éligibles à labellisation dans le SIQO Label Rouge Gros Bovins), la jutosité et la flaveur étant supérieures pour les viandes de mâles castrés du fait de leur état d'engraissement plus élevé (Salifou *et al.*, 2013). Chez le porc, la viande de mâles entiers peut être plus dure que celle des mâles castrés ou des femelles, toutefois le principal problème qu'elle pose est le risque d'odeurs indésirables (odeurs sexuelles). De même, chez les agneaux élevés à l'herbe et donc abattus plus âgés que les agneaux engraissés en bergerie, la viande des mâles entiers peut présenter des défauts d'odeur/flaveur. La maturité sexuelle peut en effet entraîner ces défauts en lien avec les hormones mâles. La castration chirurgicale limite ce risque, mais fait l'objet de critiques ; la castration à vif des porcs mâles sera interdite en France dès 2022, seule la castration avec anesthésie et analgésie sera autorisée. L'immunocastration est une alternative possible qui a déjà fait la preuve de son efficacité et est pratiquée dans certains pays européens mais reste très minoritaire. Une autre alternative est de diminuer l'âge et le poids vif des animaux à l'abattage, afin qu'ils soient moins matures sexuellement ; cette pratique est utilisée en Grande Bretagne et au Portugal (Prunier et Bonneau, 2019), mais elle ne garantit pas totalement l'absence de défauts d'odeur. D'autres alternatives, en cours d'étude sont i) le contrôle du niveau d'androsténone par voie génétique, mais en veillant à ne pas altérer d'autres caractères (performances de reproduction, autres propriétés de la viande), ii) le contrôle du niveau de scatol par l'alimentation et les conditions d'élevage (porcs : propreté des animaux, ventilation, distribution d'un aliment humide plutôt que sec et d'aliments riches en glucides fermentescibles, non restriction de l'accès à l'eau de boisson, mise à jeun des animaux la veille de l'abattage ; ovins : finition courte en bergerie, apport d'aliments riches en glucides fermentescibles et/ou en tannins condensés). Il y a également besoin de recherches sur des méthodes de détection rapides et fiables sur la ligne d'abattage pour optimiser la valorisation des carcasses en fonction de leur niveau d'odeur.

Chez les salmonidés, la maturation sexuelle affecte les propriétés commerciales (rendements en carcasse et en filet) et organoleptiques (décoloration du muscle, les pigments mobilisés se concentrant dans les ovaires chez la femelle et la peau chez le mâle). Les alternatives sont i) de commercialiser les poissons avant la période de reproduction ou après une phase d'élevage permettant de restaurer la qualité, ou iii) la stérilisation avec des méthodes de triploïsation. Cette dernière option dégrade cependant le bien-être animal (stress physique sur les embryons).

L'âge des animaux à l'abattage influence les propriétés organoleptiques au-delà de la maturité sexuelle. Les poulets à croissance lente abattus à 81 j d'âge minimum se caractérisent par une viande plus ferme, moins juteuse et de flaveur plus intense que celle des poulets standards abattus à 40 j. Chez les bovins et les ovins, l'augmentation de l'âge à l'abattage s'accompagne d'une couleur plus rouge de la viande, en lien avec une augmentation de sa teneur en myoglobine, et d'une diminution de la tendreté (vaches de réforme vs génisses, ou bovins mâles entiers ou castrés de 33 vs 12 ou 24 mois). En revanche, une variation de l'âge (4 vs 9 ans) chez les vaches de réforme de races à viande ou laitières n'influence pas la tendreté de la viande. Quant à la flaveur, elle s'accroît avec l'âge des animaux en lien avec l'augmentation du taux de LIM. Chez les salmonidés, l'âge à l'abattage, qui correspond souvent à un type de produit différent (entier vs filet ou darne), affecte notablement les propriétés organoleptiques du produit. A signaler une forte dimension culturelle, variable entre pays, dans la consommation de certains produits carnés issus d'animaux jeunes des filières laitières (agneaux de lait, chevreaux, veaux). Il est à noter aussi que l'âge des animaux peut être un critère important pour le niveau de contamination du produit par les polluants environnementaux s'accumulant dans les tissus au cours de la vie de l'animal (viandes, chair de poisson, œufs) (Tressou *et al.*, 2017). C'est la raison pour laquelle la viande bovine présente un niveau de contamination par les PCFF / F généralement plus élevé que celui de la viande porcine ou de volailles, du fait à la fois de l'âge plus élevé de l'animal à l'abattage et de son niveau d'exposition plus élevé, du fait du pâturage (Tressou *et al.*, 2017).

Le poids, la conformation des animaux ou la taille des œufs sont des critères de tri et de classement/déclassement. Ces critères commerciaux facilitent la standardisation (notamment des manipulations à l'abattage), mais éliminent ou déclassent de la

consommation humaine des carcasses et des œufs dont les propriétés organoleptiques, nutritionnelles et sanitaires sont pourtant satisfaisantes. Dans certaines espèces (ovins notamment), ces aléas de poids ou de conformation peuvent être dus en partie à une alimentation insuffisante de la mère pendant la gestation en regard du nombre de fœtus. En aquaculture, certains facteurs d'élevage, notamment dans les stades précoces de développement de l'animal, telles que des carences alimentaires, des manipulations excessives, une qualité insuffisante de l'eau (teneur en oxygène) et un courant trop rapide sont sources de stress pour l'animal, et peuvent entraîner des malformations et des lésions du squelette et altérer la croissance, et au final être préjudiciables pour les propriétés commerciales ultérieures.

L'alimentation des animaux, facteur majeur des propriétés constitutives de la qualité de leurs produits

L'alimentation de l'animal (et plus largement le mode d'élevage) est un facteur déterminant i) des propriétés nutritionnelles et constitue un levier majeur pour les améliorer, du fait de son rôle dans la teneur en lipides et la qualité des AG déposés, mais également ii) des propriétés organoleptiques (également en lien, au moins en partie, avec la teneur en lipides et la qualité des AG) et iii) des propriétés d'image, du fait de l'importance accordée par les consommateurs aux conditions de vie des animaux, notamment les possibilités d'accès au plein air et à l'herbe (Delanoue *et al.*, 2018). Compte tenu de l'insuffisance de notre régime alimentaire en AGPI n-3 (oméga-3), un intérêt particulier est porté à cette famille d'AG, près de 60% des AGPI n-3 dans notre alimentation étant apportés par les produits animaux (Mourot, 2015). La composition en AG des produits animaux est fortement influencée par la nature des AG présents dans l'alimentation des animaux. Le lien entre les AG ingérés et ceux qui sont déposés dans les tissus est particulièrement fort pour les animaux monogastriques, moins pour les animaux polygastriques, en raison des transformations de certains AG dans le rumen. Pour les AG sécrétés dans le lait, intervient aussi la synthèse de novo dans la mamelle (Chilliard *et al.*, 2000).

L'herbe, notamment verte, jeune et à stade végétatif (feuillue) est riche à la fois en AGPI n-3 et en antioxydants. Chez les ruminants, l'alimentation à base d'herbe permet d'obtenir de manière naturelle des produits laitiers et carnés de haute valeur nutritionnelle, plus riches à la fois en AGPI n-3 (ALA, mais aussi EPA et DHA), en CLA et en antioxydants, et qui présentent une flaveur plus intense que ceux issus de systèmes plus intensifs, propriétés souvent valorisées à travers des Signes d'Identification de la Qualité et de l'Origine (SIQO) (Peyraud *et al.*, 2019). Les effets sur les teneurs en AGPI n-3 sont accrus avec des fourrages riches en légumineuses. Ces intérêts nutritionnels, organoleptiques et d'image des produits laitiers et carnés issus d'animaux alimentés à l'herbe sont encore accrus avec de l'herbe de prairies diversifiées et/ou de montagne (Martin *et al.*, 2019 ; Provenza *et al.*, 2019). Pour les fromages notamment, la composition botanique des pâturages a un effet très important sur les propriétés organoleptiques du fromage (texture et flaveur), bien que les mécanismes sous-jacents restent encore mal compris et qu'ils semblent complexes. Cet effet pourrait être dû à des composés issus directement ou indirectement des fourrages ingérés (terpènes, micro-organismes), ou produits par l'animal suite à l'ingestion de plantes particulières (acides gras, enzymes). Ces différences ne sont pas forcément la conséquence d'une diversité botanique spécifique, mais peuvent résulter de la présence d'une espèce susceptible d'avoir un effet spécifique sur certains composés du lait impliqués dans le processus d'élaboration des caractéristiques organoleptiques des fromages.

A noter qu'en France, tous systèmes confondus, 45% du lait provient d'animaux alimentés à l'herbe. Pour la viande, seulement 25% environ proviendrait d'une finition à l'herbe, cette évaluation étant entachée d'une grande incertitude (Duru, 2017).

Les viandes de porcs en plein air avec accès à des herbages présentent également un profil en AG plus favorable que celles issues d'animaux élevés en bâtiments et nourris à base d'aliments du commerce (Nilzen *et al.*, 2001) : proportions moindres en AGS (35 vs 36.9%) et plus élevées en AGPI (14,2 vs 12,4%) dont ALA (0,50 vs 0,40%), diminution du rapport, n-6/n-3 ; les différences sont faibles quant aux propriétés technologiques. Comme pour les autres productions, l'effet sur le profil en AG est généralement associé avec un enrichissement naturel des viandes en vitamine E et autres micronutriments, permettant de limiter ultérieurement les phénomènes d'oxydation dans les viandes. Ainsi, le pâturage des animaux est favorable aux propriétés nutritionnelles des viandes porcines via une modification du profil lipidique. Cet effet s'observe dans les systèmes d'élevage extensifs valorisant des races locales où les animaux ont accès au pâturage (plus ou moins selon la saison et la région) et sont alimentés exclusivement ou en partie à base de ressources locales (pâturage, glands, châtaignes…). Cette conduite alimentaire particulière favorise le dépôt et la synthèse endogène d'AGM, en particulier d'acide oléique C18 :1, ainsi que d'AGPI n-3 et de composés antioxydants à partir de ressources pâturées. L'enrichissement naturel des viandes en antioxydants est particulièrement important pour ces productions valorisées sous forme de produits secs de longue durée d'affinage, pour lesquels le contrôle de l'oxydation lipidique et protéique lors de la transformation est essentiel pour les propriétés nutritionnelles et organoleptiques. Au-delà, chez les porcs ibériques, la finition exclusive aux glands et à l'herbe vs en claustration avec une alimentation à base de concentrés favorise l'aspect, la texture, l'intensité d'arôme et de goût et diminue le gout salé du jambon sec. Ces différences peuvent s'expliquer par l'influence du mode de finition sur les propriétés biochimiques du muscle avant transformation (teneurs en lipides, profil en AG, composés antioxydants d'origine alimentaire)

et l'intensité de lipolyse lors de l'élaboration du produit. Cette influence de la nature de l'alimentation (glands ou ressources locales en système extensif vs aliment concentré) sur le niveau et la nature des composés volatils du jambon sec est bien établie. Chez les poules pondeuses, l'accès à un parcours herbager conduit également de manière naturelle à un meilleur profil en AG du jaune d'œuf (augmentation des teneurs en AGPI n-3, particulièrement de l'ALA et du DHA et diminution des teneurs en AGPI n-6 et du rapport n-6/n-3, ce dernier passant de la gamme 8.6-11.5 à 1.9-3.6 selon les saisons) et à une teneur plus élevée en antioxydants de celui-ci (alpha-tocophérol, flavonoïdes et caroténoïdes) (Mugnai *et al.*, 2014).

A noter qu'aux USA et au Royaume Uni, existent des logos 'produits à l'herbe' (Salami *et al.*, 2019). Des créneaux se développent aussi dans plusieurs pays comme l'Allemagne, l'Espagne, les Pays Bas, Le Royaume Uni ou la France (Peyraud *et al.*, 2019), mais il reste cependant difficile en Europe de choisir les produits en fonction des modes d'élevage, excepté pour les produits sous SIQO ou ceux issus de la filière Bleu-Blanc-Cœur, qui garantit une teneur en ALA plus élevée que pour les même produits 'standards' non labellisés (Duru et Magrini, 2017).

Exemple de l'intérêt nutritionnel de la viande produite à l'herbe. La viande de bovins ou d'ovins finis à l'herbe présente des teneurs en AGPI n-3, AGPI n-3 à longue chaine (LC) tels que l'EPA et le DHA, ainsi que CLA plus élevées que celle issue d'animaux nourris avec des rations à base de concentrés ou d'ensilage de maïs, et un rapport AGPI n-6/AGPI n-3 fortement réduit, ce qui est favorable à la santé humaine. Les valeurs présentées dans les tableaux ci-dessous, issues de Berthelot et Gruffat (Berthelot et Gruffat, 2018), montrent la quantité d'AG apportés par 100 g de muscle longissimus ; elles proviennent de deux bases de données et prennent en compte des possibles différences de teneur en lipides de la viande selon le régime alimentaire de l'animal. Cent grammes de viande bovine produite à l'herbe apportent ainsi : 570 mg d'acide palmitique, considéré comme pro-athérogène, vs 722 mg pour la viande issue d'un animal nourri avec un régime à base de concentrés (soit -21%) ; 33 vs 15 mg d'ALA ; 15 vs 8 mg d'EPA et 4 vs 2,3 mg de DHA, deux AGPI n-3 à longue chaîne connus pour leurs effets bénéfiques pour la santé humaine ; 12,6 vs 12,2 mg de CLA. De même, 100 g de viande d'agneau élevé à l'herbe apportent : 382 mg d'acide palmitique vs 600 mg pour la viande issue d'un animal nourri avec un régime à base de concentrés (soit -36%) ; 43 vs 22 mg d'ALA ; 21 vs 14 mg d'EPA et 10,6 vs 7,6 mg de DHA ; 26 vs 17 mg de CLA. Le rapport n-6 n-3, dont la valeur conditionne la synthèse d'EPA et DHA à partir de l'ALA (il est recommandé qu'il soit inférieur à 4), est beaucoup plus favorable pour la viande produite à l'herbe, et cela pour les deux espèces (2,4 et 2,7, soit rééquilibrant pour le régime alimentaire). La consommation de 100 g de viande ovine issue de ce muscle couvrirait ainsi 2,4% (43 mg) et 6,4% (32 mg) des apports quotidiens recommandés d'ALA et EPA+DHA si la viande est issue d'un agneau élevé à l'herbe vs 1,2% (22 mg) et 4,3% (21,6 mg) si la viande est issue d'un agneau élevé avec un régime à base de concentrés, sur la base d'une recommandation de 1 800 mg (ALA) et 500 mg (EPA+DHA) (Anses, 2015). De même, la consommation de 100 g de viande bovine issue de ce muscle couvrirait 1,8% (33 mg) et 3,8% (19 mg) des apports recommandés d'ALA et d'EPA+DHA si la viande est issue d'un bovin alimenté à l'herbe vs 0,8% (15 mg) et 2,1% (10,5 mg) si la viande est issue d'un bovin alimenté avec un régime à base de concentrés. Ce calcul ne prend cependant pas en compte l'augmentation potentielle de conversion de ALA en AGPI n-3 LC associée à la diminution du rapport LA/ALA. Il est bien sûr plus efficace, pour couvrir les besoins en AGPI n-3 à longue chaîne, de manger 100 g de poisson gras que 100 g de viande produite à l'herbe (100 g de saumon apporte en effet environ 1,48 g d'EPA+DHA, soit presque 3 fois le niveau des recommandations journalières). Cependant, les questions de la surexploitation des ressources marines et des risques de contamination des poissons gras par les polluants organiques persistants (POP) et les métaux lourds nécessitent de développer des approches complémentaires pour augmenter les niveaux d'ingestion d'AGPI n-3, ce qui incite toutes les filières animales à chercher à accroître ces teneurs dans les produits. L'objectif n'est pas d'avoir un produit qui comble à lui seul toutes les recommandations alimentaires, mais de viser des produits 'équilibrants' (Duru, 2017) et de combiner différentes sources.

Qualité des acides gras apportés par la viande bovine (mg/100 g de muscle *longissimus thoracis*) selon le régime de l'animal (issu de Berthelot et Gruffat (2018))

Régime à base de	Concentrés	Ensilage de maïs	Herbe
Acide palmitique (C16 :0)	722	538	570
AGPI totaux	352	178	229
AGPI n-3 totaux	35	19	63
C18 :3 n-3 (ALA)	15	10	33
C20 :5 n-3 (EPA)	8,2	3,6	14,9
C22 :5 n-3 (DPA)	17	6,6	22
C22 :6 n-3 (DHA)	2,3	2,0	4,0

CLA	8,2	9,2	12,6
C18 :2/C18 :3	20,3	13,3	5,8
AGPI n-6/AGPI n-3	10,0	8,70	2,4

Qualité des acides gras apportés par la viande ovine (mg/100 g de muscle longissimus) selon le régime de l'animal (issu de Berthelot et Gruffat (2018))

Régime à base de	Concentrés	Herbe
Acide palmitique (C16 :0)	600	382
AGPI totaux	314	280
AGPI n-3 totaux	50	85
C18 :3 n-3	22	43
C20 :5 n-3	14	21
C22 :5 n-3	23	23
C22 :6 n-3	7,6	10,6
CLA	17	26
C18 :2/C18 :3	11,0	3,7
AGPI n-6/AGPI n-3	7,71	2,66

Au-delà de l'herbe, de nombreuses études d'enrichissement des produits bruts et/ou transformés en AG d'intérêt en combinaison avec des antioxydants ont été réalisées depuis une vingtaine d'années pour préserver ou améliorer les propriétés nutritionnelles (apport d'AGPI n-3), organoleptiques (correction de la flaveur, limitation du rancissement), technologiques (limitation de la peroxydation lipidique) et sanitaires (effet antimicrobien de certains ingrédients antioxydants). Ces propriétés peuvent se construire aux deux étapes, à la fois au stade de la production (à travers l'alimentation de l'animal) et de la transformation. Par exemple, l'alimentation de l'animal avec des ingrédients riches en AGPI n-3 (graines de lin, lupin, féverole, colza, voire algues riches en oméga-3 LC ; farine ou huiles de poisson en aquaculture), les modalités d'élaboration du produit transformé (remplacement d'une partie des graisses animales par des graisses végétales, incorporation d'huile de poisson encapsulée), en combinaison avec des antioxydants pour protéger les produits de l'oxydation, peuvent y contribuer. Les taux d'incorporation des ingrédients riches en oméga-3 dans l'alimentation animale ne doivent cependant pas dépasser un certain seuil pour éviter le risque d'apparition d'odeurs de rance dans le produit fini. Le lin est très utilisé ; il est souvent introduit dans le régime sous forme de graines de lin extrudées, l'extrusion permettant de rendre les graines plus digestibles, et la cuisson-extrusion permettant de détruire les facteurs anti-nutritionnels. Le tableau ci-dessous illustre des modifications possibles de la teneur en AGPI n-3, du rapport LA/ALA et de la proportion des apports recommandés couverts, pour différents produits animaux, lorsque des graines de lin extrudées sont apportées dans l'aliment des animaux (Mourot, 2015).

Effet de l'apport de graines de lin extrudées dans l'aliment des animaux sur la teneur en AGPI n-3 de différents produits animaux 'bruts' (mg d'acides gras/100 g de produit) et sur la proportion des apports recommandés couverts par la consommation de 100 g de produit (Mourot, 2015)

		ALA	EPA+DHA	LA/ALA
Côte de porc	témoin	63 (3,5%)	10 (2%)	14
	+ GLE	300 (17%)	19 (3,8%)	3
Filet de poulet	témoin	3 (0,2%)	8 (1,6%)	5,4
	+ GLE	26 (1,4%)	18 (3,6%)	2,8
Œuf	témoin	40 (2,2%)	81 (16,2%)	8,5
	+ GLE	352 (19,6%)	185 (37%)	1,5

L'accumulation du précurseur ALA chez les animaux recevant une alimentation riche en AG n-3 à partir de graines de lin extrudées est positive par rapport aux besoins de l'homme en ALA, mais les besoins en EPA et surtout DHA restent peu couverts (sauf pour les œufs), en raison des compétitions entre les désaturases et élongases qui sont communes pour les AGPI n-6 et n-3. L'apport direct de DHA à l'animal à partir de micro-algues donne des effets intéressants chez le porc, la volaille de chair et la poule pondeuse (Baeza *et al.*, 2015 ; Mourot, 2015), mais qui ne sont pas intéressants économiquement aux

doses apportées. Cette stratégie d'amélioration du profil lipidique de la viande par l'alimentation fonctionne aussi pour les produits transformés cuits ou crus (par exemple, andouille, pâté de campagne, poitrine rôtie, saucisson, pour les produits de porc), mais elle est moins adaptée pour la production de jambon sec (de type Parme, par exemple) pour lequel l'acceptabilité globale, l'odeur et le goût sont altérés en raison de l'oxydation des AGPI. L'ajout d'antioxydants (tocopherols) peut limiter la peroxydation lipidique, mais il en faut suffisamment. Dans les systèmes de production extensifs, la consommation par les porcs d'herbe riche en AGPI n-3 et en composés antioxydants permet d'accroitre simultanément leurs teneurs tissulaires et de prévenir une oxydation excessive des AGPI, néfaste pour la flaveur voire pour les propriétés nutritionnelles des produits (génération de composés toxiques).

Duru (2017) a synthétisé les informations relatives à l'équilibre entre ALA et LA pour les différents produits animaux, hormis le poisson, selon le régime alimentaire et le mode d'élevage des animaux dont ils sont issus (voir Figure 1 ci-dessous). Les teneurs courantes en LA et ALA conduisent à un rapport LA/ALA souvent déséquilibrant pour la diète (> 5), sauf dans le cas d'une alimentation des ruminants à l'herbe (qui permet de doubler la teneur en ALA pour le lait et la viande de ruminants, comme indiqué plus haut). Des modes d'alimentation 'alternatifs' des animaux, existant le plus souvent à l'état de niches, permettent d'augmenter la teneur en ALA : le remplacement des tourteaux de soja et de tournesol par du tourteau de colza, l'accès au pâturage pour les monogastriques se traduisent par une augmentation des teneurs en ALA permettant d'obtenir des produits 'équilibrants' (lait, viande de poulet, viande bovine) ou de s'en approcher (œufs, viande porcine) (flèches horizontales courtes). L'apport de lin se traduit par l'obtention de produits 'équilibrants' (LA/ALA < 5, voire à 2, voir aussi la figure ci-dessous) (flèches horizontales longues).

Cet auteur a comparé la situation actuelle, en termes d'alimentation des animaux et de quantité de chacun des produits laitiers et carnés consommés, à 2 scénarios, l'un maximisant la place de l'herbe et optimisant le choix des tourteaux et huiles ajoutées, le second consistant en un apport de lin (exemple de la filière Bleu-Blanc-Cœur). Sur la base des quantités actuelles de produits laitiers et carnés consommées, les scénarios 1 et 2 permettent respectivement de doubler et de tripler l'apport d'ALA, le rapport LA/ALA moyen passant de déséquilibrant (>5) à équilibrant (<5) ; toutefois, le supplément d'apport d'ALA (entre 0,19 et 0,45 g/j pour les scénarios 'herbe' et 'lin' n'est pas suffisant pour combler le déficit actuellement chiffré à 0,9 g/j.

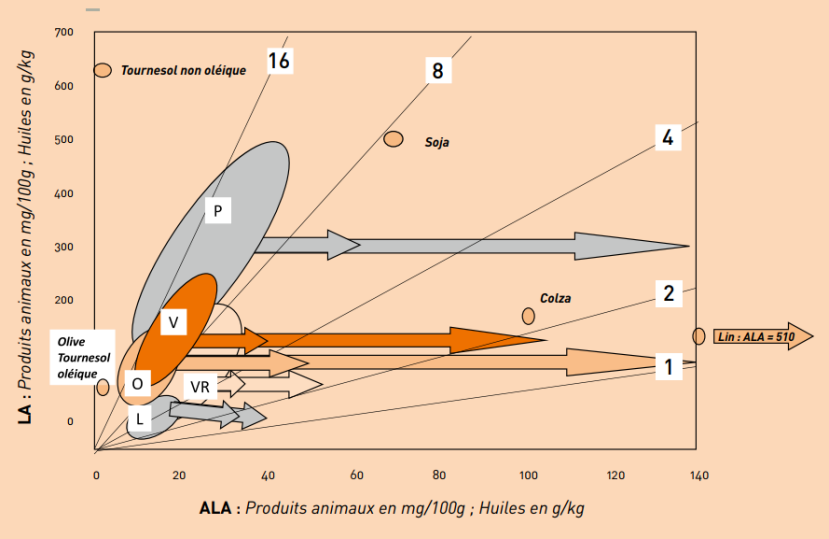


Figure 2.10.2 Relations entre les teneurs en acides alpha-linolénique (ALA) et linoléique (LA) pour les différents produits animaux (ellipses et flèches) et huiles végétales (petits ronds) pour les viandes de porc (P), volaille (V), viandes rouges (VR), le lait (L) et les œufs (O)

Légende : L'ellipse correspond à la composition des produits animaux en ALA et LA pour les régimes alimentaires animaux les plus courants. La petite flèche traduit le changement moyen par remplacement de tourteaux (ex du colza à la place du soja) ou l'accès à un parcours herbeux pour les monogastriques ; la grande flèche correspond à l'addition de lin. La grande surface de l'ellipse pour les monogastriques rend compte de la forte variabilité des produits (différents morceaux). La longueur des flèches est donnée à titre indicatif compte tenu de la forte variabilité observée en fonction de la quantité d'huiles (toutes espèces) et de l'importance du pâturage (monogastriques).

Les antioxydants, nécessaires pour protéger les AGPI de l'oxydation, peuvent être apportés par l'alimentation de l'animal (vitamine E, tannins, polyphénols, lycopène…), mais des travaux visent aussi à modifier les procédés de transformation en ajoutant des composés antioxydants (épices, herbes aromatiques, huiles essentielles, marc de raisin, extraits de thé, etc.) lors

de l'élaboration du produit. Les phénomènes de peroxydation peuvent aussi être réduits en limitant les traitements thermiques à haute température et en conservant le produit en l'absence d'oxygène. Le chapitre 6 propose des exemples de leviers d'amélioration de ces propriétés en lien avec la composition en acides gras des lipides des produits (élevage des animaux à l'herbe, reformulation des produits, démarche Bleu-Blanc-Cœur).

La « végétalisation » de l'alimentation des salmonidés, qui sont des poissons carnivores, répond à des impératifs de durabilité (abaisser la pression de la pêche minotière sur les peuplements de poissons), sanitaires (contamination de la chair par des métaux lourds et des POP) et de coûts (les nutriments d'origine végétale sont moins chers). La part des farines de poissons dans les aliments est ainsi tombée à 28% (vs. 89% en 1999) et pourrait être encore divisée par deux d'ici peu. La réduction de la part animale aquatique dans l'alimentation des poissons gras d'élevage a permis de réduire la contamination de leur chair en POP : ainsi, entre 1999 et 2011, la teneur en PCDD/F + DL-PCB dans la chair de saumon norvégien a baissé de 2,0 à 0,6 µg/g. Mais l'enjeu en regard est de ne pas réduire la teneur en AGPI n-3 à longue chaîne (EPA et DHA), qui est un atout de la chair des poissons gras. Les stratégies alimentaires concentrent donc l'apport en farine et huile de poisson sur les derniers mois avant l'abattage. La grande plasticité des lipides musculaires permet en effet de restaurer la composition optimale des lipides de la chair. Le cahier des charges de l'agriculture biologique ne suit pas cette évolution, car, au nom du respect du comportement naturel de l'animal, il oblige un minimum de 40% d'aliments d'origine animale pour les poissons carnivores, comme la truite ou le saumon. Il reste aussi à expliquer les mécanismes d'orientation des dépôts lipidiques vers la cavité abdominale plutôt que vers le muscle, car on observe ainsi que de forts taux de substitution des matières premières issues de poissons par des matières premières d'origine végétale augmentent les dépôts lipidiques dans cavité abdominale, sans changer ceux du muscle.

La valorisation des coproduits est une des perspectives en élevage pour apporter à l'animal une proportion plus importante de végétaux non consommables par l'homme, afin de limiter la compétition homme-animal pour les ressources alimentaires. Les animaux d'élevage valorisent depuis longtemps de nombreux coproduits de l'agriculture et de l'industrie agro-alimentaire, issus de cultures (pailles de céréales ou légumineuses, spathes de maïs, retraits ou écarts de tri de fruits et légumes…), de la transformation des oléo-protéagineux (tourteaux végétaux), des céréales (sons et issues de meunerie, coproduits de distillerie et de production de bioéthanol), de la production d'agro-carburants, de l'industrie sucrière (pulpe de betterave), de la transformation de racines et tubercules, de fruits et légumes (dont les coproduits de la filière viti-vinicole), ainsi que d'herbes, arbustes et arbres... L'introduction de ces coproduits dans l'alimentation animale, par les industriels du secteur ou directement par les éleveurs, se développe et ces coproduits tendent à se diversifier). De même l'utilisation de protéines autres que celles du soja (pois, féverole, lupin) est visée pour limiter son importation, la dépendance économique aux pays tiers, et l'impact environnemental qu'elle engendre. En région méditerranéenne, des produits tels que des pulpes de légumes ou d'agrumes ou des grignons d'olive sont par exemple inclus dans la ration des ruminants (laitiers et allaitants). Ces coproduits végétaux peuvent représenter une ressource alimentaire importante pour les ruminants ; leur utilisation permet ainsi réduire la compétition food-feed et d'atténuer les impacts environnementaux du secteur des ruminants. Leurs effets sur les teneurs du lait en protéines et matières grasses sont encore peu documentés (Vasta *et al.*, 2008). Une synthèse récente (Salami *et al.*, 2019), qui passe en revue tout un ensemble de coproduits végétaux, conclut que, globalement, leur utilisation dans l'alimentation des ruminants permet de diminuer l'impact environnemental de la production de viande de ruminants sans compromettre la qualité de la viande et son acceptabilité par les consommateurs. L'utilisation de certains de ces coproduits, qui contiennent des quantités importantes de composés bioactifs tels que des vitamines, des acides gras insaturés et des composés secondaires (composés phénoliques, tannins, flavonoïdes…), dans l'alimentation des ruminants, peut permettre d'améliorer les propriétés nutritionnelles (profil en AG des lipides) et la durée de conservation des viandes et produits carnés tout en réduisant les émissions de méthane et d'azote par les animaux. Certains coproduits contenant des lipides résiduels et des composés bioactifs peuvent par exemple réduire la biohydrogénation ruminale et augmenter la synthèse endogène d'AG bénéfiques dans le tissu musculaire, ceci résultant en un accroissement des teneurs en AGPI et CLA et une réduction des teneurs en AGS et du rapport n-6/n-3 dans la viande de ruminant (Vasta et Luciano, 2011). C'est le cas, par exemple, des pulpes d'agrumes et des coproduits de la grenade (Salami *et al.*, 2019). L'inclusion de 10 à 20% de coproduits de la pomme de terre (dont la transformation conduit à une production importante de coproduits) dans des rations de bovins à base d'orge ou de maïs, a peu d'effet sur le pH du muscle, sa composition en AG et ses propriétés organoleptiques (Thornton *et al.*, 2015). Mais, certains auteurs (Pen *et al.*, 2005) ont montré des effets positifs de la distribution de coproduits de la pomme de terre sous forme ensilée sur le profil en AG et la stabilité oxydative de la viande bovine, en lien avec la présence de composés phénoliques (notamment dans la pelure du tubercule). A l'inverse, des coproduits issus de l'extraction de l'huile de végétaux riches en AGS ou dont les lipides sont plus sensibles à l'hydrolyse et l'hydrogénation ruminale peuvent conduire à des viandes dont le profil en AG est moins intéressant : c'est le cas avec les coproduits de l'huile de palme et ceux issus de l'extraction d'huile de cardon (plante méditerranéenne). La supplémentation des animaux avec des coproduits

végétaux contenant des tannins peut améliorer la flaveur de la viande grâce à la capacité des tannins à inhiber la bioconversion des protéines en scatol et indole (Rivaroli *et al.*, 2019; Schreurs *et al.*, 2008) lesquels peuvent provoquer des défauts de flaveur dans la viande ovine (Devincenzi *et al.*, 2014 ; Devincenzi *et al.*; Rivaroli *et al.*, 2019 ; Tavendale *et al.*, 2005). L'effet antioxydant de composés bioactifs présents dans certains coproduits végétaux (vitamine E, composés phénoliques, flavonoïdes) peut aussi permettre de ralentir l'oxydation de la viande et ses effets délétères sur la couleur et la flaveur, et ainsi augmenter la durée de conservation des produits carnés (Salami *et al.*, 2016; Vasta et Luciano, 2011). C'est le cas par exemple des coproduits du raisin et de la grenade (riches en polyphénols) et des pulpes d'agrumes (riches en vitamine E). A noter le peu d'informations sur l'effet de coproduits d'herbes et d'épices (comme les distillats de feuilles de sauge, de thym, de romarin et de thé) sur la qualité de la viande, malgré un intérêt croissant pour leurs extraits phénoliques. La distribution à des brebis de concentrés contenant ces extraits a conduit à une amélioration du profil en AG des lipides de la viande de leurs agneaux et une meilleure conservation de celle-ci (en termes de couleur, flaveur, stabilité oxydative et microbiologique). Cependant, comme les herbes et épices peuvent avoir une flaveur forte, il faut encore évaluer l'effet de l'utilisation de leurs coproduits dans l'alimentation des animaux sur la flaveur de la viande et son acceptabilité par les consommateurs. Des études sont par ailleurs encore nécessaires pour optimiser les avantages potentiels des coproduits, par exemple en combinant ceux qui permettent d'enrichir la viande en AGPI et ceux qui sont riches en antioxydants.

Chez les monogastriques, les tourteaux d'oléo-protéagineux sont utilisés de longue date pour leur richesse en protéines, qui permet d'équilibrer les rations majoritairement à base de céréales ; le recours à d'autres ressources protéiques est toutefois actuellement favorisé, comme dans les autres filières animales, afin de réduire la dépendance à ces produits importés. Certains végétaux intéressants en termes de source protéique comme le colza contiennent des glucosinolates, substances naturelles induisant une inappétence (odeur et goût amers) et des désordres physiologiques, toutefois le développement de variétés de colza pauvres en glucosinolates permettent jusqu'à 18% d'incorporation de tourteau de colza dans l'aliment (forme sèche) des porcs en finition (Maupertuis *et al.*, 2001). Les « drêches de distillerie séchées avec les solubles » (DDGS en anglais), coproduits issus de la fabrication d'éthanol à partir de maïs, sont utilisées en alimentation porcine pour leur teneur 3 fois supérieure de la plupart des acides aminés relativement au blé (ces AA étant toutefois moins digestibles) et leur teneur élevée en phosphore digestible. Leur faible coût favorise leur utilisation en remplacement partiel du tourteau de soja, cependant ces DDGS contiennent 4 à 12% d'huile de maïs, riche en AG linoléique (C18 :2) qui est défavorable à la qualité des tissus gras du porc (manque de fermeté, risque d'oxydation pendant la conservation des produits) (Stein et Shurson, 2009). Par ailleurs, les DDGS présentent des teneurs élevées en fibres (x 3 relativement au maïs ou au blé), peu digestibles chez le porc surtout en phase de croissance ; elles réduisent la digestibilité des nutriments et de l'énergie, accroissent le poids du contenu intestinal et par conséquent diminuent le rendement en carcasse, donc leur valeur commerciale (Coble *et al.*, 2017). L'arrêt d'apports en DDGS dans l'alimentation environ un mois avant l'abattage permettrait de concilier les intérêts nutritionnels et économiques de ce coproduit tout en limitant son impact négatif sur le rendement carcasse et la qualité des produits du porc.

Il est important de rappeler que de façon générale, la nature des AG alimentaires influence directement la composition des tissus chez le porc et, positivement ou négativement, les propriétés nutritionnelles (apports d'AGPI n-3 / dégradation des AG essentiels et formation de composés toxiques) et sensorielles (produits d'oxydation pouvant améliorer ou à l'inverse altérer la flaveur) des produits (Jiang et Xiong, 2016; Mourot et Lebret, 2009). Il est donc très important de considérer la nature des AG constitutifs des coproduits utilisés. L'incorporation d'antioxydants dans les rations peut pallier les inconvénients associés, et de nombreux travaux ont été conduits chez le porc, comme chez les ruminants ou les volailles, pour évaluer l'intérêt de l'incorporation de végétaux (herbes, fruits, feuilles), d'extraits végétaux (par exemple les catéchines du thé) ou épices aux propriétés anti-oxydantes, pour limiter l'oxydation des lipides et des protéines et l'altération des propriétés sensorielles (flaveur, couleur) ou nutritionnelles des produits (Falowo *et al.*, 2014 ; Tomovic *et al.*, 2017). Enfin, il faut noter que l'alimentation est un levier d'action pour limiter la production intestinale de scatol (à partir de l'acide aminé tryptophane), élevée chez les mâles entiers ; le scatol se dépose dans les tissus gras et contribue au odeurs indésirables de la viande. L'utilisation de matières premières riches en fibres fermentescibles (fructo-oligosaccharides, inuline ou autres polysaccarides complexes) stimule la croissance bactérienne intestinale et oriente leurs processus fermentaires, contribuant à limiter la production de scatol. Des effets favorables ont ainsi été obtenus avec l'apport pendant quelques semaines précédant l'abattage d'amidon cru de pomme de terre, de chicorée ou de lupin (Parois *et al.*, 2018).

La valorisation dans l'alimentation du porc comme des autres espèces de coproduits de l'industrie agricole et alimentaire présente donc de multiples intérêts, toutefois il est nécessaire d'évaluer précisément la valeur nutritionnelle (moyenne, variabilité) de ces coproduits afin d'optimiser leur utilisation chez les différentes espèces, et en fonction du stade physiologique. Il y a aussi besoin de recherches sur l'impact de l'utilisation des coproduits végétaux sur les propriétés sanitaires de la viande, impacts qui sont peu documentés. Des végétaux contaminés peuvent transférer des agents

pathogènes à leurs coproduits et des contaminations croisées de coproduits végétaux peuvent aussi survenir durant les manipulations et transformations en aliments pour animaux. Des contaminations microbiennes peuvent par ailleurs concerner les coproduits végétaux à teneur en eau élevée. Au final, il faut une approche interdisciplinaire pour caractériser la composition chimique de ces coproduits, développer des technologies de transformation rentables et économes en énergie, et apprécier les effets de leur incorporation dans l'alimentation animale sur la productivité animale, l'impact environnemental des productions et les différentes dimensions de la qualité des produits, dans les différentes filières. De plus, Salami et al. (2019) soulignent qu'il pourrait y avoir un intérêt à tirer avantage des propriétés d'image, en promouvant la valeur des produits issus d'animaux nourris avec des coproduits végétaux, comme à la fois respectueux de l'environnement et présentant une qualité spécifique. Enfin, il y a besoin d'études pour documenter leur disponibilité locale et les possibles facteurs limitant leur utilisation.

L'exposition aux risques sanitaires

Tous les modes d'élevage sont exposés aux deux principaux pathogènes, *Salmonella* et *Campylobacter*. Cette prévalence est élevée dans les élevages de volailles notamment. Elle n'induit pas un niveau de risque élevé sauf accidents sanitaires, lesquels interviennent généralement en aval de l'élevage, lors des étapes de première transformation par contamination des carcasses, du lait et des œufs ou bien lors de la conservation puis de la préparation des repas à la maison, par contamination croisée entre aliments (utilisation d'un même couteau pour des légumes mal lavés et de la viande par exemple). Au-delà de ces deux pathogènes majeurs, l'exposition aux risques sanitaires varie selon les modes d'élevages.

Les élevages en bâtiment, présentant une forte densité d'animaux, sont logiquement sensibles aux maladies épidémiques et à la pollution de l'air ambiant du fait de l'émission de poussières et de gaz (ammoniac dégagé par les effluents) causant des troubles respiratoires. Cette problématique contribue à la mauvaise image des élevages intensifs. Les voies de contaminations chimiques proviennent d'une part des aliments du bétail (végétaux contaminés par des contaminants tels que des POP, des mycotoxines et des résidus chimiques, tels que les pesticides ; huiles et farines de poissons contaminés par des POP) et d'autre part du contact avec des matériaux traités (structures en bois traité avec du pentachlorophénol ou avec des retardateurs de flamme ou litières issues de matières contaminées recyclées) qui peut entraîner des contaminations des viandes, lait et œufs en PCDD / F et/ou HBCD).

L'accès au plein air expose les animaux aux contaminants environnementaux, qu'ils soient biologiques (agents pathogènes, par exemple, parasites et virus) ou chimiques (par ex., POP -dioxines, furanes, PCBs, pesticides-, éléments traces métalliques, principalement le plomb) avec des répercussions potentielles sur les teneurs en contaminants dans la viande, le lait, les œufs et le poisson. Les contaminants environnementaux chimiques sont liés à *l'activité industrielle*, laquelle peut donner lieu à contamination très persistante dans le temps, et à *l'incinération de déchets*. Ils ne peuvent pas être facilement maîtrisés sauf à établir un diagnostic préalable à l'installation d'un élevage. Il faut signaler cependant que l'installation d'élevages n'est pas soumise « en routine » à un diagnostic de la qualité sanitaire de son environnement, incluant les activités émettrices à proximité, présentes et passées. À notre connaissance, seul le cahier des charges AB des poissons prévoit ce diagnostic. Par ailleurs, l'élevage en plein-air est considéré comme le facteur de risque majeur pour *l'introduction et la dissémination de l'influenza aviaire* ce qui conduit au confinement des animaux lors du passage des oiseaux sauvages migrateurs. Les virus influenza aviaires peuvent contaminer l'homme, le premier facteur de risque étant le contact direct avec une volaille contaminée vivante ou morte. Quelques cas ont résulté de la consommation de produits de volailles non cuits.

L'exposition humaine aux contaminants environnementaux provient majoritairement de l'alimentation (plus de 90% de l'exposition totale pour les PCBs (Tressou *et al.*, 2017), notamment des produits animaux. En Europe, les contaminations environnementales et alimentaires par des POP (dioxines et furanes, polychlorobiphényles) diminuent lentement grâce à l'entrée en vigueur en 2004 de la Convention de Stockholm et à l'adoption d'une stratégie de l'UE visant à réduire l'exposition humaine via la chaîne alimentaire (Hoogenboom *et al.*, 2015b; Nizzetto *et al.*, 2010). L'apport hebdomadaire tolérable pour les humains, qui était de 14 pg d'équivalents toxiques (TEQ)/kg de poids corporel, établi pour la somme des PCDD / F et PCB de type dioxine (DL-PCB) a été récemment révisé par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) et réduit à 2 pg TEQ/kg pc par semaine (Efsa Panel Contaminants Food Chain, 2018). Ces valeurs sont obtenues en se basant sur des études toxicologiques réalisées chez l'animal et en appliquant des marges de sécurité prenant en compte les différences de susceptibilité entre espèces et entre individus. Une partie de la population de l'UE dépasse cet apport hebdomadaire tolérable. En décembre 2011, le règlement 1259/2011, applicable depuis le premier janvier 2012, a révisé le règlement précédent en abaissant les teneurs maximales en dioxines et PCB de type dioxines et en introduisant des teneurs maximales pour les PCB-NDL dans les aliments pour l'homme. Il y a également en Europe une législation sur les aliments pour animaux qui oblige les fournisseurs/processeurs de matières premières ou de premix et les assembleurs à vérifier les teneurs en POP de leurs intrants et à écarter ceux dont les teneurs dépassent les limites autorisées (ou à les traiter comme c'est le cas pour l'huile de poisson) (European union, 2011 ; 2012 ; 2013). Mécaniquement, les fortes teneurs dans les aliments formulés

pour animaux ont ainsi tendance à disparaître, ce qui fait baisser la moyenne d'exposition des animaux et rend très peu probables les cas de sur-contamination déjà vécus (par ex, argile, pulpes d'agrumes, huiles très contaminées comme dans le cas dit des 'poulets à la dioxine' en 1999). Globalement, cela réduit aujourd'hui la variabilité de la contribution des aliments formulés à l'exposition des animaux, la centre sur une valeur basse, et les cas isolés de dépassement sont plutôt dus à des problèmes environnementaux. Malgré l'amélioration progressive des mesures de gestion du risque, des contaminations accidentelles des aliments pour animaux (pulpes d'agrumes, argile,…) et des denrées alimentaires peuvent encore survenir, en raison par exemple i) de sols contaminés, ii) de combustions en plein air (Hoogenboom *et al.*, 2015b ; Weber *et al.*, 2018a) et iii) d'accidents industriels. Le sol et les sédiments sont considérés comme un compartiment réservoir pour les POP et les éléments traces métalliques (ETM), leur contamination peut ainsi avoir une origine très ancienne. Les ETM peuvent être transférés du sol aux végétaux, tandis que les POP, peu absorbés, contaminent majoritairement les végétaux par dépôt aérien. Pour les parcours de particuliers, le « fond de jardin » est souvent le lieu de brûlage ou d'entreposage de déchets, mais peut aussi être lié à la proximité des sources émettrices extérieures, notamment en milieu périurbain. Les incinérateurs (de déchets ménagers ou industriels) sans traitement des fumées ont été identifiés comme une des sources les plus répandues pour la contamination de l'environnement extérieur avec des répercussions sur les œufs, la viande et le lait produit à proximité. Le modèle d'autoconsommation chez les riverains de ces structures est celui qui conduit aux expositions les plus fortes et pose des questions de santé publique.

Une publication récente (Lorenzi *et al.*, 2020) sur le lait de vache a étudié la phase d'exposition (expérimentale) aux contaminants et la phase d'élimination pour aider à gérer le risque dans des zones ayant des antécédents de pollution ou lors d'épisodes accidentels. Parmi les aliments d'origine animale, le lait et les produits laitiers sont en effet une source importante d'exposition pour l'homme aux PCDD/F (polychlorés dibenzo-*p*-dioxines and dibenzofuranes) et aux PCB biphenyls polychlorés, en raison de leur niveau de consommation élevé. Le lait de vache a ainsi été impliqué à plusieurs reprises dans des épisodes de pollution, ce qui démontre la vulnérabilité des étapes de production du lait à ces contaminants (Esposito *et al.*, 2009). L'étude de Lorenzi *et al.* (2020) a étudié la cinétique d'accumulation et d'élimination de 17 dibenzo-p-dioxines polychlorées et dibenzofuranes (PCDD/F), de 12 biphényles polychlorés de type dioxine (DL-PCB) et de 6 PCB autres que ceux de type dioxine (NDL-PCB) dans le lait de vache. La ration était expérimentalement enrichie en ces différentes molécules pendant 49 jours, puis les animaux recevaient une alimentation non contaminée, ce qui permettait d'évaluer la cinétique d'épuisement des contaminants. Dès 1 semaine d'exposition, la limite maximale autorisée dans le lait était dépassée pour les teneurs en PCDD/F et DL-PCB ; la conformité du lait était restaurée après une semaine d'alimentation avec un régime non contaminé, mais il a fallu 42 jours pour revenir à l'état basal initial. Le transfert des contaminants PCDD/F et DL-PCB de l'aliment au lait est donc rapide. Par ailleurs, cette étude montre qu'une alimentation des vaches avec un aliment dont la teneur en contaminants est juste en deçà de la limite autorisée peut conduire à un dépassement de la teneur réglementaire dans le lait, comme cela avait déjà été montré pour le lait de vache (Hoogenboom *et al.*, 2015a), ainsi que pour les œufs et la viande bovine (Hoogenboom *et al.*, 2006 ; Hoogenboom *et al.*, 2015b; Weber, 2017 ; Weber *et al.*, 2018b). Le seuil limite de teneur dans les aliments pour animaux est donc une démarche vertueuse, qui a fait ses preuves, mais n'est pas complètement "infaillible". Cependant, le retrait des aliments contaminés de l'alimentation des animaux a permis de restaurer la conformité du lait après 1 semaine de retrait.

Pour la viande, deux études ont été conduites sur un large échantillonnage représentatif des viandes de volailles aviaires, bovines et porcines françaises, en agriculture biologique ou conventionnelle (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017; Tressou *et al.*, 2017), quant à leur teneur en plus de 250 contaminants chimiques (micropolluants environnementaux, dont POP et métaux lourds, mycotoxines, résidus de traitements phytosanitaires ou vétérinaires). Les résultats montrent des niveaux de contamination inférieurs aux seuils réglementaires pour tous les échantillons, mais davantage de traces de contaminants environnementaux (dioxines, PCBs, HBCD, Zn, Cu, Cd, Pb, As) dans les viandes issues de l'agriculture biologique. Qu'il s'agisse de viande porcine, bovine ou de volailles ou de bovins, les durées d'élevage supérieures et l'accès au plein air pourraient expliquer cette bioaccumulation accrue des polluants environnementaux en élevages bio, en lien avec un degré et une durée d'exposition plus élevés. Les auteurs n'ont pas détecté de résidus de traitements vétérinaires (antibiotiques) ni de résidus de traitements phytosanitaires (pesticides), ni pour les viandes bio ni pour les viandes conventionnelles, et ils concluent que ces produits animaux sont de très faibles contributeurs à l'exposition aux mycotoxines. Des études ont également montré que les œufs produits à partir de poules en plein air (plein air obligatoire en bio) pouvaient contenir plus de dioxines à cause de contacts plus intenses avec le sol, qui est un réservoir important pour ce type de contaminants (2006; Pussemier *et al.*, 2004), les niveaux les plus élevés étant observés dans les élevages de particuliers. Un lien est d'ailleurs démontré entre la teneur en PCDD/F, PCB, PBDE et en plomb dans les œufs et le sol. La plupart des échantillons européens qui dépassent les limites maximales fixées pour les œufs (quand elles existent) sont issus soit d'élevages de particuliers, soit professionnels avec accès à un parcours ; dans certaines séries de données, c'est jusqu'à 10% de ces œufs qui dépassent les limites réglementaires.

Au-delà de l'étape d'élevage, Tressou *et al.* (2017) ont évalué l'effet de la cuisson et de ses modalités sur la teneur de la viande bovine en PCBs, ainsi que l'exposition correspondante des consommateurs compte tenu du niveau de consommation. Ils ont montré que la cuisson réduit le niveau de contamination de la viande (pertes via le jus de cuisson) et ceci d'autant plus que l'intensité de cuisson augmente. Concernant les DL-PCB (dioxine-like PCB), une intensité de cuisson de type bien cuit réduit leur concentration et le niveau d'ingestion correspondant : 0,058 pg WHO-TEQ_{2005}/kg de poids corporel (pc) /semaine pour une intensité de cuisson bien cuit vs. 0,066 et 0,069 pg WHO-TEQ_{2005}/kg pc/semaine pour des intensités de cuisson saignant et moyenne respectivement. Après digestion, le niveau d'exposition (ingestion) diminue encore à 0,017, 0,018 et 0,012 pg WHO-TEQ_{2005}/kg pc/ semaine respectivement pour des intensités de cuisson saignant, moyenne et bien cuit, car seulement un quart des PCBs est capable de traverser la barrière intestinale et d'induire un éventuel effet toxique. L'exposition avant digestion (apports) doit être comparée à l'apport hebdomadaire provisoire tolérable de l'Agence européenne de sécurité des aliments défini pour la somme des DL-PCB, furanes et dioxines. Ce travail montre que l'évaluation des risques doit être affinée par le mode de transformation (ici cuisson) et aussi par la physiologie digestive.

Dans les élevages aquacoles basés sur une utilisation de la chaîne trophique aquatique, c'est la contamination du milieu qui influence celle des poissons ; dans ceux où le milieu est artificialisé (élevage intensif où l'alimentation est apportée sous forme d'aliment formulé), c'est principalement l'aliment composé qui est vecteur des contaminants. Les farines et huiles issues de la pêche minotière peuvent contenir des métaux lourds (methylmercure) et polluants organiques persistants (POP, les plus étudiés étant les PCB et PCDD/F) que les poissons ont accumulés dans leur chair et qui se retrouvent *in fine* dans celle des poissons d'élevage qui les ingèrent. Cette contamination potentielle questionne les élevages aquacoles de salmonidés biologiques qui privilégient l'approvisionnement marin (au moins 50% vs 28% actuellement pour le conventionnel), car il est plus proche du comportement naturel carnivore du poisson, par rapport aux formules « végétalisées » qui progressent dans les élevages conventionnels. Cependant, les sources végétales peuvent aussi faire émerger d'autres risques de polluants, tels que des pesticides, les mycotoxines (au champ ou lors du stockage) et les HAP (introduits lors de l'extraction à chaud des huiles végétales) ; de plus, leur utilisation a des conséquences négatives sur les teneurs en AGPI de la chair. Plusieurs solutions sont actuellement proposées et partiellement mises en œuvre: la décontamination de l'huile de poisson (principal vecteur des POP), l'utilisation d'algues marines riches en AGPI et la sélection de l'origine géographique des farines et des huiles de poisson. La première abaisse la teneur en polluants tout en conservant les AGPI, la deuxième conserve une source marine riche en AGPI et, située en bas de la chaîne trophique est donc pauvre en POP.

Etape de transformation

Les modalités de la cuisson influencent la plupart des propriétés constitutives de la qualité de la viande. Elles sont cependant difficiles à contrôler chez les particuliers, puisque c'est la seule étape, outre la durée et les conditions de conservation, qui dépend du consommateur. Au-delà de la maîtrise des risques associés aux dangers microbiologiques pour lesquels la cuisson joue un rôle primordial (en particulier pour la viande hachée), ses modalités (durée et intensité du traitement thermique, humidité, éventuellement ingrédients ajoutés) influencent les qualités nutritionnelles, organoleptiques et technologiques de la viande et des produits carnés. D'une façon générale, la cuisson de la viande entraîne une expulsion de l'eau naturellement présente dans la viande vers l'espace extracellulaire qui migre ensuite vers l'extérieur du morceau, pouvant entraîner des pertes importantes en nutriments solubles par expulsion dans les jus de cuisson. Ces pertes d'eau s'accompagnent de la perte de petites molécules hydrosolubles d'intérêt nutritionnel comme des peptides bioactifs, une partie des oligoéléments d'intérêt (fer héminique, zinc, sélénium) et des vitamines thermosensibles (B12, B3 et B6) ; à l'inverse, comme elles concentrent les lipides, les teneurs en lipides et en AG des viandes cuites sont plus élevées que celles des viandes crues. Ces pertes en jus dépendent de la teneur en eau initiale de la viande et de la cinétique de la température à l'intérieur de la viande, elle-même liée à la taille des morceaux. Malgré ces pertes de molécules d'intérêt nutritionnel, les viandes cuites présentent des teneurs élevées (et une bonne biodisponibilité) en zinc, ainsi qu'en sélénium et elles sont d'importantes contributrices aux apports en vitamines B3 et B12 quel que soit le mode de cuisson. C'est également le cas pour l'apport en vitamine B6 par les viandes grillées, poêlées ou rôties, mais moins pour les viandes braisées ou bouillies. Enfin, les viandes cuites restent de très bons vecteurs de fer malgré des pertes significatives de fer et de fer héminique pour les cuissons longues : 100 g de viande cuite grillée, poêlée ou rôtie apportent autant de fer que 100 g de viande crue ; pour les viandes braisées ou bouillies, le rapport fer héminique/fer total reste inchangé, donc compte tenu de la bonne biodisponibilité du fer héminique, la contribution de ce type de viandes aux apports en fer reste intéressante (Gruffat, 2018). Enfin, l'amplitude de dénaturation thermique des protéines module leur vitesse de digestion et éventuellement leur valeur nutritionnelle, mais la composition de la viande en acides aminés n'est pas altérée par la cuisson (Gruffat, 2018). Pour certains produits transformés (nuggets de volailles, par exemple), les modalités de cuisson peuvent faire varier fortement la teneur en lipides à cause de la prise d'huile.

La cuisson des viandes peut également influencer leurs propriétés nutritionnelles en exacerbant les réactions d'oxydation. L'oxydation des lipides mono ou poly insaturés lors d'un traitement thermique est activée par le présence d'ions métalliques comme le cuivre et le fer, ces oligominéraux agissant comme des catalyseurs pour former des radicaux libres très instables, ce qui conduit à la propagation des réactions d'oxydation. La peroxydation des lipides augmente avec le temps et la température de cuisson (Gatellier et al., 2010), certains produits terminaux de la peroxydation lipidique étant génotoxiques et cytotoxiques. Il est ainsi souhaitable de privilégier des modalités qui minimisent ces phénomènes, c'est-à-dire des cuissons à basse température (et de durée plus longue) (Gruffat, 2018).

Les produits d'oxydation générés lors de la cuisson participent cependant au développement de composés aromatiques et donc à la flaveur des viandes. La maîtrise des conditions de cuisson est donc primordiale pour concilier à la fois les propriétés nutritionnelles et organoleptiques des viandes. La flaveur de la viande cuite dépend ainsi de la composition initiale de la viande crue (en particulier, teneur en lipides et profil en AG, teneur en antioxydants et pro-oxydants -fer héminique et non héminique-) et de l'intensité de l'oxydation au cours de la cuisson. Si la flaveur s'améliore avec la température de cuisson, la jutosité diminue et la viande durcit, il y a donc un équilibre à trouver entre flaveur, tendreté et jutosité. La viande s'attendrit en cuisson humide prolongée grâce à la solubilisation du collagène en gélatine.

Ainsi, une cuisson excessive (température, durée élevées) de viande bovine de première catégorie (pauvre en tissu conjonctif ; steaks, rôtis) produit des pertes de jus importantes, dégrade la tendreté (contraction excessive du matériel myofibrillaire), les propriétés nutritionnelles (extraction de petites molécules hydrosolubles, bioaccessibilité des enzymes digestives, produits terminaux de la peroxydation des lipides) et sanitaires (composés néoformés pendant la cuisson de la viande qui sont impliqués dans l'association entre consommation de viande de boucherie et risque de cancer). Une viande riche en collagène réticulé dont la durée de cuisson en condition humide est insuffisante restera dure.

La cuisson peut aussi conduire à la formation d'autres composés néoformés préjudiciables à la santé. Des hydrocarbures aromatiques présents dans les fumées peuvent se retrouver en surface de viandes grillées au barbecue. D'autre part, un chauffage prolongé des produits carnés et du poisson (> 90-100°C) favorise la formation d'amines aromatiques hétérocycliques (AAHs) mutagènes à la surface du produit (dans la 'croûte') par la réaction de Maillard, formation qui augmente avec la durée et la température de cuisson. Le degré de cuisson est souvent estimé au travers de la couleur de la viande cuite, mais cela reste imprécis. Les garnitures de pizza, telles que le jambon et le salami peuvent conduire à une formation importante de ces composés. Enfin, il peut y avoir production d'acrylamide, molécule reconnue comme cancérigène, dans les produits panés et frits type nuggets de poulet. Cette molécule se forme spontanément à partir de sucres et d'asparagine (un acide aminé) lors de cuissons à des températures élevées (au-dessus de 120°C) d'aliments riches en protéines et en glucides (amidon, sucres) ou rôtis.

Les conditions de cuisson (couple temps/température) affectant l'amplitude et la cinétique de pertes de jus, elles modulent ainsi les rendements de cuisson et les propriétés technologiques. Des additifs comme les polyphosphates améliorent sensiblement la rétention d'eau des viandes de porc à la cuisson, mais ces additifs sont de moins en moins acceptés par les consommateurs, et ils ne sont pas autorisées en France pour la production de jambon supérieur. Le sel nitrité a un effet antimicrobien et organoleptique (couleur rose et flaveur), mais il pose également des problèmes d'acceptabilité.

La cuisson longue à basse température (environ 60°C, généralement sous vide) améliore la tendreté tout en limitant les pertes de jus. D'autre procédés comme les hautes pressions, les ondes de chocs hydrodynamiques, les traitements ultrasons ou encore les champs électriques pulsés sont à l'étude pour tenter d'améliorer la texture de viandes après cuisson (voir Chapitre 6).

Le traitement thermique du lait influence fortement les propriétés organoleptiques, sanitaires et d'image du fromage

L'épuration microbienne du lait (traitement thermique, bactofugation, microfiltration) pour éliminer les germes pathogènes potentiellement présents dans le lait cru détruit aussi, au moins en partie, les écosystèmes microbiens naturels. Bien que cette microflore naturelle soit souvent minoritaire (ensemencement lactique massif), elle joue néanmoins un rôle déterminant sur les caractéristiques organoleptiques des fromages. La diversité et l'abondance des communautés microbiennes naturellement présentes dans le lait cru génèrent en effet de la diversité organoleptique dans le fromage. Les fromages fabriqués avec un lait appauvri en microorganismes sont moins riches en composés volatils et présentent des arômes moins intenses, moins complexes et moins divers que ceux fabriqués au lait cru ; ces constats ont été rapportés dans des technologies de type pâte pressée cuite ou non cuite, en comparant des produits issus de fabrication au lait cru, ou au lait microfiltré ou pasteurisé. La pasteurisation réduit en effet la lipolyse et la protéolyse qui génèrent une diversité de composants odorants (incluant les acides, les alcools, les cétones, les esters et les acides aminés). Les populations microbiennes riches et diversifiées du lait cru peuvent aussi exercer un effet barrière vis-à-vis du développement des germes pathogènes, en particulier *Listeria monocytogenes*. L'enjeu pour la transformation fromagère au lait cru est donc de produire

un lait riche en flore microbienne d'intérêt pour la transformation, qui ne soit pas (ou peu) contaminé par des flores d'altération et qui ne présente pas de flores pathogènes. Les pratiques d'hygiène modérées autour de la traite sont notamment associées aux laits avec un niveau élevé de flore d'intérêt pour la fabrication fromagère fermière. Les connaissances sur les déterminants de la composition microbiologique du lait cru, bien qu'en cours de développement, sont cependant encore insuffisantes.

Etape de conservation

La congélation longue favorise le développement d'odeurs de rance en raison de l'oxydation des lipides favorisées par la libération de substances pro-oxydantes (fer héminique) suite à l'altération des membranes cellulaires lors de la congélation. La durée de conservation à l'état congelé dépend donc des caractéristiques tissulaires qui influencent la péroxydation lipidique (teneur en lipides et composition en acides gras, équilibre teneur en pro-oxydants/antioxydants) et type d'emballage (sous-vide ou non).

Etapes clés à risque majeur de dégradation de la qualité

Sont concernées les étapes d'élevage, de pré-abattage et abattage pour les viandes et la chair de poissons (propriétés organoleptiques -couleur, texture/tendreté-, propriétés sanitaires -développement microbien-, propriétés technologiques -pouvoir de rétention d'eau-) ; de conservation et cuisson (propriétés sanitaires, organoleptiques, nutritionnelles, et santé avec les produits néoformés). Certaines étapes et procédés de transformation peuvent aussi être délétères pour les propriétés nutritionnelles : par exemple pour les volailles, on peut passer d'un filet riche en protéines et à faible teneur en lipides à des produits élaborés riches en lipides, hydrates de carbone et sel (par exemple nuggets). En outre, des effets d'interactions entre les différentes étapes clés peuvent conduire à une altération majeure de la qualité des produits.

Etape d'élevage. Dans certaines espèces animales, une sous-alimentation de la mère en gestation peut affecter le poids et la conformation de la carcasse de l'animal à naître, ainsi que le poids de certaines pièces nobles, même avec des conditions d'alimentation plus favorables ultérieurement ; la construction de la qualité commence alors avant même la naissance de l'animal. C'est le cas en élevage ovin viande ; au-delà, dans cette espèce, une sous-alimentation de la mère en gestation peut affecter la croissance ultérieure du jeune et obérer sa finition à l'herbe (favorable aux propriétés nutritionnelles et d'image) avant la fin de la saison de pâturage. En aquaculture, certains facteurs et pratiques d'élevage, notamment dans les stades précoces de développement de l'animal, telles que des carences alimentaires (minéraux, vitamines), des manipulations excessives (tris, vaccinations, changements de bassin), une qualité insuffisante de l'eau (teneur en oxygène) et un courant trop rapide sont sources de stress pour l'animal, et peuvent entraîner des malformations et des lésions du squelette et altérer sa croissance, et au final être préjudiciables pour les propriétés commerciales ultérieures. En élevage laitier, la conservation de l'herbe sous forme d'ensilage entraîne un risque accru de contamination du lait par des spores butyriques qui peut induire ultérieurement des gonflements et des défauts d'ouverture du fromage à pâte pressée (Parmesan ou Comté), et des goûts/odeurs désagréables, ce qui conduit certaines filières fromagères à interdire cette pratique.

L'étape d'élevage est également à risque pour la contamination chimique. L'accès au plein air expose les animaux aux contaminants environnementaux, avec des répercussions possibles sur la viande, le lait et surtout les œufs qui captent particulièrement ces polluants, l'autoconsommation à partir d'élevages 'de fond de jardin' conduisant aux expositions les plus élevées et posant des questions de santé publique. La contamination peut aussi s'effectuer par les aliments composés et le contact avec des matériaux traités (bâtiments) ou des litières issues de matières recyclées. Une préconisation serait de réaliser un diagnostic de l'environnement (dont les matériaux et bâtiments) avant installation des élevages, incluant les activités émettrices à proximité, présentes et passées.

Etapes de pré-abattage et d'abattage. Les conditions d'abattage des animaux, quelle que soit l'espèce, revêtent une importance capitale car elles peuvent affecter les propriétés sanitaires, organoleptiques, technologiques et d'image des produits. Outre l'impact évident sur le bien-être animal et l'image négative que renvoient de mauvaises conditions d'abattage, le stress de pré-abattage et une mauvaise maîtrise de la technologie d'abattage (système d'étourdissement, saignée et éviscération, refroidissement et stockage des carcasses) peuvent conduire à des défauts de qualité de la viande et de la chair de poisson. Les propriétés nutritionnelles, elles, ne sont pas affectées.

Les conditions appliquées durant la période précédant immédiatement l'abattage ou durant celui-ci influencent fortement la qualité microbiologique des viandes et leur aptitude à la conservation. La maîtrise de ces conditions est primordiale quand on sait que certaines viandes (viande bovine, par ex) peuvent être consommées crues (tartare, carpaccio) et qu'elles nécessitent une maturation pour obtenir une tendreté optimale. Avant leur transport, les animaux sont souvent mis à jeun pour éviter des souillures de la carcasse lors de l'éviscération. Le stress des animaux pendant le transport à l'abattoir influence l'excrétion fécale de *Salmonella* et *E. Coli* pathogène, ainsi que la contamination des animaux avant l'abattage. La maîtrise de l'hygiène des procédures d'abattage est ensuite essentielle pour la maîtrise de l'ensemble des dangers biologiques. La

règlementation du paquet hygiène définit les obligations des professionnels (application des bonnes pratiques d'hygiène, HACCP, traçabilité des produits) et des services de contrôle (inspection des animaux et des carcasses). Le statut sanitaire des animaux à la ferme, les conditions de transport et d'attente avant l'abattage, l'application des bonnes pratiques d'hygiène et de l'HACCP sont des facteurs essentiels de la maîtrise des flores bactériennes des viandes. Le profil temps-température des produits à la sortie de l'abattoir conditionne les niveaux des flores bactériennes pathogènes et d'altération.

Le stress de l'animal en pré-abattage est déterminant pour les propriétés organoleptiques et technologiques de la viande et de la chair. En réponse au stress, l'animal secrète des hormones qui libèrent une partie des réserves énergétiques, indispensables pour l'augmentation de vigilance et les réponses comportementales. Les propriétés des viandes et de la chair de poissons sont fortement impactées par les réactions physiologiques induites par le stress et qui perdurent dans les muscles après abattage. Le processus d'acidification du muscle post-mortem, qui est normal et nécessaire pour la transformation du muscle en viande, peut être modifié par le stress. La vitesse et l'amplitude de l'acidification du muscle influencent les propriétés organoleptiques (couleur, tendreté, jutosité, goût), technologiques (vitesse et amplitude de chute du pH, capacité de rétention d'eau) et l'aptitude à la conservation de la viande/chair. On peut distinguer deux niveaux de stress pré-abattage, même si les 2 interagissent : le stress de long-terme, associé aux manipulations des animaux (chargement, transport, déchargement) qui peut induire des défauts de qualité associés à l'amplitude de chute du pH (une amplitude trop faible conduit à des viandes DFD, de l'anglais Dark Firm Dry –couleur sombre, mauvaise conservation, mauvais goût-, en lien avec une acidification insuffisante par manque de réserves en énergie dans le muscle ; une amplitude trop élevée qui conduit à des viandes acides et des risques accrus de déstructuration en viande porcine) et le stress de court terme, lié aux conditions d'attente en abattoir et de conduite au poste d'anesthésie, qui peuvent conduire au défaut PSE de l'anglais Pale Soft Exudative (viande claire qui perd son eau, dure après la cuisson, en lien avec l'accélération des réactions biochimiques qui induit une acidification trop rapide).

La proportion de fibres blanches et de fibres rouges dans le muscle gouverne les réponses en termes de métabolisme *post mortem* et par conséquent de qualité de la viande et de la chair. A la suite de stress précédant l'abattage (liés à un changement d'environnement, au chargement, transport, déchargement, à une activité physique inhabituelle, aux combats lors de regroupement de lots d'animaux ou lors de l'hébergement en abattoir…), les ruminants, dont la musculature contient une forte proportion de fibres rouges (gros bovins, ovins) vont produire des viandes à coupe sombre (ou à pH élevé, ou DFD). Ces viandes ont une couleur sombre, peu attractive pour le consommateur, elles sont plus dures et leur durée de conservation est réduite (les microorganismes s'y développent plus rapidement). La réactivité au stress d'un animal dépend de ses expériences au cours de l'élevage. Par exemple, elle est peut-être moins élevée chez les animaux élevés en bâtiments, qui sont plus habitués à la proximité des congénères et ont souvent des contacts plus fréquents avec l'homme que ceux élevés en plein air, toutefois des résultats inverses (moindre stress chez des animaux élevés en élevage extérieur lorsqu'ils sont placés dans un nouvel environnement comme le camion de transport ou l'abattoir) ont aussi été observés. Par ailleurs, le niveau alimentaire pendant les quelques semaines qui précèdent l'abattage est important pour préserver un niveau de glycogène musculaire suffisant, lequel pourra être mobilisé et évitera un pH ultime élevé de la viande. Il peut être contrôlé en assurant un niveau minimum de croissance des animaux. De plus, les carcasses de ces animaux sont sensibles à la contracture au froid qui survient si la carcasse est refroidie trop rapidement après la saignée. La viande issue de muscles contractés au froid restera dure quelle que soit la durée de maturation.

Les espèces à viande blanche (porc, veau, volailles) sont peu sujettes à la production de viandes à coupe sombre et à la contracture au froid pour des raisons inhérentes à leur physiologie musculaire et au poids des carcasses. Elles sont en revanches sensibles au stress de pré-abattage précédant de quelques minutes leur mise à mort (bousculades dans le couloir d'amenée au poste d'étourdissement, brutalités, utilisation d'aiguillons électriques) et à l'impact de l'étourdissement sur l'accélération du métabolisme musculaire. Un stress trop élevé conduit à des viandes « acides », dont le pH ultime trop bas induit une couleur claire de la viande et surtout une réduction des rendements à la cuisson. L'accélération du métabolisme musculaire se prolonge après la saignée et entraîne une dénaturation des protéines avec pour conséquence des exsudations de la viande fraiche, une couleur pâle et une viande dure. Ces viandes sont appelées PSE ou viandes « pisseuses » dans le jargon professionnel. Chez le porc, ce défaut peut provenir du génotype des animaux (gène halothane), mais il peut aussi être induit par de mauvaises conditions pré-abattage et d'abattage. Ce défaut de qualité en viande fraîche peut avoir des répercussions importantes sur la qualité des produits cuits saumurés : le faible pouvoir de rétention d'eau conduit à des pertes anormalement élevées de jus à la cuisson, impactant les rendements technologiques des charcuteries cuites ainsi que leurs propriétés organoleptiques, en particulier la jutosité. Un tri sur le pH est généralement effectué en industrie pour écarter de la transformation en jambon cuit les pièces à pH ultime trop bas. Ce défaut peut être induit par une durée de mise à jeun trop courte avant l'abattage, entraînant le maintien d'un niveau élevé de réserves en glycogène musculaire et une amplitude importante de diminution du pH post mortem. La sélection génétique visant à augmenter la vitesse de croissance des

animaux et la teneur en maigre des carcasses a aussi contribué, via une modification du métabolisme musculaire, à une réduction du pH ultime et du rendement technologique de la viande.

L'évolution des types génétiques vers des animaux de plus en plus lourds et dont les muscles sont plus riches en fibres blanches, plus volumineuses que les fibres rouges, entraîne aujourd'hui l'apparition, encore confidentielle, de viandes PSE chez certaines races bovines.

Lors des manipulations et du transport des animaux, toutes les dispositions permettant de limiter les facteurs d'agression susceptibles d'induire des défauts de qualité des carcasses et des viandes sont à privilégier : quai d'embarquement pour faciliter le tri puis le chargement des animaux, non mélange d'animaux de lots différents, véhicules de transport adaptés, respect des densités de chargement, durée et conditions de transport. Les conditions de transport des animaux sont soumises à la réglementation européenne. Outre la protection des animaux, l'ensemble de ces dispositions vise à favoriser les caractéristiques qualitatives des viandes. A l'arrivée à l'abattoir, une durée minimale de repos est nécessaire pour ne pas dégrader la qualité de la viande. La conduite des animaux au poste d'abattage est également cruciale pour la qualité de la viande.

Les plans de filière bovine, ovine et caprine proposés fin 2018 suite aux EGA soulignent le besoin d'un maillage abattage/collecte sur tout le territoire.

Etape de cuisson. Si la maîtrise de la chaîne du froid impacte la croissance des dangers microbiologiques des viandes, les pratiques de cuisson des viandes hachées présentent le principal facteur de risque au niveau des consommateurs ; l'étape de cuisson est ainsi essentielle pour la maîtrise des dangers microbiologiques (elle détruit tout ou partie des microorganismes). Elle peut cependant être à risque pour les propriétés organoleptiques (défaut de texture si la durée et la température de cuisson sont mal adaptées) et nutritionnelles, ainsi que pour les effets sur la santé, à travers la formation de certains composés néoformés ; si certains de ces composés ont un rôle positif en concourant au développement de l'odeur et du goût, d'autres sont délétères pour la santé comme les amines hétérocycliques aromatiques (AHA) ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont cancérigènes. Il faut noter que c'est surtout la cuisson au barbecue (charbon de bois) qui génère AHA et HAP. Il convient donc de contrôler au mieux les conditions de cuisson des viandes pour assurer une durée de vie satisfaisante du produit sans altérer ses qualités organoleptiques et nutritionnelles. Enfin, il peut y avoir production d'acrylamide dans les produits panés et frits type nuggets de poulet. C'est une molécule reconnue comme cancérigène. Elle se forme spontanément à partir de sucres et d'asparagine (un acide aminé) lors de cuissons (four, friture, rôtissage, etc.) à des températures élevées (au-dessus de 120°C) d'aliments riches en protéines et en glucides (amidon, sucres) ou rôtis. Afin de limiter la formation de ce composé, il est possible par exemple d'incorporer à la panure du bicarbonate de sodium ou des antioxydants avant la cuisson.

A l'inverse, nous pouvons pointer des étapes qui permettent de restaurer une qualité médiocre à l'issue des étapes précédentes

Nous pouvons citer l'exemple de l'étape de finition des poissons en élevage qui permet de restaurer les teneurs en AGPI n-3 à longue chaîne (EPA et DHA) après une période d'alimentation végé-substituée. Les critiques sur la pêche minotière, la crise de l'ESB et le règlement européen visant à réduire les teneurs en polluants environnementaux ont entraîné de profondes modifications de la composition des aliments pour les poissons carnivores dont le saumon (végétalisation) qui réduit la teneur de la chair en EPA et DHA. Cependant, du fait de la grande plasticité des lipides musculaires, il est possible de restaurer ces teneurs avec une alimentation à base d'huile de poisson durant les derniers mois précédant l'abattage. De même, dans les élevages à circuits recirculés où il y a un risque de défauts de flaveur en lien avec des micro-organismes persistants du fait de la recirculation de l'eau, la finition des poissons en eau claire est une stratégie efficace.

L'étape de transformation peut permettre également de corriger un défaut de qualité. Le hachage de la viande (bovine, en particulier) solutionne les défauts de tendreté pour les morceaux de l'avant de la carcasse riches en collagène. En porc, les transformateurs cherchent à repérer les viandes de mâle entier présentant des odeurs indésirables trop fortes, pour les diluer à faible proportion dans les mêlées de produits de charcuterie, pour corriger les odeurs désagréables avec des arômes et épices ou pour élaborer des produits à consommer froid ou fumés. C'est également le cas pour la viande ovine, ce qui permet de valoriser les morceaux les moins nobles ou provenant d'animaux âgés. L'étape de transformation peut ainsi permettre de gérer la variabilité de qualité des produits bruts. Etape de consommation. Les pratiques alimentaires peuvent permettre de limiter de potentiels effets délétères de certains produits d'origine animale lorsqu'ils sont consommés en excès. Pour les consommateurs peu sensibles aux recommandations de limiter la consommation de viande rouge et de charcuteries, une proposition est d'associer ces produits au cours du repas avec un produit laitier riche en calcium ou un produit riche en antioxydants pour limiter la peroxydation lipidique et le risque de carcinogénèse colorectale.

Nous pointons également des étapes qui permettent d'anticiper des défauts de qualité

-L'ajout d'antioxydants dans l'alimentation animale permet de protéger les AGPI de la peroxydation à laquelle ils sont sensibles ; ces antioxydants peuvent aussi être ajoutés pendant la fabrication de produits transformés. Cela permet de limiter les effets délétères éventuels sur les propriétés organoleptiques (en lien avec des défauts d'odeur et de flaveur dus à l'oxydation des AGPI), nutritionnelles (perte nutritionnelle par dégradation des AG essentiels LA et ALA) et « valeur santé » (limitation de la formation d'amines hétérocycliques dans les viandes soumises à traitement thermique et d'acrylamide dans les produits panés et frits type nuggets de poulet, limitation de la peroxydation lipidique et de la nitrosation dans le tractus digestif). La teneur en vitamines, en particulier en vitamine E, qui permet de limiter l'oxydation des lipides pendant la transformation et la conservation des produits, dépend directement de l'alimentation de l'animal. Cependant, de façon générale, les antioxydants, dont la vit E doivent être ajoutés à des doses modérées afin de limiter le risque de pro-oxydation conduisant à effet inverse à celui recherché. Des travaux sont actuellement conduits pour évaluer l'efficacité des antioxydants naturels et optimiser leur durée de distribution pour obtenir une réponse favorable tout en limitant le surcoût alimentaire. De nombreuses études évaluent l'incorporation de végétaux (herbes, fruits, feuilles), d'extraits végétaux (catéchines du thé) ou d'épices aux propriétés antioxydants sur la réduction de l'oxydation des lipides, des protéines, et l'altération de la flaveur ou de la couleur de la viande. Leur activité antioxydante est due à des composés phénoliques (terpènes, flavonoïdes et huiles volatiles) qui inhibent la formation ou limitent la diffusion de radicaux libres, et des minéraux (sélénium, zinc) ou vitamines (A, C et E) qui agissent comme co-facteurs d'enzymes anti-oxydantes.

-Les conditions d'alimentation pendant les semaines qui précèdent l'abattage sont importantes pour anticiper des défauts de qualité de la viande. Chez les bovins et les ovins, le niveau alimentaire pendant cette période est important pour préserver un niveau de glycogène musculaire suffisant, lequel pourra être mobilisé et évitera un pH ultime élevé de la viande ; il peut être contrôlé en assurant un niveau minimum de croissance des animaux. Chez le porc, une supplémentation alimentaire en magnésium pendant la phase d'élevage ou même seulement les quelques jours précédant l'abattage permet de limiter la réponse au stress des animaux et ses conséquences néfastes sur les propriétés technologiques et organoleptiques des viandes (moindre incidence des viandes de type PSE, amélioration de la capacité de rétention en eau et de la couleur de la viande). De même, une supplémentation alimentaire en méthionine (acide aminé précurseur de la cystéine constitutive du glutathion, un antioxydant cellulaire majeur) pendant 2 semaines avant abattage diminue le risque d'oxydation des lipides et améliore la couleur de la viande au cours de sa conservation en lien avec une augmentation des teneurs en glutathion dans le tissu musculaire à l'abattage.

-Un tri des carcasses ou pièces de viande sur la base de certains caractères de qualité est effectué en abattoir dans certaines filières : par exemple, la viande de porc est triée sur la valeur du pH ultime afin d'assurer une qualité technologique optimale ; les jambons destinés à l'élaboration de jambons secs sont triés sur l'épaisseur de gras dorsal pour optimiser leurs propriétés technologiques et organoleptiques.

Nous pointons également des étapes de transformation qui gomment ou à l'inverse accentuent des variations possibles de qualité du produit liées aux conditions de production

Les conditions de production du lait marquent davantage les caractéristiques du fromage lorsque le lait subit peu de traitements préalables à sa transformation. Par exemple, les industriels standardisant le ratio TB/TP du lait, les facteurs d'amont susceptibles de le modifier n'ont alors pas d'effet sur les caractéristiques des fromages. De plus, si l'effet de la nature de l'alimentation des animaux est important dans le cas de fabrications au lait cru, cet effet est faible, voire inexistant, dans le cas de fabrications au lait pasteurisé, ce qui alimente les controverses entre filières 'au lait cru' et 'au lait pasteurisé'. On observe en effet des interactions notables entre le régime alimentaire des vaches et le traitement thermique du lait. Si les effets du pâturage sur la couleur et la texture du fromage sont identiques que le lait soit cru ou pasteurisé, en revanche, les effets sur la flaveur du fromage sont très atténués lorsque le lait est pasteurisé. La pasteurisation réduit en effet la lipolyse et la protéolyse qui génèrent une diversité de composants odorants incluant les acides, les alcools, les cétones, les esters et les acides aminés. Par ailleurs, les différences organoleptiques du fromage liées à la conduite des animaux s'amplifient avec la durée de l'affinage. Sur le plan des saveurs, des odeurs et des arômes, les fromages issus d'animaux au pâturage sont globalement plus corsés, l'affinage accentuant encore ces différences. Les effets du pâturage sur les propriétés organoleptiques (saveurs, odeurs, arômes et texture) semblent plus importants sur les fromages à pâte pressée que sur les fromages à pâte molle, car leur teneur en matières grasses est moindre. Les liens entre la composition botanique des prairies et qualités organoleptiques (texture et/ou flaveur) étant de nature différente selon le type de fromage, les conditions et la durée d'affinage, il n'est pas possible actuellement d'établir des liens génériques entre un type botanique ou la présence de certaines plantes dans les fourrages consommés par les vaches (pâturage ou foin) et des caractéristiques organoleptiques particulières des fromages.

Exemples de 'renforcement' de la qualité aux différentes étapes de la chaîne d'élaboration du produit

-Enrichissement en AGPI n-3 en combinaison avec des antioxydants lors des étapes de production (alimentation des animaux) et de transformation (formulation des produits carnés) pour améliorer les propriétés nutritionnelles, organoleptiques (flaveur) et de santé.

- Label Rouge Gros bovins de boucherie : les choix et les engagements des cahiers des charges de ce SIQO concernent toute la chaîne d'élaboration du produit depuis le choix de la race et du type d'animal éligibles jusqu'au mode de conditionnement de la viande, en passant par les conditions d'élevage, de transport, d'abattage, le choix des carcasses et des viandes éligibles et les conditions de maturation de la viande. La qualité se construit et se renforce donc tout au long de la chaîne d'élaboration à travers des choix initiaux (race), des engagements quant aux conditions d'élevage, de transport et d'abattage, ainsi que de maturation de la viande, et des tris successifs (type d'animal, carcasses et viandes).

- Porcs Label Rouge : les choix et les engagements des cahiers des charges de ce SIQO concernent également toute la chaîne d'élaboration du produit depuis le choix de la génétique jusqu'au produit transformé, en passant par les conditions d'élevage (alimentation : seuil d'acide linoléique dans la ration ; logement et bien être), de transport (durée ou distance maximale de transport), d'abattage et le choix des animaux (types sexuels-femelles ou mâles castrés-, âge à l'abattage) et des viandes (critère de pH) éligibles. Plus particulièrement, il y a une liste positive de races et croisements, et les animaux ne doivent pas être porteurs des allèles n (gène halothane) et RN- ; toutefois, contrairement aux productions de volailles Label Rouge, la filière porcine ne dispose pas de types génétiques ou souches conduisant à une différenciation organoleptique majeure relativement aux productions standard. Ici aussi, la qualité se construit et se renforce donc tout au long de la chaîne d'élaboration à travers des choix initiaux (génétique), des engagements quant aux conditions d'élevage, de transport et d'abattage, et des tris successifs (caractéristiques de l'animal et de sa viande). A signaler que les produits de charcuteries et salaisons Label Rouge doivent être produits avec des porcs Label Rouge depuis 2005.

-Pour les autres produits de porc sous SIQO, notamment sous AOC/AOP : l'origine génétique des animaux (race spécifique, ou croisements spécifiques dans certains pays), les conditions de production, la qualité des carcasses et de la viande et les procédés d'élaboration des produits sont spécifiés (par exemple conditions et durée d'affinage pour le jambon sec) et les caractéristiques des produits finis sont précisément décrits.

Exemples de synergies entre facteurs et étapes d'élaboration du produit

L'élevage de porcs de races locales en conditions extensives et selon une conduite alimentaire spécifique (par ex. finition exclusive aux glands pour le porc ibérique de type Bellota), associées à un poids et un âge à l'abattage élevés, permettent l'expression du potentiel génétique de ces races favorable aux propriétés organoleptiques (tendreté, jutosité, flaveur, couleur) : dépôt élevé de lipides intramusculaires favorisé par une croissance compensatrice en finition, composition spécifique en AG, couleur rouge de la viande. Il a également été montré que des différences de propriétés organoleptiques de la viande entre porcs de race locale Basque vs. Large White (viande plus rouge, plus tendre et moins exsudative) observées lors d'un élevage en bâtiments ou sur litière et courette peuvent être exacerbées par le mode d'élevage extensif des porcs basques : couleur rouge encore plus intense et exsudation encore réduite, illustrant ainsi les interactions entre facteurs génétiques et d'élevage dans la détermination des propriétés organoleptiques des viandes et produits de porcs (Lebret *et al.*, 2015).

Des synergies entre les conditions de production (type génétique, type d'habitat, conduite alimentaire, âge et poids à l'abattage) et les conditions de transformation peuvent conduire à des propriétés qualitatives spécifiques des produits qui peuvent être valorisées par des SIQO : la qualité s'élabore ici dès l'amont. Le jambon sec est l'un de ces produits. En effet, pour ce produit plus encore que pour la majorité des produits de salaisons, les caractéristiques qualitatives finales dépendent des caractéristiques de la matière première (jambon brut) et des procédés de transformation. Sur le jambon brut, le poids de la pièce, les éventuels défauts de présentation, l'épaisseur du gras de couverture, la composition biochimique des tissus gras et des muscles (teneur en lipides, microconstituants et antioxydants, composition en AG,…), les paramètres physico-chimiques des muscles (pH, couleur, capacité de rétention d'eau…) résultent de facteurs liés à l'animal (type génétique, type sexuel), ses conditions de production (alimentation, mode d'élevage, âge et poids à l'abattage,…) et des conditions de pré-abattage et d'abattage (voir détails dans la section viande porcine de ce chapitre). Ces propriétés de la matière première, en interaction avec les conditions de transformation : méthode de salage (et composition du mélange salant), durées et conditions d'ambiance (température, humidité relative) aux différentes étapes du procédé, déterminent l'évolution du produit au cours de son élaboration (séchage, protéolyse, lipolyse) et ses propriétés organoleptiques finales : aspect, texture et flaveur. L'élaboration de produits sous SIQO pour le jambon sec (AOP en particulier) requiert ainsi un croisement génétique spécifique (incluant souvent la race Duroc) voire des porcs de race locale (purs ou en croisement) à forte adiposité et teneur en lipides intramusculaires élevée. Les caractéristiques organoleptiques supérieures (couleur plus sombre, texture plus fondante et moins dure, flaveur plus intense) des jambons secs issus de ces animaux vs de porcs de génotypes plus

'performants', ainsi que des races locales pures vs leurs croisements, sont démontrées. Outre la génétique, les facteurs de production combinant poids et âge d'abattage élevés (qui favorisent l'adiposité et limitent le potentiel protéolytique musculaire), système d'élevage extensif et conduite alimentaire spécifique (pouvant inclure des ressources locales), associés à des procédés de transformation longs adaptés à cette matière première particulière (contrôle de la protéolyse, lipolyse favorisée) conduisent à l'élaboration de produits aux propriétés gustatives élevées et spécifiques. Cette synergie est valorisée par des SIQO (AOP en particulier).

De façon générale, hormis pour des systèmes de production et leurs produits spécifiques, comme les produits sous SIQO, les travaux longitudinaux visant à faire le lien entre la variabilité de la matière première (résultant de contraintes subies ou de leviers d'action au niveau de la production) et celle des produits transformés sont moins nombreux que ceux portant sur les propriétés des viandes consommées en frais. Nous constatons plutôt un cloisonnement entre les étapes de production d'une part et de transformation d'autre part pour les produits carnés. La littérature scientifique sur les produits carnés traite souvent de la qualité soit sur la partie production, soit sur la partie transformation mais rarement de manière intégrative. Il y a peu d'études montrant une adaptation des procédés de transformation à la variabilité de la matière première. Une des raisons principales est que, dans l'industrie de la viande, l'un des objectifs majeurs est de gommer cette variabilité et d'adapter, souvent par la formulation, les procédés pour qu'un produit dit standard et de qualité constante soit commercialisé, quelle que soit la saison, l'origine génétique. Les procédés industriels modifient en effet souvent largement les propriétés de la viande brute pour aboutir à des produits standardisés. Les rares exemples concernent la viande de porc pour laquelle le tri de la matière première permet d'appliquer des procédés qui tiennent compte de la variabilité de la matière première : i) tri sur le pH ultime de la viande de porc pour adapter le procédé à la variabilité de la matière première, ii) SPIR pour trier les jambons/cuisses qui risquent de conduire à un jambon déstructuré, iii) détection des odeurs indésirables sur la ligne d'abattage pour orienter la carcasse vers des procédés de transformation adaptés (mélange avec d'autres viandes moins odorantes, produits fumés et à consommer froids). Ces tris permettent de gérer l'hétérogénéité des carcasses et des viandes de manière à les orienter vers le circuit de vente ou le procédé de transformation le plus adapté. A l'exception d'exemples comme ceux cités précédemment sur les SIQO, il y a peu d'approches intégratives, avec un raisonnement intégrant les modes de production et les procédés de transformation. Cependant, des questions autour des liens entre la consommation de viande et la santé (MCV, cancer colorectal) ou l'intérêt croissant des consommateurs envers la production des animaux (origine, authenticité, bien-être animal) conduisent à développer des recherches sur les déterminants amont et aval des qualités des produits carnés. Des constats similaires peuvent être faits sur les produits laitiers. Les technologues s'affranchissent de la variabilité de la composition chimique et bactériologique des laits (selon les saisons et les lieux), qui est préjudiciable à la régularité des produits, en standardisant les teneurs en matières grasses et protéiques, en minéraux ou en lactose et en appliquant des traitements pour éliminer les micro-organismes (traitements thermiques ou filtration). Les caractéristiques des fromages fabriqués en laiterie sont donc relativement régulières, car la composition du lait est standardisée et les paramètres technologiques sont bien maîtrisés et contrôlés. En fabrication artisanale ou fermière, où ces procédés de standardisation du lait ne sont pas appliqués (fabrication avec du lait cru entier) et où les paramètres technologiques et d'ambiance des locaux sont plus difficiles à maîtriser, la variabilité des caractéristiques des fromages affinés est importante. Dans ce cas, le poids des facteurs d'amont (conduite du troupeau) est plus important.

2.10.3 Les SIQO : en quoi et comment participent-ils à la construction de la qualité ? Quelle objectivation de leurs effets ?

Au-delà des propriétés d'image qui concerne tous les SIQO, les objectifs vis-à-vis de la qualité sont spécifiques à chaque type de SIQO. La réglementation relative à l'agriculture biologique vise à garantir l'usage de méthodes respectueuses de l'environnement, de la santé et du bien-être animal ; le CDC prend des engagements sur les conditions d'élevage des animaux, dont leur alimentation, il interdit les fertilisants chimiques, les pesticides et les hormones et limite le recours aux produits pharmaceutiques. L'apposition de ce signe de qualité sur un produit garantit qu'il est issu d'une production respectant ces méthodes. Si certains de ces engagements peuvent avoir un impact sur les propriétés nutritionnelles et sanitaires du produit final[2], les éleveurs n'ont aucune obligation concernant ces impacts. A titre d'illustration, le cahier des charges des salmonidés bio oblige à une qualité minimum de l'eau quand il y a prise d'eau en rivière, anticipant ainsi l'effet potentiel de la contamination du milieu sur les propriétés sanitaires du filet (obligation de moyens), alors que le cahier des charges Label Rouge des salmonidés impose une recherche des contaminants chimiques dans la chair (obligation de

[2] Par exemple : alimentation des animaux avec des aliments biologiques, dont obligation du pâturage pour les ruminants ou de l'accès au plein air pour les monogastriques, restrictions de l'utilisation de médicaments –pas de traitement préventif, limitation du nombre de traitements autorisés, augmentation du délai de retrait avant commercialisation du lait ou abattage de l'animal, limitation de la taille du groupe et de la densité animale (comme pour d'autres SIQO), interdiction des hormones, des engrais chimiques et des produits phytosanitaires de synthèse, restrictions sur les additifs autorisés pour les produits transformés

résultats). Cependant, l'utilisation des antibiotiques, par exemple, est moindre en production biologique vs. conventionnelle (Mie *et al.*, 2017), et il a été montré que les viandes de porc et de poulet biologiques étaient moins susceptibles d'abriter des bactéries résistantes aux antibiotiques (Smith-Spangler *et al.*, 2012) ce qui renvoie à des enjeux majeurs de santé publique concernant l'antibiorésistance. L'étude BioNutrinet indique d'ailleurs que les consommateurs de produits biologiques disent choisir ces produits pour des questions d'éthique, de santé et d'aversion aux contaminants (Baudry *et al.*, 2017). Les autres SIQO s'engagent sur les propriétés organoleptiques, supérieures pour le Label Rouge, spécifiquement en lien avec le milieu ou l'origine géographique pour les AOP, AOC et IGP ou avec une composition/fabrication spécifique pour les STG. Comme pour l'agriculture biologique, certains des engagements des SIQO Label Rouge, AOP, IGP, STG peuvent avoir un impact sur les autres propriétés (en particulier nutritionnelles et sanitaires) du produit final. Par exemple, le Label Rouge intègre des éléments relatifs aux conditions d'élevage (accès à l'extérieur), à l'alimentation, au transport et à l'abattage. A signaler que pour le poisson, l'utilisation des protéines animales transformées est interdite dans tous les SIQO.

Si tous les produits issus d'un élevage peuvent être vendus sous le signe de qualité 'bio', ce n'est pas le cas pour tous les SIQO ; par exemple, les bovins mâles entiers et certaines carcasses de conformation et/ou d'état d'engraissement jugés insuffisants ne sont pas éligibles à la labellisation dans le SIQO Label Rouge Gros Bovins de boucherie. Hormis le Label Rouge régi au niveau français, les SIQO sont régis par la règlementation européenne. Chaque pays peut cependant renforcer les critères des cahiers des charges. C'est le cas par exemple du poulet de chair bio pour lequel l'âge à l'abattage d'au minimum 81 jours en France est supérieur à celui établi au niveau européen (70 jours). Ce choix a été imposé en France pour éviter une concurrence avec le SIQO Label Rouge. Il a des implications sur les souches utilisées et les coûts de production. Ces spécificités nationales signifient que les résultats d'études sur la qualité de la viande de poulet bio obtenus dans un pays donné ne sont pas toujours généralisables, les souches utilisées et l'âge de l'animal à l'abattage ayant des effets importants sur la qualité de la viande et notamment ses propriétés organoleptiques. Rappelons également que tous les Plans de filière rédigés à la suite des Etats Généraux de l'Alimentation en France prévoient une montée en gamme et une nouvelle segmentation des produits. Par exemple, le plan de la filière bovine prévoit de faire passer l'offre de viande bovine française sous Label Rouge de 3% à 40% et de doubler la production de viande bovine biologique d'ici 5 ans ; le plan de la filière porcine annonce développer les filières sous SIQO (10% de bio et 12% de Label Rouge d'ici 2027 et les filières régionales, ainsi que la démarche RSE) (voir plus haut). Enfin, l'INAO envisage d'intégrer des critères environnementaux dans les SIQO hors AB (biodiversité, fertilisation, génétique plus adaptée à l'agroécologie, mode d'élevage-chargement/ha, suivi sanitaire et prophylaxie des animaux).

Deux méta-analyses de la littérature scientifique comparant les qualités nutritionnelles des produits bio et conventionnels ont été publiées récemment (Srednicka-Tober *et al.*, 2016a ; Srednicka-Tober *et al.*, 2016b), l'une sur le lait cru de vache, l'autre sur la viande. Ces deux publications soulignent le manque d'études épidémiologiques sur des cohortes pour quantifier les impacts sur la santé, mais il deux études ont été publiées depuis à cet égard, qui sont développées dans le chapitre 6 (Baudry *et al.*, 2018a; Baudry *et al.*, 2018b).

Pour la viande, il s'agit de la première méta-analyse publiée à ce jour. Elle ne concerne que la viande fraîche non transformée. Les auteurs ont synthétisé 67 études publiées entre 1992 et 2014. Elles concernaient essentiellement les viandes bovine, ovine, de porc et de poulet, et avaient été réalisées dans 8 pays européens et 7 pays hors-Europe. Les échantillons de viande provenaient soit de fermes privées appariées spécifiquement pour la comparaison de leurs produits (7%), soit du commerce (30%), soit de fermes expérimentales (63%). Seuls ont été analysés les résultats de certains groupes d'AG, du fait d'un nombre insuffisant de données pour les AG individuels, les teneurs en minéraux, antioxydants, vitamines, métaux (As, PB, Cd) et pesticides. L'analyse a été faite soit en regroupant toutes les espèces animales, soit par espèce auquel cas le nombre d'études était alors beaucoup plus faible. L'analyse globale montre que la proportion en C14 :0 et C16 :0 (analysée sur 11 et 23 études) était plus faible de 20% et 10% et que la proportion en AGPI et AGPI n-3 (analysée sur 23 et 21 études) était plus élevée de 23% et 47% pour la viande bio. Sur la base des résultats spécifiques à chaque type de viande et des consommations européennes actuelles, les auteurs ont calculé que le remplacement de viandes conventionnelles par des viandes biologiques augmenterait l'ingestion d'AGPI et d'AGPI n-3 à partir des viandes de 17% et 22%, mais sans changement du rapport AGPI n-6/AGPI n-3. Un biais possible est cependant à souligner dans cette méta-analyse, car les viandes biologiques étaient en moyenne moins grasses (-20%) que les viandes conventionnelles, ce qui peut, au moins en partie, expliquer la proportion plus élevée d'AGPI et AGPI n-3. Les pratiques d'élevage et le métabolisme des AG étant très différents entre ruminants et monogastriques, nous séparons ruminants et monogastriques dans la suite de cette synthèse.

Pour la viande de ruminants, les raisons avancées pour une plus forte proportion d'AGPI et d'AGPI n-3 et une moindre proportion de C14:0 et C16:0 dans la viande bio sont une proportion plus élevée de fourrages, et notamment d'herbe pâturée, dans la ration, ainsi qu'une proportion plus élevée de légumineuses dans les prairies. Le cahier des charges de l'AB oblige au pâturage quand les conditions le permettent, et il limite la proportion de concentré dans la ration des animaux à 40% (au moins 60% de la matière sèche composant la ration journalière des herbivores doit provenir de fourrages grossiers

frais, secs ou ensilés). Beaucoup de systèmes conventionnels ne prennent pas d'engagement à cet égard, sauf certains SIQO[3]. Par ailleurs, les fourrages biologiques sont souvent plus riches en légumineuses, lesquelles sont plus riches en feuilles et en lipides que les graminées et subissent une moindre bio-hydrogénation dans le rumen du fait d'une vitesse plus rapide de transit (Farruggia *et al.*, 2008 ; Lourenco *et al.*, 2007 ; Martin *et al.*, 2019). Cependant, les différences de composition en AG entre viandes issues de modes de production biologiques vs conventionnels dans cette méta-analyse sont nettement moindres que celles observées dans les études comparant la viande de bovins ou d'ovins finis à l'herbe vs. avec des rations à base de concentrés ou d'ensilage de maïs : dans ce cas, les teneurs en AGPI n-3 sont multipliées par 3, les teneurs en AGPI n-3 LC EPA et DHA sont 1,7 à 3,5 fois plus élevées et le rapport AGPI n-6/AGPI n-3 réduit de 70 à 75% (Berthelot et Gruffat, 2018) (voir plus haut). Les auteurs expliquent ce plus faible enrichissement en AG d'intérêt et la grande hétérogénéité observée dans cette méta-analyse par la grande variabilité des pratiques d'élevage, notamment d'alimentation, à la fois dans les systèmes biologiques et conventionnels. Les systèmes conventionnels peuvent être intensifs (alimentation en bâtiments avec des rations à base de concentrés pouvant représenter jusqu'à 85% de la ration), mais aussi très extensifs (100% d'herbe pâturée dans la ration). De même, les auteurs soulignent que si les rations des ruminants bio contiennent souvent plus de fourrages et moins de concentrés, il y a des situations où c'est l'inverse (moins de pâturage dans les systèmes bio que les systèmes conventionnels, comme c'est le cas de certains systèmes allaitant ovins, où les conditions ne permettent pas le pâturage : engraissement des agneaux hors période de pâturage, conditions climatiques difficiles, parasitisme, …). La durée journalière de pâturage, la durée de la finition à l'herbe, la nature de la prairie, le ratio fourrage frais/fourrages conservés, ainsi que la proportion de concentré dans la ration, tous facteurs connus pour affecter la composition en AG, peuvent alors être extrêmement variables, même dans les systèmes biologiques. Les auteurs de la méta-analyse soulignent ainsi la marge importante d'amélioration de la teneur en AG d'intérêt pour l'homme dans les deux modes de production. A signaler i) que l'origine des différences de composition en AG entre viande bio et conventionnelle étant surtout la nature de l'alimentation, et notamment la plus forte utilisation de fourrages, dont les fourrages pâturés, il y a un risque de variabilité plus importante de ces propriétés en lien avec la variabilité des caractéristiques des prairies et de leur gestion, ii) qu'il y a d'autres voies d'amélioration de la teneur de la viande de ruminants en AGPI n-3, telles que l'utilisation d'ingrédients riches en AGPI n-3 (graines de lin, par ex.) comme cela a été développé dans chaque section de ce chapitre.

Pour le <u>lait de vache</u>, 3 précédentes méta-analyses sur les qualités nutritionnelles du lait bio vs. conventionnel (Dangour *et al.*, 2009 ; Palupi *et al.*, 2012 ; Smith-Spangler *et al.*, 2012) avaient abouti à des conclusions contrastées. Elles synthétisaient cependant une littérature beaucoup moins conséquente que celle de (Srednicka-Tober *et al.*, 2016b), où 170 études réalisées essentiellement en Europe (76%) et publiées entre 1992-2014 ont été utilisées. Les échantillons de lait provenaient soit de fermes privées appariées spécifiquement pour la comparaison de leurs produits (75%), soit du commerce (30%), soit de fermes expérimentales (13%). Ont été comparées la composition en AG du lait, la teneur en antioxydants, vitamines et minéraux et métaux toxiques (Pb). Les auteurs ont également répertorié les études comparant les qualités nutritionnelles du lait de brebis et de chèvre bio vs conventionnel, et celles comparant les qualités nutritionnelles des produits laitiers transformés (fromages, yaourts, beurre, crème, lait fermenté, petit-lait) bio vs. conventionnels, mais ils ont considéré que le nombre de données était insuffisant pour autoriser des conclusions.

Les résultats montrent que la production laitière moyenne (kg lait/vache et par jour ou par lactation) est moindre en bio (-23%), mais il n'y a pas de différence entre les 2 modes de production pour les taux butyreux et protéiques, la production totale de lipides et de protéines par vache étant au final réduite de 20% en bio. Il n'y a pas de différences entre lait bio et conventionnel pour les teneurs en protéines, matières grasses, AGS, AGMI et AGPI n-6. Par contre, le lait bio est plus riche en AGPI n-3 (+56%), dont ALA (+69%), AGPI n-3 LC (+57%) et en CLA (+41%) et en AG trans précurseurs du CLA (acide vaccénique, +65%). Les rapports AGPI n-6/AGPI n-3 et LA/ALA du lait bio sont ainsi plus favorables (diminués de 71% et 93%). Le lait bio a donc une composition en AG plus favorable que le lait conventionnel pour la santé des consommateurs. Les auteurs estiment que la consommation d'un demi-litre de lait entier (ou son équivalent en lipides sous forme de produits laitiers) représente 34% et 22% des apports actuels en AGPI n-3 LC si le lait est bio vs conventionnel et 16% (39 mg) et 11% (25 mg) des apports recommandés en AGPI n-3 LC si le lait est bio vs conventionnel.

Ce calcul ne prend cependant pas en compte l'augmentation potentielle de conversion de ALA en AGPI n-3 LC associée à la diminution du rapport LA/ALA. Ces résultats sur la composition en AG sont basés sur 11 à 19 études ; les auteurs soulignent une très grande hétérogénéité des résultats entre pays, mais pas entre types d'études. Par ailleurs, le lait bio a une teneur supérieure en vitamine E (+13%, 9 études). Ces différences de composition en AG et teneur en Vitamine E sont liées, comme pour la viande de ruminants, à des différences dans l'alimentation des animaux : un niveau plus élevé d'herbe pâturée et/ou conservée, et plus faible de concentré et/ou d'ensilage de maïs dans la ration (Martin *et al.*, 2019; Mie *et al.*, 2017 ; Srednicka-

[3] Certains cahiers des charges Label Rouge, AOP ou IGP s'engagent sur une alimentation au pâturage pendant la période estivale.

Tober *et al.*, 2016b) et une proportion souvent plus élevée de légumineuses dans les fourrages bio (Farruggia *et al.*, 2008 ; Martin *et al.*, 2019). Il faut signaler une variabilité importante de la composition du lait en lien avec les caractéristiques des fourrages (composition botanique et stade phénologique) et la gestion du pâturage. Une étude montre également que le lait bio est plus riche en AGPI n-3 à la fois pendant la saison de pâturage et pendant la saison hivernale en bâtiments (Palupi *et al.*, 2012). Par ailleurs, les systèmes d'élevage conventionnels herbagers à faibles intrants peuvent offrir des changements de composition similaires. Les auteurs notent le peu d'études disponibles sur les produits laitiers transformés, cependant, leur analyse montre des tendances similaires pour toute une gamme de paramètres de composition des lipides (AGPI n-3 totaux, AGPI n-3 LC et CLA), ce qui n'est pas surprenant puisqu'il n'y a pas ou peu d'impact de la transformation sur le profil en AG du produit. Par ailleurs, le lait bio a des teneurs supérieures en fer (+20%) et inférieures en iode (-74%) et sélénium (-21%). Les différences de teneur en fer sont sans conséquence biologique, car le lait n'est pas une source importante de fer. Pour l'iode, les auteurs expliquent les différences par i) une moindre utilisation de concentrés dans les systèmes bio, ii) le fait que les suppléments minéraux doivent être demandés spécifiquement dans de nombreux pays pour les concentrés biologiques, alors qu'ils sont ajoutés en routine dans les concentrés conventionnels et iii) l'utilisation différentielle de la teinture d'iode pour désinfecter la mamelle. Pour le sélénium, les différences peuvent provenir de différences dans le niveau de supplémentation en Se de l'alimentation et des fertilisants. Pour ces deux minéraux, il y a des moyens simples d'augmenter les apports alimentaires (utilisation de suppléments pour animaux, de fertilisants organiques enrichis en Se, d'algues, consommation de poissons, crustacés, sel de table enrichi ou compléments alimentaires), la difficulté étant que les seuils d'insuffisance et d'excès sont proches (Calder *et al.*, 2010). Pour les autres vitamines (A, C, D3), minéraux (Ca, Cd, Co, Cu, Mg, Mn, Mo, P, K, Na, Zn), et métaux toxiques (Pb), les différences ne sont pas significatives. La consommation d'un demi-litre de lait entier conventionnel par du lait bio réduit ainsi le niveau de couverture des apports en iode de 88% à 53% et celui en sélénium de 13% à 11%.

Les auteurs signalent les impacts potentiels de ces différences de composition en AG (augmentation de composition en AGPI n-3 et réduction du rapport n-6/n-3), déjà observés dans certaines études, sur la réduction de l'allergie (Calder *et al.*, 2010 ; van den Elsen *et al.*, 2013) et de l'eczéma (Kummeling *et al.*, 2008). Les impacts potentiels d'une augmentation des teneurs en CLA sont encore incertains et l'on ne connait pas encore les niveaux de CLA ayant des effets bénéfiques ; par ailleurs, la plupart des études in vitro et chez l'animal sont conduites avec des CLA synthétiques, dont l'équilibre en isomères est différent de celui présent naturellement dans le lait. L'augmentation de l'ingestion de vitamines anti-oxydantes, telles que l'α tocophérol, est intéressante, car le stress oxydatif est un facteur de risque de pathologies chroniques, mais il faut signaler que le lait n'est pas une source alimentaire majeure. Pour I et Se, les impacts sont faibles ou il est facile de supplémenter l'alimentation.

Dans cette méta-analyse, il n'y a pas de différence entre lait de vache bio et conventionnel pour la teneur en urée et le nombre de cellules somatiques. Ce dernier résultat n'est pas complètement concordant avec les conclusions d'autres études qui observent des teneurs en cellules somatiques légèrement plus élevées en bio (voir section produits laitiers de ce chapitre). Par ailleurs, certaines études mettent en évidence des teneurs en matières protéiques légèrement plus faibles avec du lait bio vs. du lait conventionnel (ou avec du lait produit au pâturage vs. avec une alimentation à base d'ensilage de maïs), et des teneurs en matières grasses plus élevées (voir section produits laitiers de ce chapitre), ce qui n'est pas complètement en accord avec les résultats de (Srednicka-Tober *et al.*, 2016b).

Des compléments aux résultats de ces méta-analyses peuvent être apportés, relatifs à l'effet de l'alimentation à l'herbe, mise en avant dans le cadre du cahier des charges bio et de beaucoup de cahiers de charges Label Rouge et AOP[4]. Au-delà de la composition en AG, la littérature scientifique montre que, par rapport à un régime à base de maïs et/ou de céréales, une alimentation à l'herbe du ruminant (d'autant plus qu'elle est riche en légumineuses) fournit un lait ou une viande plus riches en vitamines A, E, B2, B9, caroténoïdes et en dérivés phénoliques (pour le lait), mais plus pauvre en vitamine B12 (Martin *et al.*, 2019). Le type de prairies (prairies de montagne vs. de plaine) module aussi la composition en AG ; le pâturage de prairies de montagne conduit à des teneurs plus élevées en AG d'intérêt pour l'homme, en lien avec l'inhibition de la bio-hydrogénation ruminale du fait de certains composés secondaires des plantes. Pour la viande, l'effet bénéfique de la consommation d'herbe au pâturage est proportionnel à sa durée (Scerra *et al.*, 2011) ; *a contrario*, la finition en bâtiments avec un régime à base de maïs et/ou de céréales après pâturage diminue ces effets bénéfiques (Aldai *et al.*, 2011 ; Scerra *et al.*, 2011) et peut aller jusqu'à les supprimer totalement (Ponnampalam *et al.*, 2006). Pour tirer avantage de ces bénéfices

[4] A titre d'exemple, la durée de pâturage des gros bovins Label Rouge doit être de 5 mois au minimum, seuil pouvant être augmenté à 8 mois selon le cahier des charges Label Rouge considéré. Tous les cahiers des charges disponibles pour les fromages AOP de la région Auvergne-Rhône Alpes promeuvent une ration à base d'herbe et de fourrage. Il en est de même à l'échelle européenne, où la majorité des fromages AOP requièrent une alimentation des animaux à base d'herbe et de fourrages.

nutritionnels, l'alimentation à l'herbe doit être poursuivie dans les 3 mois précédant l'abattage pour les bovins ; cette durée est encore à préciser pour les ovins.

Concernant les propriétés commerciales et organoleptiques des produits carnés et laitiers de ruminants en bio vs conventionnel, l'expertise signale des risques plus importants de défauts en viande bovine et ovine, liés à l'alimentation à l'herbe et à la limitation de l'utilisation des aliments concentrés (risques de poids plus faible et d'état d'engraissement insuffisant de la carcasse et risque de viande plus sombre). De plus, pour les ovins, il y a un risque plus important de défaut de fermeté du gras de couverture en bio lié à la plus forte proportion de légumineuses dans les fourrages bio et surtout de défaut de flaveur (flaveur animale plus intense) lié à la fois à la finition à l'herbe, à la plus forte proportion de légumineuses dans les prairies bio et à l'âge plus élevé à l'abattage. Il faut ici souligner un antagonisme entre la dimension nutritionnelle (AGPI n-3, rapport AGPI n-6/AGPI n-3) et les dimensions commerciales et organoleptiques de la qualité. Pour le lait, l'odeur est également plus prononcée (plus animale) avec une alimentation au pâturage, plus fréquente en bio qu'avec une ration à base d'ensilage de maïs. Enfin, il y a plus de risques de variabilité de ces dimensions de la qualité en bio, variabilité inhérente aux systèmes herbagers (conditions climatiques, conditions de pâturage, limitation des intrants alimentaires et médicamenteux, plus grande variabilité interindividuelle de performances animales…).

Pour les propriétés d'usage, la présence d'antioxydants naturellement présents dans l'herbe verte, et d'autant plus que la prairie est riche en biodiversité floristique (Provenza *et al.*, 2019), améliore la stabilité oxydative des produits de ruminants lorsqu'ils sont produits à l'herbe, ce qui est plus fréquent en bio (et pour les produits sous SIQO).

Concernant les propriétés sanitaires, une étude récente montre des teneurs plus élevées en contaminants environnementaux dans la viande bovine bio (teneurs en PCDD / F, dl-PCB, PCDD / F + dl-PBC et NDL-PCB augmentées de 25%, 113%, 60% et 50%), toutefois celles-ci restent inférieures aux seuils réglementaires (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017). Les hypothèses avancées par les auteurs sont des différences à la fois dans l'âge des animaux et dans leur accès au pâturage. Dans leur étude, les viandes bio étaient issues d'animaux plus âgés (80 vs 63 mois pour le lot conventionnel) ; l'obligation du pâturage et le coût du concentré bio induit en effet des cycles de production plus longs.

Pour la viande de monogastriques, Srednicka-Tober et al. (2016b) observent i) pour la viande de poulets (Srednicka-Tober *et al.*, 2016a) : une moindre proportion d'AGS (essentiellement C14 :0, -65%) et d'AGMI (-20%), et une proportion plus élevée d'AGPI (+40%), d'AGPI n-3 (+66%), d'AGPI n-6 (+50%) et de LA (+10%) pour la viande bio (résultats de 4 à 6 études), ii) pour la viande de porc : une moindre proportion d'AGMI (-8%) et une proportion plus élevée d'AGPI (+23%) (résultats de 4 études). Les auteurs soulignent que, contrairement aux ruminants, il y a peu de données en conditions contrôlées permettant d'expliquer ces différences. Cependant, en production biologique les animaux monogastriques doivent bénéficier d'un accès permanent à des fourrages grossiers (frais, secs ou ensilés), ce qui influence le profil lipidique des viandes et contribue à augmenter la proportion d'AGPI. Par ailleurs, Srednicka-Tober *et al.* (2016a) rappellent que le tourteau de soja utilisé en production bio est issu d'une extraction à froid de l'huile et qu'il est donc plus riche en lipides que celui issu d'une extraction à chaud par solvant classiquement utilisé en production conventionnelle (9% vs. 2%), ce qui pourrait expliquer les proportions plus élevées de LA et d'AGPI n-6 dans la viande de poulet bio. Cette matière première apporte en effet essentiellement des AGPI n-6. A signaler que le biais sur la composition en AG lié à la teneur en lipides de la viande est particulièrement important dans cette méta-analyse pour la viande de poulet, puisque la teneur en lipides de la viande est inférieure de 50% dans la viande bio. On peut noter que l'apport régulier d'une matière première riche en AG n-3 dans l'alimentation des animaux (graines de lin, huile de colza, huile ou farine de poisson, micro-algues…), comme cela a été mis en place par la filière Bleu Blanc Cœur, permet d'enrichir la viande de poulet et de porc en AGPI n-3 de façon maîtrisée et répétable.

Pour la viande de poulets, l'impact des systèmes alternatifs (Bio et Label Rouge) sur les propriétés commerciales et organoleptiques du produit est mitigé : le rendement en filet est moindre et la viande est moins juteuse et plus ferme, mais le squelette est plus ferme, la peau plus épaisse et plus résistante à la déchirure lors de la plumaison, la carcasse plus maigre, la flaveur plus développée et la viande plus rouge et plus foncée. Cependant, la variabilité des propriétés commerciales, technologiques et organoleptiques est accrue, en particulier pour la production Bio. En effet, les souches de poulet utilisées pour les productions Bio et Label Rouge ont fait l'objet d'une moindre sélection que celles utilisées pour la production conventionnelle et les populations sont donc plus variables sur le plan des performances de croissance et de rendement en viande. De plus, les contraintes imposées par les cahiers des charges en particulier Bio sur les matières premières utilisées dans l'alimentation des animaux rendent plus difficile l'équilibre alimentaire et limitent la croissance et le développement musculaire. Les propriétés technologiques des filets des poulets Bio et Label Rouge sont nettement inférieures à celle des poulets conventionnels du fait d'un pH plus acide. Enfin, l'impact des systèmes alternatifs sur les propriétés sanitaires est mitigé : i) moins de résidus de médicaments et de traces de pesticides, viandes moins susceptibles d'abriter des bactéries résistantes aux antibiotiques (Smith-Spangler *et al.*, 2012), bien que ceci ne soit pas toujours observé (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017), par exemple n'observent pas de différences dans les teneurs en résidus d'antibiotiques et de pesticides entre viandes

de volailles bio et conventionnelles), mais ii) des teneurs plus élevées en contaminants environnementaux (teneurs en PCDD / F, dl-PCB, PCDD / F + dl-PBC et NDL-PCB augmentées de 56%, 140%, 95%, 103 et 94% pour les viandes bio), bien que celles-ci restent inférieures aux seuils réglementaires (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017) et iii) une prévalence plus élevée du risque Campylobacter. Les hypothèses sous-jacentes à ces différences sont des différences d'accès au plein air (obligatoire en bio) et d'âge à l'abattage des animaux (plus élevé en bio). Ces phénomènes peuvent également être observés en production Label Rouge pour les mêmes raisons (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017).

Pour la viande de porc, l'impact de systèmes de production alternatifs sur les caractéristiques qualitatives des viandes résulte d'interactions fortes entre facteurs (type génétique, type d'habitat, conduite alimentaire, saison d'élevage, âge et poids à l'abattage…). Ces effets confèrent des spécificités particulières aux produits qui peuvent être valorisées par des SIQO (ex. AOP/IGP, production biologique). Ces interactions induisent aussi une variabilité plus importante des caractéristiques qualitatives des produits issus d'un système alternatif vs. un système standard. Concernant la production porcine biologique, l'analyse des résultats disponibles, assez disparates, montre que ce ne sont pas directement les règles de production qui déterminent les caractéristiques qualitatives des viandes, mais les pratiques d'élevage : conduite alimentaire (notamment, difficulté à équilibrer la ration et à satisfaire les besoins des animaux en protéines et acides aminés, compte tenu de l'interdiction de l'utilisation des acides aminés de synthèse), conditions de logement (température ambiante, surface disponible par animal) et bien sûr le génotype des animaux. Ces facteurs de variation, choisis ou subis par l'éleveur (selon les choix et compromis qu'il réalise au sein du cadre réglementaire) engendrent une grande variabilité des propriétés commerciales, organoleptiques, nutritionnelles et technologiques des viandes porcines biologiques et *in fine*, ces différentes caractéristiques peuvent être améliorées, ou à l'inverse diminuées, en production bio relativement à la production conventionnelle. Ainsi, les résultats de comparaison de la composition en AG des viandes porcines biologiques vs conventionnelles sont très variables entre études : proportion inférieure d'AGPI et d'AG n-3 pour Karwowska et Dolatowski (2013) ; proportions équivalentes d'AGS, AGMI et AGPI, mais supérieure d'AGPI n-3 et moindre rapport n-6/n-3 pour Álvarez-Rodríguez *et al.* (2016) ; diminution de la proportion d'AGMI au profit des AGPI, mais nombre insuffisant d'études pour statuer sur la proportion d'AGPI n-3 dans la méta-analyse de Srednicka-Tober *et al.* (2016a). Au-delà, la variabilité des conditions d'élevage (température, activité physique, niveau de couverture des besoins alimentaires) inhérente aux modes de production alternatifs engendre une plus grande variabilité des performances zootechniques et des propriétés commerciales, organoleptiques, nutritionnelles et technologiques des viandes porcines. Concernant les propriétés sanitaires, plusieurs études menées en France, Italie, Danemark et Suède ont montré une moindre prévalence de bactéries résistantes aux antibiotiques, notamment le staphylocoque doré, dans les élevages de porc bio, en lien avec une moindre utilisation d'antibiotiques (Fromm *et al.*, 2014 ; Gerzova *et al.*, 2015 ; Kempf *et al.*, 2017; Osterberg *et al.*, 2016). Devilly-Pinel et al. (2017) n'observent pas de différences dans les teneurs en résidus d'antibiotiques et de pesticides entre viandes porcines issus d'agriculture bio vs conventionnelle (ces résidus ne sont d'ailleurs jamais détectés dans leur étude), mais ils montrent des teneurs plus élevées en contaminants environnementaux (teneurs en dl-PCB, NDL-PBC et HCBD augmentées de 50%, 245% et 170% pour les viandes bio), celles-ci restant toutefois inférieures aux seuils réglementaires. Les hypothèses sous-jacentes à ces différences sont des différences dans l'accès au plein air et dans l'âge/poids à l'abattage (plus élevé en bio), donc des différences dans l'intensité et la durée d'exposition aux contaminants. Ces phénomènes peuvent également être observés en production Label Rouge (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017).

En système porcin extensif, les principaux risques concernent les risques sanitaires avec le parasitisme (trichine, toxoplasme) et le risque de transmission de maladies aux porcins par les animaux sauvages, avec l'exemple de la peste porcine africaine (Andraud *et al.*, 2019).

Pour les œufs, il n'y a pas de différence entre système bio et conventionnel sur les propriétés commerciales, mais le jaune est moins coloré en bio, car la supplémentation alimentaire avec de la cantaxanthine est interdite. Concernant les propriétés nutritionnelles, en raison de l'accès à un parcours herbager, les œufs de poules élevées en bio présentent des teneurs en AGPI n-3 (particulièrement en acide alpha-linolénique et DHA) plus élevées (Mugnai *et al.*, 2014) ; il y a cependant peu d'études documentant la composition en AG des œufs produits en système bio vs. conventionnel (Mie *et al.*, 2017). Pour les propriétés sanitaires, les risques sont les mêmes que ceux évoqués précédemment pour les volailles de chair. Il y a en Europe un effet clairement démontré du système d'élevage sur la contamination des œufs pour les contaminants les plus surveillés (PCDD/F et PCB). Ceci se traduit par des valeurs moyennes supérieures à celle des systèmes conventionnels et par une plus forte variabilité. Les niveaux de contamination ne sont pas intrinsèquement liés aux systèmes stricto sensu, mais résultent de 3 niveaux d'interaction : nombre de voies d'exposition (environnement, aliment/consommables, matériaux/bâtiments), niveau de contamination de chacune d'elles et performances zootechniques du troupeau. Les différences entre systèmes en claustration vs. sur parcours ne sont pas systématiques, l'accès à un parcours n'étant qu'un facteur d'exposition (les poules se contaminent en explorant le parcours et en ingérant diverses matrices environnementales, telles que végétaux, sol,

pédofaune ou eau et matières en suspension), auquel peut s'ajouter un facteur de sensibilité lié au génotype et à la conduite des animaux (comportement exploratoire des animaux, intensité de ponte). A la plus forte exposition peut s'ajouter une plus grande sensibilité lorsque les systèmes sont moins productifs, car les poules excrètent alors moins rapidement les polluants. Des études ont ainsi montré que les œufs produits à partir de poules en plein air pouvaient contenir plus de dioxines à cause de contacts plus intenses avec le sol, qui est un réservoir important pour ce type de contaminants (2006; Pussemier *et al.*, 2004). La plupart des échantillons européens qui dépassent les limites maximales fixées pour les POP dans les œufs sont ainsi issus soit d'élevages de particuliers, soit professionnels avec accès à un parcours. Enfin, dans cette filière, la variabilité de la qualité en bio est plus importante, en lien avec une moins bonne maîtrise de l'alimentation et du niveau de couverture des besoins (10 à 15% de l'alimentation est issue du parcours).

Pour le poisson, deux études récentes comparent la composition en AG de la chair du bar bio vs. conventionnel, mais leurs résultats sont divergents : la teneur en AGPI n-3 LC est plus élevée pour le bar bio dans une étude (Trocino *et al.*, 2012), plus faible dans l'autre (Di Marco *et al.*, 2017). L'origine de cette divergence tient à la composition des aliments distribués : dans la 2ème étude, l'aliment bio contenait, en plus de la farine de poisson, du soja (dépourvu d'AGPI n-3), alors que l'aliment conventionnel n'en contenait pas. Pour cette filière également, il y a donc une variabilité des pratiques d'élevage, notamment de l'alimentation, en bio comme en conventionnel, qui n'autorise pas des conclusions monolithiques. Concernant les propriétés sanitaires, le cahier des charges (CDC) bio anticipe l'effet potentiel de la contamination du milieu par des prérequis sur la qualité du milieu d'élevage des salmonidés. Il y a des obligations sur la qualité de l'eau quand il y a prise d'eau en rivière ; s'il n'y a pas de classement de l'eau, l'opérateur doit procéder à des analyses de l'eau (avec des spécifications pour Hg, Pb, Cu, Zn et cyanures) et à des analyses dans la chair du poisson ; il y a par ailleurs une analyse des pratiques agricoles à risques sur le bassin versant pour les POP. Il n'y a cependant pas de données permettant d'estimer l'impact de ces engagements sur la contamination de la chair. Au-delà de la qualité du milieu d'élevage, le niveau de contamination de la chair de poisson carnivore par les polluants organiques persistants de type PCB ou PCDD/F dépend beaucoup de la composition de l'aliment distribué, avec des risques plus importants identifiés en production biologique. En effet, le CDC bio impose une proportion minimale (40%) de produits animaux dans la ration (pour respecter le comportement naturel des poissons carnivores), proportion plus élevée que celle observée en production conventionnelle (28%, (Berntssen *et al.*, 2016)), et qui va encore diminuer avec un scénario post-2020 de 14%. Les polluants environnementaux s'accumulant au cours de la chaîne trophique, il est ainsi plus difficile de maîtriser les risques de contamination de l'aliment distribué en production bio, sauf à sélectionner l'origine géographique des farines et huiles de poisson et éventuellement traiter les huiles. Ainsi, même s'il n'y a pas de publications scientifiques dans le Web of Science, les données de l'EFSA (2012), obtenues sur de faibles effectifs montrent des niveaux de contamination par les PCDD/F et PCB-DL supérieurs en saumon bio vs conventionnel. A signaler cependant que l'alimentation de plus en plus végé-substituée du saumon conventionnel pourrait faire émerger des risques associés à d'autres polluants comme les pesticides, mycotoxines ou hydrocarbures aromatiques polycycliques.

De façon générale, nous observons un manque d'études sur les produits bio transformés et identifions la nécessité d'études sur des procédés utilisant avec parcimonie les agents chimiques, additifs et conservateurs, dont l'emploi est limité en transformation biologique.

Pour toutes les filières animales, les propriétés d'image des produits animaux sous SIQO (dont les produits issus de l'AB) sont supérieures sur les aspects de propriétés organoleptiques, de santé des consommateurs, de caractère 'naturel' de la production et de traçabilité des produits. La perception, qu'ont les consommateurs du bien-être des animaux (BEA) dont sont issus ces produits, est plus élevée que pour un produit standard. Cependant, cette image peut être en partie 'surfaite', car certains critères du BEA ne sont pas toujours améliorés dans les productions sous SIQO (en production porcine : risque d'écrasement des porcelets par leur mère en système plein air ; pose d'anneaux naseaux pour éviter la dégradation des parcours en systèmes extensifs ; parfois exposition à la chaleur/froid ; en production de petits ruminants : exposition au parasitisme au pâturage, exposition à des conditions climatiques difficiles, etc.).

L'impact sur l'environnement est mitigé et variable selon les filières animales. Les émissions de GES, exprimées en kg eq. CO_2 par kg de produit sont proches en élevage biologique et conventionnel pour les produits de ruminants : +9%, -2% et -10% pour la viande bovine, ovine et pour le lait de vache en bio vs conventionnel (Pointereau, 2019), mais sans prise en compte de la séquestration du carbone dans les prairies, qui compense environ 30% des émissions des ruminants (Kondjoyan et Picard, 2019), bien que ce dernier chiffre soit controversé. Elles sont plus élevées pour la viande de volailles et de porc (+30% et +25% respectivement), à cause d'une durée d'élevage plus longue et d'une moindre efficacité alimentaire en bio (Pointereau, 2019). A signaler qu'une publication récente propose un changement d'unité fonctionnelle dans l'indicateur d'émission de GES prenant en compte la qualité du produit à travers sa teneur en AGPI n-3 (kg eq. CO_2 GES/g AGPI n-3 produit au lieu de kg eq. CO_2 GES/kg de produit), ce qui peut conduire à des changements dans le classement ou dans les écarts entre

systèmes bio et conventionnels, puisque les produits (laitiers et carnés) bio sont décrits comme plus riches en AGPI n-3 (Srednicka-Tober *et al.*, 2016a ; Srednicka-Tober *et al.*, 2016b). L'utilisation des terres nécessaires à la production est augmentée en bio par rapport au conventionnel de 10%, 27%, 40% en viande ovine, bovine et lait de vache et de 90% et 200% en viande de volailles et de porcs (Pointereau, 2019). Pour les ruminants, cette augmentation est liée à la moindre production par animal (par ex., -23% de lait produit/vache et par jour ou par lactation en bio, (Srednicka-Tober *et al.*, 2016b), à l'obligation du pâturage et aux moindres rendements fourragers. Pour les monogastriques, elle est liée à l'obligation de l'accès au plein air et la moindre densité en bâtiment, et à la durée d'élevage plus longue. Le besoin accru en terres pour produire la même quantité d'aliments bio a conduit à questionner la capacité des agriculteurs bio à nourrir le monde. Une étude récente montre cependant que les consommateurs de produits bio 'végétalisent' leur régime alimentaire, c'est-à-dire qu'ils mangent moins de produits animaux (viande et charcuterie notamment) et plus de produits végétaux et, qu'au final, l'empreinte environnementale du régime alimentaire (émissions de GES, énergie consommée) et la surface agricole nécessaire diminuent avec l'augmentation de la consommation de produits bio (Baudry *et al.*, 2019). Enfin, la non utilisation d'engrais et de pesticides de synthèse en bio conduit à une préservation des ressources en eau et de la biodiversité et prévient les dommages correspondants potentiels à la santé humaine ((Reganold et Wachter, 2016), cités par Benoit et Meda (Benoit et Meda, 2017)).

On constate souvent une plus grande variabilité des caractéristiques qualitatives des produits pour les produits bio et AOP vs. standards. Dans quelle mesure ceci constitue-t-il un problème ? La réponse n'est pas monolithique, elle dépend du type de produit, du contexte d'achat (lieu, circuit court/long, occasion) et du type de consommateurs. Les consommateurs ne recherchent pas forcément des produits bio ou AOP de qualité uniforme, au moins pour les produits bruts comme la viande. Ce sont surtout les circuits commerciaux dominants qui recherchent une qualité homogène, car elle permet une commercialisation plus aisée. Dans les circuits dits alternatifs (circuits courts, AMAP, etc.), ou pour des consommateurs souvent moins citadins, ces critères peuvent avoir moins d'importance. Il faut aussi distinguer les produits bruts des autres, car lorsqu'il y a une marque (industrielle ou distributeur), les consommateurs demandent alors effectivement de la régularité dans la qualité du produit. Même si l'absence d'une caractéristique majeure de satisfaction (par ex. tendreté de la viande) peut compromettre le ré-achat d'un produit sous signe de qualité, il faut signaler que des critères de qualité jugés négatifs sur un produit standard peuvent être bien acceptés si le produit est différencié (qualité spécifique) (Lebret et Faure, 2015). Cette plus grande variabilité peut aussi constituer un atout pour différencier les produits au sein d'un mode de production ou d'un cahier des charges pré établi : ainsi, certaines filières porcines locales considèrent la variabilité des ressources alimentaires disponibles en élevage extensif selon la saison d'élevage, et son impact sur les propriétés nutritionnelles et organoleptiques, comme un atout, un levier pour diversifier les produits au sein d'une AOP. Par exemple, la filière Noir de Bigorre cherche à valoriser la variabilité des caractéristiques du jambon sec (dont le profil en AG) selon la saison de finition des animaux.

2.10.3 Authentification de l'origine et des conditions d'élaboration et de conservation des produits par des méthodes analytiques

Cette partie a été conçue avec une entrée méthodologique, car les méthodes sont communes aux produits issus des différentes filières animales. Elle fait le point sur les outils d'authentification analytique, mais il faut signaler que des contrôles existent déjà, utilisant d'autres moyens (autocontrôles, traçabilité papier, visites d'élevage, etc.). Certaines de ces méthodes analytiques sont d'ores et déjà utilisées par les services de répression des fraudes, notamment celles relatives à la détection de l'adultération de l'espèce animale dans le produit (par exemple, l'incorporation frauduleuse de viande ou de lait d'une espèce animale dans un produit carné ou laitier). Certains exemples ont été donnés (authentification de l'origine herbagère de la viande et du lait –viande et lait issus d'animaux élevés à l'herbe-, authentification des produits de montagne, authentification de l'origine géographique du produit), en signalant les méthodes mobilisables, l'intérêt de les combiner, et les points de vigilance. En effet, au-delà de la détection de l'adultération de l'espèce animale, opérationnelle, la plupart des études sont encore de type 'preuve de concept', avec la nécessité de les tester sur des bases de données plus importantes et dans des conditions qui challengent leur robustesse et leur généricité.

2.10.4 Verrouillages, freins au changement, tensions entre acteurs de la filière

Les verrouillages et les freins au changement se situent à tous les maillons des filières du producteur au consommateur. Remettre en cause ces verrouillages conduit à remettre en cause des enchaînements extrêmement forts, ou des étapes pour lesquelles les acteurs de la chaîne alimentaire sont très puissants. Ainsi, au-delà des propriétés sanitaires qui sont un prérequis, le modèle dominant privilégie la quantité produite (voire la quantité produite/m^2 dans le cas des volailles) et les propriétés commerciales. Cette priorité donnée à la quantité produite et aux propriétés commerciales, notamment dans les

critères de paiement aux éleveurs, a fortement orienté les pratiques d'élevage (nutrition, logement des animaux, spécialisation des élevages) et le type d'animal (sélection génétique pour la production laitière ou la vitesse de croissance, l'efficacité alimentaire, le rendement en muscles, spécialisation lait/viande/ponte etc.). Cette priorité a permis des gains considérables : par ex. + 103 kg lait/vache laitière par an en France entre 1970 et 2010, + 47 kg de lait/vache laitière par an en Grande-Bretagne entre 1990 et 2013 (Wilkinson et Allen, 2015), augmentation de 10% du poids de la carcasse des vaches de réforme vendues grasses de race Charolaise en 23 ans (1990-2013) (De La Torre et Agabriel, 2017; Veysset *et al.*, 2014), même si cette évolution s'est arrêtée depuis 2014 ; en production porcine dominante, la recherche de la réduction de l'âge à l'abattage et de l'adiposité corporelle pour optimiser le coût de production et la valeur commerciale des carcasses s'est traduite par une augmentation du gain de poids quotidien de plus de 200 g et du taux de viande maigre dans la carcasse de plus de 12 points entre 1970 et 2015 (Bidanel *et al.*, 2018), d'une diminution de l'âge à 105 kg de 189 à 165 j entre 1985 et 2015 et d'une réduction de près de 45% de l'adiposité entre 1977 et 2016 (Schwob *et al.*, 2020) ; chez le poulet, augmentation du poids et du rendement en filet de 280 g à 464 g et de 13,5% à 21,1% entre 1957 et 2012 (Baeza *et al.*, 2019). Cependant, les antagonismes avec les autres volets de la qualité (propriétés organoleptiques, nutritionnelles, technologique et d'image), le bien-être animal, l'adaptation des animaux à des systèmes d'élevage plus agro-écologiques, et plus largement les ressources utilisées et la dégradation des écosystèmes, ainsi que l'acceptabilité sociale de certains systèmes d'élevage, conduisent à questionner cette orientation dominante, ainsi que la répartition de la valeur ajoutée entre les différents maillons des filières.

La concentration géographique et économique de certains opérateurs et la mondialisation des échanges sont des freins importants au changement (exemple du faible nombre de sélectionneurs en volailles avec une génétique mondialisée), de même que les fortes distorsions de concurrence entre pays (coût des matières premières et de la main d'œuvre, réglementations). Par ailleurs, la spécialisation de l'orientation productive (lait/viande/ponte) conduit à des difficultés de valorisation de certains animaux ou certains produits qui ne remplissent pas les 'canons' de la qualité commerciale (poussins mâles, viande caprine –problème de l'équarrissage d'une certaine proportion de chevreaux et des chèvres de réforme-, veaux laitiers dans certains pays) ; en ovins, seuls les agneaux de race Lacaune des troupeaux laitiers sont engraissés, les autres races n'ayant pas d'aptitude à l'engraissement. Au niveau production et transformation, changer peut impliquer une re-conception des systèmes d'élevage (conversion à l'agriculture biologique par ex.) et/ou de nouveaux investissements et des risques que certains maillons ne souhaitent pas ou ne peuvent pas réaliser. Par exemple, l'agrandissement des troupeaux laitiers (+ 2 vaches/troupeau/an en moyenne en France) associé au développement des robots de traite conduit à une régression de la pratique du pâturage (les éleveurs préférant alors le maïs ensilage et le zéro pâturage, en dépit des surcoûts engendrés) (Peyraud *et al.*, 2019). Les consommateurs sont également parfois réticents à changer leurs habitudes alimentaires.

Quelques exemples :

- Classement commercial de la carcasse des bovins et des ovins : le classement commercial de la carcasse attribué à l'abattoir détermine en grande partie le prix de vente, mais ne présage pas d'autres caractéristiques qualitatives, telles que les propriétés organoleptiques, nutritionnelles et technologiques. L'absence de pertinence du classement EUROP pour l'appréciation des qualités en bouche a ainsi été récemment confirmé (Bonny *et al.*, 2016). Le récent plan de filière bovine français propose de mieux satisfaire les attentes qualitatives (propriétés organoleptiques et sociétales), en soulignant la nécessité de nouveaux indicateurs de la qualité des produits plus connectés aux attentes sociétales. Il souhaite l'inclusion de critères organoleptiques minimaux dans les cahiers des charges de tous les signes officiels de qualité, y compris le bio. Des études s'intéressent à l'application en Europe d'un modèle de prédiction des propriétés organoleptiques (notamment la tendreté) de la viande bovine développé en Australie (MSA pour Meat Standards Australia, modèle proche en cours de développement pour la viande ovine). Ce modèle permet de prédire les propriétés organoleptiques (notamment la tendreté) de la viande à l'abattoir, à partir d'une douzaine de paramètres concernant les caractéristiques des animaux, les conditions de pré-abattage et d'abattage, certaines caractéristiques de la viande, la durée de maturation et la méthode de cuisson (voir chapitre 1). Ce système développé depuis 2000 et qui est appliqué actuellement sur plus de 40% des bovins adultes abattus en Australie, a permis de i) commercialiser la viande avec une information relative à la qualité perçue en bouche, donc de faciliter les choix des consommateurs et ii) générer une plus-value économique répartie entre les différents acteurs de la filière (notamment les éleveurs, qui ont une incitation financière à produire une viande de bonne qualité organoleptique). Il est en cours d'adaptation dans différents pays européens pour prendre en compte les spécificités de l'Europe en termes de types d'animaux produits et de consommateurs (méthode 3G). Le sujet ne fait pas l'unanimité, il est même clivant, avec des professionnels favorables, d'autres opposés. Les craintes formulées sont que ce système conduise à dévaloriser le troupeau allaitant au profit du troupeau laitier, concurrence le SIQO Label Rouge et soit une opération de promotion de l'interprofession bovine australienne pour étendre ses activités d'exportation.

- Génétique/type d'animal

Viande de poulets : la sélection génétique pour la vitesse de croissance et l'accroissement du rendement en filet a conduit à des défauts majeurs de qualité du filet ('white striping', 'wooden breast', 'oregon disease', filets 'spaghettis') qui affectent les propriétés technologiques, nutritionnelles, organoleptiques (Baeza *et al.*, 2019) et posent des problèmes de bien-être animal (myopathies) (Baeza *et al.*, 2019). Les seules solutions identifiées pour le moment (limitation de la vitesse de croissance, réduction du poids et de l'âge à l'abattage, réduction de la concentration en énergie des aliments, utilisation de souches moins performantes et/ou moins conformées) entraînent des baisses de performance et donc une augmentation du prix de production (Baeza *et al.*, 2019). La génétique est fortement questionnée, la sélection des lignées destinées à la production de viande issue de poulets standards ayant été réalisée en prenant en compte des caractères quantitatifs (poids et rendement en filet) sans intégrer les conséquences sur l'intégrité du muscle et plus généralement la physiologie de l'animal (Baeza *et al.*, 2019). Même s'il y a actuellement une prise de conscience, quelles orientations seront prises dans le futur par les sélectionneurs ?

Viande de porc : plusieurs études mettent en évidence une altération des propriétés technologiques des viandes (réduction de la capacité de rétention d'eau et du rendement technologique suite à un métabolisme musculaire plus glycolytique) et organoleptiques (viande plus claire et plus exsudative) avec les progrès génétiques réalisés sur les performances zootechniques (vitesse de croissance, efficacité alimentaire, teneur en muscle des pièces) (Lebret, 2004). Les relations génétiques sont en effet globalement défavorables entre les propriétés technologiques et organoleptiques d'une part, et les caractères de croissance et les caractéristiques des carcasses (propriétés commerciales) d'autre part. La sélection génétique contre l'adiposité s'est également accompagnée d'une altération des propriétés technologiques (aptitude à la transformation en produits de charcuterie et salaison) des tissus gras (Schwob *et al.*, 2020). Cependant, en production conventionnelle, le poids et la teneur en maigre des carcasses constituant la base du paiement aux producteurs depuis les années 1950-60, a logiquement conduit à favoriser ces caractères au détriment des propriétés qualitatives des viandes. Comment gérer ces antagonismes ? Qui décide du poids à donner à l'un ou l'autre des caractères ? Afin de mieux adapter l'offre aux demandes sur la qualité de la viande, la suggestion de disposer de plusieurs grilles de paiement qui tiendraient compte des objectifs recherchés notamment sur les segments relatifs aux démarches de qualité supérieure, a été évoquée par les professionnels dans le cadre du plan de filière (INAPORC, 2018).

Viande bovine : Le classement de la carcasse à l'abattoir, basé sur le poids et la conformation, a conduit à privilégier les animaux lourds et fortement développés et à sélectionner sur ce critère, même si ce classement ne présume pas de la qualité en bouche pour les consommateurs (Lebret et Picard, 2015). Cette orientation de la sélection a aussi permis d'augmenter le poids vif des broutards lorsqu'ils partent à l'export (Veysset *et al.*, 2014). Cette sélection pour le format et le développement musculaire et contre le tissu adipeux (dont les lipides intramusculaires qui déterminent le persillé de la viande) affecte cependant les propriétés organoleptiques (manque de persillé) et l'aptitude de l'animal à être engraissé à l'herbe (manque de précocité). Après le sevrage, les jeunes bovins sont ainsi en majorité exportés vers des ateliers d'engraissement (Italie), où ils sont engraissés avec des rations à base d'ensilage de maïs et/ou de concentrés. De plus, la France privilégie les animaux de race pure plutôt que ceux issus de croisements (lesquels sont largement utilisés dans les autres pays), ce qui ne permet pas de contourner, au moins partiellement, ce verrou, en apportant de la précocité. Ces verrous sur l'engraissement des jeunes bovins à l'herbe impactent négativement les propriétés nutritionnelles de la viande (Berthelot et Gruffat, 2018 ; Duru *et al.*, 2017a), ses propriétés d'image et l'acceptabilité sociale de l'élevage (Delaby *et al.*, 2018), les performances environnementales des systèmes d'élevage (Morel *et al.*, 2016 ; Provenza *et al.*, 2019), ainsi que l'intensité de la compétition feed/food (Duru *et al.*, 2017b). Ils ne permettent pas non plus la complète valorisation de la viande produite en agriculture biologique. L'orientation vers des systèmes d'élevage plus herbagers et agro-écologiques questionne ainsi la génétique (critères de sélection, et croisements) pour amener de la précocité (voir Chapitre 6).

Viande ovine : bien qu'à un degré moindre que pour la viande bovine, la sélection pour le développement musculaire et contre le tissu adipeux pose les mêmes problèmes pour finir les agneaux à l'herbe. La filière ovine française s'est beaucoup orientée vers la production d'agneaux de bergerie, dont l'itinéraire technique est plus simple et qui permet un approvisionnement régulier de la filière aval en agneaux jeunes et de qualité peu variable. Ainsi, l'orientation vers des systèmes d'élevage plus agro-écologiques, avec engraissement des agneaux à l'herbe questionne la génétique (précocité de finition et résistance au parasitisme, plutôt que la seule recherche de forts potentiels de croissance et développement musculaire) (Prache *et al.*, 2018).

Poissons : comme dans les autres filières animales, les programme de sélection actuels portent sur les performances de croissance, l'adiposité et les rendements de découpe, ce qui pose la question d'un lien éventuel entre ces paramètres et les propriétés organoleptiques des produits. Ces liens sont étudiés dans quelques études, avec des résultats variables. Les propriétés organoleptiques (couleur, à travers l'aptitude à la pigmentation, texture, résistance mécanique des filets)

pourraient rentrer dans des schémas de sélection génétique pour améliorer la qualité des produits, mais pour le moment aucune étude ne rapporte les effets éventuels d'une telle sélection génétique.

2.10.5 Nouveautés, lacunes, incertitudes, controverses

Nouveautés :

-Qualités des produits 'bruts' bio dont 2 méta-analyses (Srednicka-Tober *et al.*, 2016a ; 2016b) de 2016 sur les propriétés nutritionnelles de la viande et du lait, et lien avec la santé des consommateurs (voir Chapitre 6).

-Développement d'un modèle de prévision des propriétés organoleptiques de la viande bovine, à partir de bases de données reliant ces propriétés avec certaines caractéristiques des animaux, des carcasses et des viandes, en interaction avec les modalités de transformation de la viande (Bonny *et al.*, 2018; Watson *et al.*, 2008a ; Watson *et al.*, 2008b). Les paramètres utilisés dans le modèle concernent les caractéristiques des animaux (maturité physiologique mesurée par le degré d'ossification, poids, type génétique, sexe, hauteur de la bosse de la carcasse au niveau de la nuque), les conditions de pré-abattage et d'abattage (méthode de suspension des carcasses), la viande (pH, couleur, persillé) et les évènements *post-mortem* (durée de maturation, méthode de cuisson, etc.). Ce modèle est en cours d'adaptation à la viande ovine ; il est également en cours d'adaptation en Europe.

-Brevet déposé par équipe danoise sur une méthode instrumentale permettant de détecter les carcasses de porcs malodorantes sur la ligne d'abattage (quantification des teneurs en androstérone, scatol et indole du gras dorsal par spectrométrie de masse ; 350 échantillons/heure). Les premiers résultats sont prometteurs, mais cette méthodologie nécessite des moyens financiers et techniques très importants.

-Incorporation de nouveaux ingrédients comme les micro-algues riches en AGPI-LC n-3 dans les aliments pour animaux (ruminants, poissons, monogastriques) qui pourrait permettre d'augmenter les teneurs en AGPI-LC n-3 des produits ; cependant, leur disponibilité est encore limitée et leur coût élevé. Pour les poissons, outre les ingrédients d'origine végétale, les recherches s'orientent également vers l'incorporation de nouvelles sources comme les farines d'insectes.

-La prise en compte des propriétés nutritionnelles des produits animaux dans les analyses d'impact environnemental (émissions de GES et surfaces arables nécessaires) dans une étude pionnière (McAuliffe *et al.*, 2018), voir Tableau ci-dessous). Les auteurs comparent l'impact de différents systèmes d'élevage (bovins allaitants extensif à l'herbe vs. intensif au concentré, ovins allaitant herbagers en plaine vs. en montagne, poulet intensif vs. en plein air, porc intensif). Plusieurs unités fonctionnelles sont comparées, certaines classiques (1 : kg équivalent CO_2/kg de poids vif, de carcasse ou de viande), d'autres nouvelles intégrant la composition nutritionnelle des produits (2 : kg équivalent CO_2/g AGPI n-3, 3 : kg équivalent CO_2/g AGPI n-3 LC, 4 : kg équivalent CO_2 rapportés à un index nutritionnel prenant en compte un ensemble de nutriments à privilégier ou à limiter). Les résultats montrent que le classement des systèmes bovins allaitants s'inverse si l'on prend en compte ou pas les propriétés nutritionnelles de la viande produite (indicateur 1 vs 2 ou 3). De plus, si les systèmes d'élevage de monogastriques sont toujours mieux classés que les systèmes d'élevage de ruminants avec les indicateurs 1, 2 ou 3, les écarts diffèrent selon l'indicateur considéré. Enfin, c'est le système bovin allaitant extensif à l'herbe qui est le mieux placé avec l'indicateur multi-nutriments 4. Par ailleurs, si ce sont les élevages de ruminants qui sont les plus émetteurs de GES, ce sont les élevages de monogastriques qui nécessitent le plus de terres arables par tonne de protéines produite.

-Déterminisme génétique du rendement de découpe chez le poisson (carcasse et filet ; héritabilité de 0,49 et 0,35) ; réponse à la sélection sur le filet démontrée récemment sur la truite (2019).

-Un article récent portant sur le possible impact du réchauffement climatique induisant une hausse des températures estivales, rapporte un impact drastique sur la couleur des filets du poisson, avec une partie de la production présentant des filets totalement dépigmentés, ne permettant pas leur commercialisation.

Incertitudes :

- Différentes méthodes pour l'évaluation des propriétés organoleptiques des produits (jurys entrainés vs. naïfs, *cf.* chapitre 1), dont les résultats ne sont pas toujours concordants. Beaucoup d'études utilisent des jurys entraînés, mais certains scientifiques considèrent que cette méthode présente des défauts de représentativité (biais possibles et mise en évidence de différences non perceptibles par des consommateurs naïfs). Les évaluations par des consommateurs 'naïfs' sont plus sensibles à la variabilité inter-individuelle, mais sont considérées comme plus représentatives de la population dans son ensemble et leur précision est assurée par le grand nombre de consommateurs.

- Viande bovine : tendreté encore difficile à maîtriser. Mise en place de signes de qualité, mais la filière se heurte à la variabilité entre animaux. Intérêt du système MSA (méthode 3G en Europe) ? Le manque de tendreté est aussi lié à une durée de maturation insuffisante du fait d'une nécessité économique de rotation rapide des stocks. Qui est prêt à payer le coût

supplémentaire de conservation de la viande en conditions réfrigérées ? Certaines enseignes la pratiquent (*cf.* armoires de maturation au rayon boucherie).

- Comportement contradictoire des consommateurs vis-à-vis du gras de la viande. Les enquêtes consommateurs montrent qu'ils choisissent de la viande avec moins de gras, mais qu'à la dégustation, ils préfèrent la viande plus grasse qui a plus de goût et est plus tendre.

- Odeur/flaveur (viandes porcine et ovine) : incertitudes sur le seuil de tolérance/acceptation de composés responsables de défauts (androsténone, scatol, indole…). Le caractère hédonique (agréable ou désagréable) de l'odeur/flaveur varie avec la teneur de ces composés odorants dans la viande : l'odeur/flaveur peut être bien acceptée, voire agréable quand la concentration est faible, et poser problème à partir d'un certain seuil. La difficulté réside dans le fait que la réponse varie beaucoup selon les consommateurs, leur propre sensibilité olfactive ou gustative, leur expérience personnelle, mais aussi les habitudes alimentaires du pays (cas de la viande ovine). Par ailleurs, ces composés odorants ne sont pas les seuls présents dans le produit, les consommateurs perçoivent le résultat d'un mélange d'odeurs/flaveurs, avec de possibles interactions entre différents composés ; l'utilisation de proxys peut alors être trop réductrice. Les propriétés organoleptiques d'odeur/flaveur d'un produit sont donc subjectives et complexes à appréhender.

-Incertitudes sur les propriétés de certains produits issus de l'agriculture biologique (vs conventionnelle), du fait de la grande variabilité des pratiques d'élevage. Les résultats peuvent être différents entre études.

-La qualité d'image est importante, mais elle n'est pas facile à appréhender. Les attentes, perceptions et comportements des consommateurs sont variables entre segments de consommateurs, voire pour un consommateur donné selon les circonstances de consommation. D'autre part, cette qualité d'image interagit avec les autres volets de la qualité. Toutes les filières animales soulignent l'écart de qualité perçue lorsque des informations sont communiquées aux consommateurs sur les conditions d'élaboration (production et transformation) du produit et son origine. De plus, des critères de qualité jugés négatifs sur un produit standard peuvent être bien acceptés par les consommateurs si le produit est différencié, ce qui ajoute à la complexité (souligné en viande ovine et porcine). De plus, cette interaction est variable : par exemple, une étude conduite aux USA sur la viande de volailles a montré que les consommateurs peuvent se détourner des produits biologiques pour d'autres signes de qualité si la filière bio est jugée comme s'étant 'conventionnalisée'. Enfin, l'accès des animaux à l'extérieur pour leur bien-être peut conduire à une maîtrise plus difficile des propriétés sanitaires (exposition plus importante à certains pathogènes et/ou aux contaminants de l'environnement). Par ailleurs, les impacts environnementaux, qui occupent une place croissante dans les attributs d'image, peuvent varier fortement selon les systèmes de production, mais le classement de ces derniers est largement dépendant de l'unité fonctionnelle choisie. Par exemple, en porc, les systèmes conventionnels présentent des impacts globaux (changement climatique, utilisation d'énergie, utilisation de terres), exprimés par kg de porc, plus faibles que les systèmes alternatifs, alors que le classement s'inverse pour les impacts locaux (acidification, eutrophisation), exprimés par hectare (Dourmad *et al.*, 2014). Des études récentes proposent de prendre en compte la qualité nutritionnelle des produits dans ces impacts environnementaux, ce qui modifie encore le classement des différents systèmes d'élevage (McAuliffe *et al.*, 2018). Ainsi, pour la viande, le Tableau suivant montre que i) le classement des systèmes bovins allaitant sur le potentiel de réchauffement climatique s'inverse si le classement est réalisé sur l'unité fonctionnelle kg équivalent CO_2/kg viande ou une unité fonctionnelle prenant en compte la qualité du produit (kg équivalent CO_2/g AGPI n-3 dans la viande ou kg équivalent CO_2/g AGPI n-3 LC dans la viande), ii) le classement des systèmes ruminants vs monogastriques s'inverse selon l'impact sur l'environnement considéré (potentiel de réchauffement climatique vs. surfaces arables nécessaires pour produire 1 tonne de protéines animales). Les différents attributs constitutifs de la qualité d'image (bien-être animal, naturalité, empreinte environnementale) sont donc complexes à appréhender, ils peuvent être sources de tensions (entre eux et avec les autres propriétés constitutives de la qualité du produit), ce qui nécessite de trouver des compromis.

Impact environnemental (potentiel de réchauffement climatique et surface de terres arables nécessaires à la production) dans différentes filières animales et systèmes d'élevage (tiré de McAuliffe *et al.* (2018) et Wilkinson et Lee (2018))

	Potentiel de réchauffement climatique (kg eqCO_2/kg viande)	Potentiel de réchauffement climatique (kg eqCO_2/g AGPI n-3 dans la viande)	Potentiel de réchauffement climatique (kg eqCO_2/g AGPI n-3 LC dans la viande)	Surface arable nécessaire (ha) /t protéines animales produites
Viande bovine (ration à base de concentrés)	9,8	48,0	288,1	3,05

Viande bovine (ration à base de fourrages)	18,3	18,5	67,7	0,94 (en plaine) à 2,04 (en montagne)
Viande ovine (à l'herbe en plaine)	26,1	28,7	99,2	1,10
Viande ovine (à l'herbe en montagne)	30,9	30,0	98,9	1,58
Viande de poulet intensif	4,4	1,2	25,1	3,13
Viande de poulet plein air	5,1	2,4	34,7	Pas spécifié
Viande de porc intensif	7,4	14,4	50,3	3,80
Lait (système herbager)				0,62
Œufs				3,74

Controverses/débats :

-Controverses sur l'intérêt d'augmenter la consommation de poissons, particulièrement en vue d'atteindre les recommandations nutritionnelles pour le DHA et EPA tout en limitant les contaminants (mercure et polluants organiques persistants). Plusieurs solutions sont actuellement proposées et partiellement mises en oeuvre, la décontamination des huiles de poisson (principal vecteur des POP), l'utilisation d'algues marines riches en AGPI (mais coûteux) et la sélection de l'origine géographique des farines et des huiles de poisson.

-Des débats existent dans les filières fromagères au lait cru ainsi que dans la communauté scientifique sur les pratiques de traite. Certains guides de bonnes pratiques mettent l'accent sur le renforcement des mesures d'hygiène dans les environnements des animaux, en particulier lors de la traite, pour éliminer les flores indésirables du lait, mais cette stratégie peut également réduire de façon drastique les flores d'intérêt pour la fabrication fromagère et ainsi favoriser le développement de flores indésirables ou pathogènes en raison de l'absence de compétition entre groupes microbiens. Il a été montré que la présence d'une nombreuse flore microbienne d'intérêt peut exercer un effet protecteur du lait contre le développement de flores indésirables dans le lait cru.

Lacunes et nécessité de recherche :

- Nécessité de méta-analyses pour synthétiser les informations disponibles et proposer des lois de réponse plus robustes concernant les relations entre les facteurs de production et les différentes propriétés constitutives de la qualité.

-Affiner les modèles prédictifs de la composition en AG tissulaires en fonction de l'alimentation des animaux (composition du régime, durée de l'alimentation…), les performances de croissance et la composition des carcasses en prenant en compte divers types génétiques et conduites alimentaires et différents tissus cibles.

- Les facteurs de variation de la qualité sont nombreux, ils concernent souvent toutes les étapes de la chaîne alimentaire et ils peuvent interagir entre eux. Des travaux intégratifs sont en cours sur la viande bovine pour développer des modèles de prédiction de la qualité des carcasses et des viandes en fonction des pratiques d'élevage. Au-delà, certaines méthodes développées à l'étranger intègrent les pratiques de transformation (dont la cuisson) dans l'objectif de prédire la qualité organoleptique de la viande bovine (modèle MSA développé en Australie). Des études sont en cours qui s'inspirent d'un tel modèle de prévision pour l'adapter aux conditions européennes (types d'animaux différents, consommateurs différents) (Legrand *et al.*, 2013 ; Legrand *et al.*, 2017 ; Pogorzelski *et al.*, 2020).

- Produits bio : peu d'études sur l'œuf, le poisson, le lait de petits ruminants ; méta-analyses encore peu robustes sur la viande (plus d'études nécessaires). Pas d'études sur les niveaux de contamination des salmonidés sous SIQO bio et/ou Label Rouge, alors que les cahiers des charges de ces SIQO obligent à une part minimum de farines et huiles de poissons dans la ration. Très peu d'études sur les produits transformés comparant les produits bio vs. conventionnels.

-Mieux comprendre l'origine du défaut de déstructuration musculaire, qui entraîne des défauts majeurs d'aspect et de texture et est particulièrement impactant pour certaines filières (volailles, poissons, porcs). L'identification de l'origine du défaut est une nécessité pour envisager la mise en œuvre de facteurs correctifs efficaces et réduire ses impacts forts en termes économiques, technologiques mais aussi d'image (gaspillage) dans la filière. On ignore encore si la lésion est présente dès l'élevage ou si elle est déclenchée par les opérations de transport et d'abattage. Il n'y a pas à ce jour d'indicateur précis et

robuste disponible pour prédire avant désossage la déstructuration éventuelle des muscles. Des recherches sont en cours sur des marqueurs plasmatiques de ce défaut permettant de le détecter du vivant de l'animal (Theron *et al.*, 2019).

- Développer des méthodes de détection rapides et fiables des odeurs indésirables des viandes (porcs mâles entiers, agneaux) sur la ligne d'abattage, associées, au niveau hédonique, à une détermination des seuils d'acceptabilité des différentes molécules odorantes selon les produits et les modes de transformation, pour optimiser la valorisation des carcasses ou pièces. Dans la filière porcine, le contrôle des niveaux d'androsténone des viandes de porcs mâles entiers par la voie génétique (sélection) est possible, mais il est nécessaire de veiller à ne pas altérer d'autres caractères, comme les performances de reproduction, ou d'autres composantes de la qualité des viandes (projet France Futur Elevage en cours sur ce sujet). Concernant le scatol, autre composé responsable des odeurs indésirables des viandes porcines et ovines, les principaux leviers d'action concernent la conduite d'élevage.

- Peu d'études publiées sur les produits transformés de volailles dans les pays occidentaux, hormis sur les aspects sanitaires, du fait de l'évolution rapide des procédés technologiques et du secret industriel.

- Mieux connaître les déterminants de la composition microbiologique du lait cru, laquelle est très importante pour les propriétés organoleptiques et sanitaires du fromage.

- Mieux connaître les facteurs de variation de la teneur du lait en minéraux et en vitamine C du lait et compléter les connaissances sur les vitamines du groupe B.

- Mieux comprendre les mécanismes impliqués dans les liens entre la consommation de fromages au lait cru et la santé humaine.

- Mieux connaître les facteurs de variation de la nature et de la quantité de peptides (dont peptides bioactifs) libérés par les produits laitiers.

- Documenter l''effet des caractéristiques initiales du lait cru sur la flaveur du lait UHT

-Chair de poissons :

*Comme dans les autres filières animales, les programme de sélection actuels portent sur les performances de croissance, l'adiposité et les rendements de découpe, ce qui pose la question d'un lien éventuel entre ces paramètres et les propriétés organoleptiques des produits. Ces liens sont étudiés dans quelques études, avec des résultats variables. Les propriétés organoleptiques (couleur, à travers l'aptitude à la pigmentation, texture, résistance mécanique des filets) pourraient rentrer dans des schémas de sélection génétique pour améliorer la qualité des produits, mais pour le moment aucune étude ne rapporte les effets éventuels d'une telle sélection génétique.

*Très peu d'études concernent l'effet du système d'élevage (SIQO dont bio en particulier, circuits recirculés vs circuit ouvert) sur les propriétés constitutives de la qualité des produits. Les quelques études disponibles manquent par ailleurs de rigueur, car il y a des confusions d'effets avec l'alimentation, l'origine génétique, les paramètres physico-chimiques de l'eau, ce qui ne permet pas d'imputer les résultats au système d'élevage *stricto sensu*.

*Manque d'études sur l'effet de l'impact de la qualité de l'eau (teneurs en O_2, CO_2, composés azotés, matières en suspension, pH) sur les propriétés organoleptiques, alors que l'effet sur les performances zootechniques est largement documenté.

*Documenter les liens entre les conditions d'élevage et les teneurs en vitamines de la chair de poisson.

*Expliquer les mécanismes d'orientation des dépôts lipidiques vers la cavité abdominale plutôt que vers le muscle ; on observe que de forts taux de substitution des matières premières issues de poissons par des matières premières d'origine végétale augmentent les dépôts lipidiques dans cavité abdominale, sans changer ceux du muscle.

*Etudier la possible variabilité de la présence d'arêtes, souvent énoncée comme une limite à la consommation de poissons.

- Etudier l'étape de préparation domestique, car le risque de dégradation de la qualité (propriétés organoleptiques, mais aussi sanitaires et santé) y est important.

Références bibliographiques

Aldai, N.; Dugan, M.E.R.; Kramer, J.K.G.; Martinez, A.; Lopez-Campos, O.; Mantecon, A.R.; Osoro, K., 2011. Length of concentrate finishing affects the fatty acid composition of grass-fed and genetically lean beef: an emphasis on trans-18:1 and conjugated linoleic acid profiles. *Animal*, 5 (10): 1643-1652. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731111000607

Alvarez-Rodriguez, J.; Villalba, D.; Cubilo, D.; Babot, D.; Tor, M., 2016. Organic practices and gender are effective strategies to provide healthy pork loin. *Journal of Integrative Agriculture*, 15 (3): 608-617. http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(15)61172-8

Andraud, M.; Halasa, T.; Boklund, A.; Rose, N., 2019. Threat to the French Swine Industry of African Swine Fever: Surveillance, Spread, and Control Perspectives. *Frontiers in Veterinary Science*, 6. http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2019.00248

Anses, 2015. *Apports en acides gras de la population vivant en France et comparaison aux apports nutritionnels conseillés définis en 2010. Avis de l'Anses- Rapport d'étude*. Paris: Anses, (Autosaisine n° 2014-SA-0117 « Apports en acides gras et comparaison aux ANC 2010 »), 244 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014sa0117Ra.pdf

Baeza, E.; Chartrin, P.; Lessire, M.; Meteau, K.; Chesneau, G.; Guillevic, M.; Mourot, J., 2015. Is it possible to increase n-3 fatty acid content of meat without affecting its technological and/or sensory quality and the growing performance of chickens? *British Poultry Science*, 56 (5): 543-550. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2015.1068428

Baeza, E.; Le Bihan-Duval, E.; Pampouille, E.; Bourin, M.; Berr, C., 2019. Quelles stratégies pour limiter les problèmes de qualité de viande ? *13. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, 20-21 mars 2019, 442-453.

Baudry, J.; Assmann, K.E.; Touvier, M.; Alles, B.; Seconds, L.; Latino-Martel, P.; Ezzedine, K.; Galan, P.; Hercberg, S.; Lairon, D.; Kesse-Guyot, E., 2018a. Association of Frequency of Organic Food Consumption With Cancer Risk Findings From the NutriNet-Sante Prospective Cohort Study *Jama Internal Medicine*, 178 (12): 1597-1606. http://dx.doi.org/10.1001/jamainternmed.2018.4357

Baudry, J.; Ducros, V.; Druesne-Pecollo, N.; Galan, P.; Hercberg, S.; Debrauwer, L.; Amiot, M.J.; Lairon, D.; Kesse-Guyot, E., 2019. Some Differences in Nutritional Biomarkers are Detected Between Consumers and Nonconsumers of Organic Foods: Findings from the BioNutriNet Project. *Current Developments in Nutrition*, 3 (3): 9. http://dx.doi.org/10.1093/cdn/nzy090

Baudry, J.; Lelong, H.; Adriouch, S.; Julia, C.; Alles, B.; Hercberg, S.; Touvier, M.; Lairon, D.; Galan, P.; Kesse-Guyot, E., 2018b. Association between organic food consumption and metabolic syndrome: cross-sectional results from the NutriNet-Sant, study. *European Journal of Nutrition*, 57 (7): 2477-2488. http://dx.doi.org/10.1007/s00394-017-1520-1

Baudry, J.; Peneau, S.; Alles, B.; Touvier, M.; Hercberg, S.; Galan, P.; Amiot, M.J.; Lairon, D.; Mejean, C.; Kesse-Guyot, E., 2017. Food Choice Motives When Purchasing in Organic and Conventional Consumer Clusters: Focus on Sustainable Concerns (The NutriNet-Sante Cohort Study). *Nutrients*, 9 (2): 17. http://dx.doi.org/10.3390/nu9020088

Benoit, M.; Meda, B., 2017. Challenges and assets of official signs of quality in livestock production to meet societal expectations: the example of organic lamb and Label Rouge chicken productions. *Inra Productions Animales*, 30 (4): 381-394. https://productions-animales.org/article/view/2267/4861

Berntssen, M.H.G.; Sanden, M.; Hove, H.; Lie, O., 2016. Modelling scenarios on feed-to-fillet transfer of dioxins and dioxi-like PCBs in future feeds to farmed Atlantic salmon (Salmo salar). *Chemosphere*, 163: 413-421. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.067

Berthelot, V.; Gruffat, D., 2018. 12. Fatty acid composition of muscles in cattle and lamb. In: Noziere, P.; Sauvant, D.; Delaby, L., eds. *Feeding system for ruminants*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 193-202.

Bidanel, J.P.; Silalahi, P.; Tribout, T.; Canario, L.; Ducos, A.; Garreau, H.; Gilbert, H.; Larzul, C.; Milan, D.; Riquet, J.; Schwob, S.; Mercat, M.J.; Hessenfratz, C.; Bouquet, A.; Bazin, C.; Bidanel, J., 2018. Cinquante années d'amélioration génétique du porc en France : bilan et perspectives. *50. Journées de la Recherche Porcine*. Paris, 61-74.

Bonny, S.P.F.; O'Reilly, R.A.; Pethick, D.W.; Gardner, G.E.; Hocquette, J.F.; Pannier, L., 2018. Update of Meat Standards Australia and the cuts based grading scheme for beef and sheepmeat. *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (7): 1641-1654. http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(18)61924-0

Bonny, S.P.F.; Pethick, D.W.; Legrand, I.; Wierzbicki, J.; Allen, P.; Farmer, L.J.; Polkinghorne, R.J.; Hocquette, J.F.; Gardner, G.E., 2016. European conformation and fat scores have no relationship with eating quality. *Animal*, 10 (6): 996-1006. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115002839

Calder, P.C.; Kremmyda, L.S.; Vlachava, M.; Noakes, P.S.; Miles, E.A., 2010. Is there a role for fatty acids in early life programming of the immune system? *Proceedings of the Nutrition Society*, 69 (3): 373-380. http://dx.doi.org/10.1017/s0029665110001552

Chilliard, Y.; Ferlay, A.; Mansbridge, R.M.; Doreau, M., 2000. Ruminant milk fat plasticity: nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids. *Annales De Zootechnie*, 49 (3): 181-205.

CNPO, 2018. *Plan de filière Oeufs synthèse*: Interprofession des œufs 23 p.

Coble, K.F.; DeRouchey, J.M.; Tokach, M.D.; Dritz, S.S.; Goodband, R.D.; Woodworth, J.C., 2017. Effects of distillers dried grains with solubles and added fat fed immediately before slaughter on growth performance and carcass characteristics of finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 95 (1): 270-278. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2016.0679

Dangour, A.D.; Dodhia, S.K.; Hayter, A.; Allen, E.; Lock, K.; Uauy, R., 2009. Nutritional quality of organic foods: a systematic review. *American Journal of Clinical Nutrition*, 90 (3): 680-685. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.2009.28041

De La Torre, A.; Agabriel, J., 2017. Feed efficiency of beef cows help to calculate their feeding allowances through the quantification of the non-productive expenses. *Inra Productions Animales*, 30 (2): 153-163. https://www6.inra.fr/productions-animales/content/download/7577/99135/version/1/file/Prod_Anim_30_2_05.pdf

Delaby, L.; Buckley, F.; Mchugh, N.; Blanc, F., 2018. Robust animals for grass based production systems. *27. General meeting of the European Grassland Federation (EGF) - Grassland Science in Europe vol. 23*. Jun 2018, Cork, Ireland, 389-400.

Delanoue, E.; Dockes, A.-C.; Chouteau, A.; Roguet, C.; Philibert, A., 2018. Social acceptability of French livestock production: debated issues and controversies on livestock production, points of view of multiple stakeholders. *Inra Productions Animales*, 31 (1): 51-68. https://productions-animales.org/article/view/2203

Dervilly-Pinel, G.; Guerin, T.; Minvielle, B.; Travel, A.; Normand, J.; Bourin, M.; Royer, E.; Dubreil, E.; Mompelat, S.; Hommet, F.; Nicolas, M.; Hort, V.; Inthavong, C.; Saint-Hilaire, M.; Chafey, C.; Parinet, J.; Cariou, R.; Marchand, P.; Le Bizec, B.; Verdon, E.; Engel, E., 2017. Micropollutants and chemical residues in organic and conventional meat. *Food Chemistry*, 232: 218-228. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.013

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Nabinger, C.; Prache, S., 2014. Influence of fresh alfalfa supplementation on fat skatole and indole concentration and chop odour and flavour in lambs grazing a cocksfoot pasture. *Meat Science*, 98 (4): 607-614. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.008

Devincenzi, T.; Prunier, A.; Meteau, K.; Prache, S., 2019. How does barley supplementation in lambs grazing alfalfa affect meat sensory quality and authentication? *Animal*, 13 (2): 427-434. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118001477

Dezetter, C.; Boichard, D.; Bareille, N.; Grimard, B.; Le Mezec, P.; Ducrocq, V., 2019. Le croisement entre races bovines laitières : intérêts et limites pour des ateliers en race pure Prim'Holstein ? *INRAE Productions Animales*, 32 (3): 359-378. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.3.2575

Di Marco, P.; Petochi, T.; Marino, G.; Priori, A.; Finoia, M.G.; Tomassetti, P.; Porrello, S.; Giorgi, G.; Lupi, P.; Bonelli, A.; Parisi, G.; Poli, B.M., 2017. Insights into organic farming of European sea bass Dicentrarchus labrax and gilthead sea bream Sparus aurata through the assessment of environmental impact, growth performance, fish welfare and product quality. *Aquaculture*, 471: 92-105. http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.012

Dourmad, J.Y.; Ryschawy, J.; Trousson, T.; Bonneau, M.; Gonzalez, J.; Houwers, H.W.J.; Hviid, M.; Zimmer, C.; Nguyen, T.L.T.; Morgensen, L., 2014. Evaluating environmental impacts of contrasting pig farming systems with life cycle assessment. *Animal*, 8 (12): 2027-2037. http://dx.doi.org/10.1017/51751731114002134

Duru, M., 2017. Les omégas 3 et 6, un enjeu de santé publique : quels rôles de l'agriculture, de l'élevage et de l'agroalimentaire ? *Sésame*, n°1: 54-57.

Duru, M.; Bastien, D.; Froidmont, E.; Graulet, B.; Gruffat, D., 2017a. How products from grass-fed cattle contribute to nutritient intake and consumer health. *Fourrages*, 230: 131-140.

Duru, M.; Benoit, M.; Donnars, C.; Dumont, B.; Ryschawy, J., 2017b. Quelle place pour l'élevage, les prairies et les produits animaux dans les transitions agricoles et alimentaires ? *Fourrages*, n°232: 281-296.

Duru, M.; Magrini, M.B., 2017. Polyunsaturated fatty acids composition of our meals and use of agricultural raw products in France: a slow improvement, but not sufficient. *Ocl-Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, 24 (2): 10. http://dx.doi.org/10.1051/ocl/2017007

Efsa Panel Contaminants Food Chain, 2018. Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food. *Efsa Journal*, 16 (11). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5333

Erasmus, S.W.; Muller, M.; Hoffman, L.C., 2017. Authentic sheep meat in the European Union: Factors influencing and validating its unique meat quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97 (7): 1979-1996. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.8180

Esposito, M.; Cavallo, S.; Serpe, F.P.; D'Ambrosio, R.; Gallo, P.; Colarusso, G.; Pellicano, R.; Baldi, L.; Guarino, A.; Serpe, L., 2009. Levels and congener profiles of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls in cow's milk collected in Campania, Italy. *Chemosphere*, 77 (9): 1212-1216. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.09.011

European union, 2011. Commission Regulation (EU). No 1259/2011 of 2 December 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for dioxins, dioxin-like PCBs and non dioxin-like PCBs in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union 2011, L 320, 18-23*.

European union, 2012. Commission Regulation (EU). No 277/2012 of 28 March 2012 amending Annexes I and II to Directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council as regards maximum levels and action thresholds for dioxins and polychlorinated biphenyls. *Off. J. Eur. Union 2012, L 91, 1-7*.

European union, 2013. Commission Regulation (EU). No 1259/2011 of 2 December 2011 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for dioxins, dioxin-like PCBs and non dioxin-like PCBs in foodstuffs. *Off. J. Eur. Union 2013, L 323, 37-39.*

Falowo, A.B.; Fayemi, P.O.; Muchenje, V., 2014. Natural antioxidants against lipid-protein oxidative deterioration in meat and meat products: A review. *Food Research International*, 64: 171-181. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.022

Farruggia, A.; Martin, B.; Baumont, R.; Prache, S.; Doreau, M.; Hoste, H.; Durand, D., 2008. Is floristic diversity of permanent pastures important for ruminants and animal products? *Productions Animales*, 21 (2): 181-199.

FranceAgriMer, 2017. *Consommation des produits de la pêche et de l'aquaculture 2016*, 125 p.

Fromm, S.; Beisswanger, E.; Kasbohrer, A.; Tenhagen, B.A., 2014. Risk factors for MRSA in fattening pig herds - A meta-analysis using pooled data. *Preventive Veterinary Medicine*, 117 (1): 180-188. http://dx.doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.08.014

Gerzova, L.; Babak, V.; Sedlar, K.; Faldynova, M.; Videnska, P.; Cejkova, D.; Jensen, A.N.; Denis, M.; Kerouanton, A.; Ricci, A.; Cibin, V.; Osterberg, J.; Rychlik, I., 2015. Characterization of Antibiotic Resistance Gene Abundance and Microbiota Composition in Feces of Organic and Conventional Pigs from Four EU Countries. *Plos One*, 10 (7): 10. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0132892

Gruffat, D., 2018. Déterminants de la qualité nutritionnelle des lipides. In: Lavoisier, ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris 7, 241-252.

Guillemin, N.; Cassar-Malek, I.; Hocquette, J.F.; Jurie, C.; Micol, D.; Listrat, A.; Leveziel, H.; Renand, G.; Picard, B., 2009. Control of beef tenderness: identification of biological markers. *Productions Animales*, 22 (4): 331-344.

Hoogenboom, L.A.P.; Kan, C.A.; Zeilmaker, M.J.; Van Eijkeren, J.; Traag, W.A., 2006. Carry-over of dioxins and PCBs from feed and soil to eggs at low contamination levels - influence of mycotoxin binders on the carry-over from feed to eggs. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 23 (5): 518-527. http://dx.doi.org/10.1080/02652030500512037

Hoogenboom, R.; Klop, A.; Herbes, R.; van Eijkeren, J.C.H.; Zeilmaker, M.J.; van Vuuren, A.M.; Traag, W.A., 2015a. Carry-over of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in dairy cows fed smoke contaminated maize silage or sugar beet pulp. *Chemosphere*, 137: 214-220. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.040

Hoogenboom, R.; Traag, W.; Fernandes, A.; Rose, M., 2015b. European developments following incidents with dioxins and PCBs in the food and feed chain. *Food Control*, 50: 670-683. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.10.010

IFIP, 2019. *Porc par les chiffres, édition 2019-2020. La filière porcine en France, dans l'UE et le monde*. Paris: Editions IFIP-Institut du Porc, 36 p.

INAPORC, 2018. *Plan de la filière porcine française*: INAPORC, 40 p.

Janssen, M.; Rodiger, M.; Hamm, U., 2016. Labels for Animal Husbandry Systems Meet Consumer Preferences: Results from a Meta-analysis of Consumer Studies. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 29 (6): 1071-1100. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-016-9647-2

Jiang, J.; Xiong, Y.L.L., 2016. Natural antioxidants as food and feed additives to promote health benefits and quality of meat products: A review. *Meat Science*, 120: 107-117. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.005

Karwowska, M.; Dolatowski, Z.J., 2013. Comparison of lipid and protein oxidation, total iron content and fatty acid profile of conventional and organic pork. *International Journal of Food Science and Technology*, 48 (10): 2200-2206. http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.12205

Kempf, I.; Kerouanton, A.; Bougeard, S.; Nagard, B.; Rose, V.; Mourand, G.; Osterberg, J.; Denis, M.; Bengtsson, B.O., 2017. Campylobacter coli in Organic and Conventional Pig Production in France and Sweden: Prevalence and Antimicrobial Resistance. *Frontiers in Microbiology*, 8. http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2017.00955

Kondjoyan, A.; Picard, B., 2019. *La viande : de l'élevage à l'assiette*. Clermont-Ferrand: Presses universitaires Blaise Pascal (PUBP), 64 p.

Kummeling, I.; Thijs, C.; Huber, M.; van de Vijver, L.P.L.; Snijders, B.E.P.; Penders, J.; Stelma, F.; van Ree, R.; van den Brandt, P.A.; Dagnelie, P.C., 2008. Consumption of organic foods and risk of atopic disease during the first 2 years of life in the Netherlands. *British Journal of Nutrition*, 99 (3): 598-605. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114507815844

Lebret, B., 2004. Rationalization of pig production: consequences on meat quality. *Inra Productions Animales*, 17 (2): 79-91.

Lebret, B.; Faure, J., 2015. Pork and pork products: how to fulfill a variety of quality demands? *Inra Productions Animales*, 28 (2): 111-114.

Lebret, B.; Picard, B., 2015. The main components of carcasses and meat quality in various animal species. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 93-98.

Lebret, B.; Prache, S.; Berri, C.; Lefevre, F.; Bauchart, D.; Picard, B.; Corraze, G.; Medale, F.; Faure, J.; Alami-Durante, H., 2015. Meat quality: influence of animals' characteristics and rearing conditions. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 151-168.

Legrand, I.; Hocquette, J.F.; Polkinghorne, R.J.; Pethick, D.W., 2013. Prediction of beef eating quality in France using the Meat Standards Australia system. *Animal*, 7 (3): 524-529. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731112001553

Legrand, I.; Hocquette, J.F.; Polkinghorne, R.J.; Wierzbicki, J., 2017. Comment prédire la qualité de la viande bovine en Europe en s'inspirant du système australien MSA ? *Innovations Agronomiques*, 55: 171-182.

Lorenzi, V.; Angelone, B.; Ferretti, E.; Galli, A.; Tonoli, M.; Donati, M.; Fusi, F.; Zanardi, G.; Ghidini, S.; Bertocchi, L., 2020. PCDD/Fs, DL-PCBs, and NDL-PCBs in Dairy Cows: Carryover in Milk from a Controlled Feeding Study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (7): 2201-2213. http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08180

Lourenco, M.; Van Ranst, G.; De Smet, S.; Raes, K.; Fievez, V., 2007. Effect of grazing pastures with different botanical composition by lambs on rumen fatty acid metabolism and fatty acid pattern of longissimus muscle and subcultaneous fat. *Animal*, 1 (4): 537-545. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731107703531

Martin, B.; Graulet, B.; Uijttewaal, A.; Ferlay, A.; Coppa, M.; Rémond, D., 2019. Contribution of dairy products to dietary intakes and the influence of dairy cow forage. *Fourrages*, (239): 193-202.

Maupertuis, F.; Quiniou, N.; Royer, E.; Guibert, J.; Quinsac, A.; Peyronnet, C.J.d.l.r.P., 43, 67-72., 2001. Effets d'une utilisation continue et du mode de distribution du tourteau de colza sur les performances des porcs charcutiers. *Journées Recherche Porcine en France*, 67-72.

McAuliffe, G.A.; Takahashi, T.; Lee, M.R.F., 2018. Framework for life cycle assessment of livestock production systems to account for the nutritional quality of final products. *Food and Energy Security*, 7 (3). http://dx.doi.org/10.1002/fes3.143

Mie, A.; Andersen, H.R.; Gunnarsson, S.; Kahl, J.; Kesse-Guyot, E.; Rembialkowska, E.; Quaglio, G.; Grandjean, P., 2017. Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review. *Environmental Health*, 16 (1): article number 111. http://dx.doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4

Morel, K.; Farrie, J.P.; Renon, J.; Manneville, V.; Agabriel, J.; Devun, J., 2016. Environmental impacts of cow-calf beef systems with contrasted grassland management and animal production strategies in the Massif Central, France. *Agricultural Systems*, 144: 133-143. http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.006

Mourot, J., 2015. Evolution in the quality of animal products over the past fifty years. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 50 (6): 6S30-6S35. http://dx.doi.org/10.1016/S0007-9960(15)30015-8

Mourot, J.; Lebret, B., 2009. Effects of pig diet on the quality of pork and pork products. *Productions Animales*, 22 (1): 33-39.

Mugnai, C.; Sossidou, E.N.; Dal Bosco, A.; Ruggeri, S.; Mattioli, S.; Castellini, C., 2014. The effects of husbandry system on the grass intake and egg nutritive characteristics of laying hens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94 (3): 459-467. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6269

Nilzen, V.; Babol, J.; Dutta, P.C.; Lundeheim, N.; Enfalt, A.C.; Lundstrom, K., 2001. Free range rearing of pigs with access to pasture grazing - effect on fatty acid composition and lipid oxidation products. *Meat Science*, 58 (3): 267-275. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(00)00164-9

Nizzetto, L.; Macleod, M.; Borga, K.; Cabrerizo, A.; Dachs, J.; Di Guardo, A.; Ghirardello, D.; Hansen, K.M.; Jarvis, A.; Lindroth, A.; Ludwig, B.; Monteith, D.; Perlinger, J.A.; Scheringer, M.; Schwendenmann, L.; Semple, K.T.; Wick, L.Y.; Zhang, G.; Jones, K.C., 2010. Past, Present, and Future Controls on Levels of Persistent Organic Pollutants in the Global Environment. *Environmental Science & Technology*, 44 (17): 6526-6531. http://dx.doi.org/10.1021/es100178f

Osterberg, J.; Wingstrand, A.; Jensen, A.N.; Kerouanton, A.; Cibin, V.; Barco, L.; Denis, M.; Aabo, S.; Bengtsson, B., 2016. Antibiotic Resistance in Escherichia coli from Pigs in Organic and Conventional Farming in Four European Countries. *Plos One*, 11 (6): 12. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0157049

Palupi, E.; Jayanegara, A.; Ploeger, A.; Kahl, J., 2012. Comparison of nutritional quality between conventional and organic dairy products: a meta-analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92 (14): 2774-2781. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5639

Parois, S.; Bonneau, M.; Chevillon, P.; Larzul, C.; Quiniou, N.; Robic, A.; Prunier, A., 2018. Boar taint in the meat of entire male pigs: the problems and the potential solutions. *Inra Productions Animales*, 31 (1): 23-35.

Pen, B.; Oyabu, T.; Hidaka, S.; Hidari, H., 2005. Effect of potato by-products based silage on growth performance, carcass characteristics and fatty acid composition of carcass fats in Holstein steers. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 18 (4): 490-496. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.2005.490

Peyraud, J.L.; Aubin, J.; Barbier, M.; Baumont, R.; Berri, C.; Bidanel, J.P.; Citti, C.; Cotinot, C.; Ducrot, C.; Dupraz, P.; Faverdin, P.; Friggens, N.; Houot, S.; Nozieres-Petit, M.O.; Rogel-Gaillard, C.; Sante-Lhoutellier, V., 2019. Science for tomorrow's livestock farming: A forward thinking conducted at INRA. *Inra Productions Animales*, 32 (2): 323-338. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2591

Pogorzelski, G.; Wozniak, K.; Polkinghorne, R.; Poltorak, A.; Wierzbicka, A., 2020. Polish consumer categorisation of grilled beef at 6 mm and 25 mm thickness into quality grades, based on Meat Standards Australia methodology. *Meat Science*, 161: 7. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107953

Pointereau, P., 2019. *Le revers de notre assiette : Changer d'alimentation pour préserver notre santé et notre environnement* Paris: Solagro, 63 p. https://inra-dam-front-resources-cdn.wedia-group.com/ressources/afile/488399-52932-resource-le-revers-de-notre-assiette.pdf

Ponnampalam, E.N.; Mann, N.J.; Sinclair, A.J., 2006. Effect of feeding systems on omega-3 fatty acids, conjugated linoleic acid and trans fatty acids in Australian beef cuts: potential impact on human health. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 15 (1): 21-29.

Prache, S.; Caillat, H.; Lagriffoul, G., 2018. Diversité dans la filière petits ruminants : une source de résilience? *Innovations Agronomiques*, 68: 171-191.

Provenza, F.D.; Kronberg, S.L.; Gregorini, P., 2019. Is Grassfed Meat and Dairy Better for Human and Environmental Health? *Frontiers in Nutrition*, 6. http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2019.00026

Prunier, A.; Bonneau, M., 2019. Les alternatives à la castration chirurgicale chez le porcelet. *Le nouveau praticien vétérinaire élevages et santé*, 11: 45-51.

Prunier, A.; Lebret, B., 2009. Organic pig production in France: characteristics of farms, impacts on health and welfare of animals and on product quality. *Inra Productions Animales*, 22 (3): 179-188.

Pussemier, L.; Larondelle, Y.; Carlos, V.P.C.; Huyghebaert, A., 2006. Chemical safety of conventionally and organically produced foodstuffs: a tentative comparison under Belgian conditions. *Food Control*, 17 (1): 14-21. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.08.003

Pussemier, L.; Mohimont, L.; Huyghebaert, A.; Goeyens, L., 2004. Enhanced levels of dioxins in eggs from free range hens; a fast evaluation approach. *Talanta*, 63 (5): 1273-1276. http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2004.05.031

Reganold, J.P.; Wachter, J.M., 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2 (2). http://dx.doi.org/10.1038/nplants.2015.221

Rivaroli, D.; Prunier, A.; Meteau, K.; do Prado, I.N.; Prache, S., 2019. Tannin-rich sainfoin pellet supplementation reduces fat volatile indoles content and delays digestive parasitism in lambs grazing alfalfa. *Animal*, 13 (9): 1883-1890. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731118003543

Salami, S.A.; Guinguina, A.; Agboola, J.O.; Omede, A.A.; Agbonlahor, E.M.; Tayyab, U., 2016. Review: In vivo and postmortem effects of feed antioxidants in livestock: a review of the implications on authorization of antioxidant feed additives. *Animal*, 10 (8): 1375-1390. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115002967

Salami, S.A.; Luciano, G.; O'Grady, M.N.; Biondi, L.; Newbold, C.J.; Kerry, J.P.; Priolo, A., 2019. Sustainability of feeding plant by-products: A review of the implications for ruminant meat production. *Animal Feed Science and Technology*, 251: 37-55. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.02.006

Salifou, C.F.A.; Youssao, A.K.I.; Ahounou, G.S.; Tougan, P.U.; Farougou, S.; Mensah, G.A.; Clinquart, A., 2013. Critères d'appréciation et facteurs de variation des caractéristiques de la carcasse et de qualité de la viande bovine. *Les Annales de Médecine Vétérinaire*, 157: 27-42.

Scerra, M.; Luciano, G.; Caparra, P.; Foti, F.; Cilione, C.; Giorgi, A.; Scerra, V., 2011. Influence of stall finishing duration of Italian Merino lambs raised on pasture on intramuscular fatty acid composition. *Meat Science*, 89 (2): 238-242. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.012

Schreurs, N.M.; Lane, G.A.; Tavendale, M.H.; Barry, T.N.; McNabb, W.C., 2008. Pastoral flavour in meat products from ruminants fed fresh forages and its amelioration by forage condensed tannins. *Animal Feed Science and Technology*, 146 (3-4): 193-221. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.03.002

Schwob, S.; Lebret, B.; Louveau, I., 2020. Adiposité et génétique chez le porc : état des lieux et nouveaux enjeux pour la qualité des produits. *INRAE Productions Animales*, 33 (1): 17-30. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2020.33.1.3112

Smith-Spangler, C.; Brandeau, M.L.; Hunter, G.E.; Bavinger, C.; Pearson, M.; Eschbach, P.J.; Sundaram, V.; Liu, H.; Schirmer, P.; Stave, C.; Olkin, I.; Bravata, D.M., 2012. Are Organic Foods Safer or Healthier Than Conventional Alternatives? *Annals of Internal Medicine*, 157 (5): 348-366. http://dx.doi.org/10.7326/0003-4819-157-5-201209040-00007

Sonntag, W.I.; Spiller, A.; von Meyer-Höfer, M., 2019. Discussing modern poultry farming systems–insights into citizen's lay theories. *Poultry Science*, 98 (1): 209-216. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pey292

Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Seal, C.; Sanderson, R.; Benbrook, C.; Steinshamn, H.; Gromadzka-Ostrowska, J.; Rembialkowska, E.; Skwarlo-Sonta, K.; Eyre, M.; Cozzi, G.; Larsen, M.K.; Jordon, T.; Niggli, U.; Sakowski, T.; Calder, P.C.; Burdge, G.C.; Sotiraki, S.; Stefanakis, A.; Yolcu, H.; Stergiadis, S.; Chatzidimitriou, E.; Butler, G.; Stewart, G.; Leifert, C., 2016a. Composition differences between organic and conventional meat: a systematic literature review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition*, 115 (6): 994-1011. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114515005073

Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Seal, C.J.; Sanderson, R.; Benbrook, C.; Steinshamn, H.; Gromadzka-Ostrowska, J.; Rembialkowska, E.; Skwarlo-Sonta, K.; Eyre, M.; Cozzi, G.; Larsen, M.K.; Jordon, T.; Niggli, U.; Sakowski, T.; Calder, P.C.; Burdge, G.C.; Sotiraki, S.; Stefanakis, A.; Stergiadis, S.; Yolcu, H.; Chatzidimitriou, E.; Butler, G.; Stewart, G.; Leifert, C., 2016b. Higher PUFA and n-3 PUFA, conjugated linoleic acid, alpha-tocopherol and iron, but lower iodine and selenium concentrations in organic milk: a systematic literature review and meta- and redundancy analyses. *British Journal of Nutrition*, 115 (6): 1043-1060. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114516000349

Stein, H.H.; Shurson, G.C., 2009. Board-Invited review: The use and application of distillers dried grains with solubles in swine diets. *Journal of Animal Science*, 87 (4): 1292-1303. http://dx.doi.org/10.2527/jas.2008-1290

Tavendale, M.H.; Lane, G.A.; Schreurs, N.M.; Fraser, K.; Meagher, L.P., 2005. The effects of condensed tannins from Dorycnium rectum on skatole and indole ruminal biogenesis for grazing sheep. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56 (12): 1331-1337. http://dx.doi.org/10.1071/ar04232

Theron, L.; Sayd, T.; Chambon, C.; Venien, A.; Viala, D.; Astruc, T.; Vautier, A.; Sante-Lhoutellier, V., 2019. Deciphering PSE-like muscle defect in cooked hams: A signature from the tissue to the molecular scale. *Food Chemistry*, 270: 359-366. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.081

Thornton, K.J.; Richard, R.P.; Colle, M.J.; Doumit, M.E.; de Veth, M.J.; Hunt, C.W.; Murdoch, G.K., 2015. Effects of dietary potato by-product and rumen-protected histidine on growth, carcass characteristics and quality attributes of beef. *Meat Science*, 107: 64-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.009

Tomovic, V.; Jokanovic, M.; Sojic, B.; Skaljac, S.; Ivic, M.; Iop, 2017. Plants as natural antioxidants for meat products. *59. International Meat Industry Conference Meatcon2017*. Bristol: Iop Publishing Ltd (IOP Conference Series-Earth and Environmental Science), Unsp 012030. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012030

Tressou, J.; Ben Abdallah, N.; Planche, C.; Dervilly-Pinel, G.; Sans, P.; Engel, E.; Albert, I., 2017. Exposure assessment for dioxin-like PCBs intake from organic and conventional meat integrating cooking and digestion effects. *Food and Chemical Toxicology*, 110: 251-261. http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2017.10.032

Trocino, A.; Xiccato, G.; Majolini, D.; Tazzoli, M.; Bertotto, D.; Pascoli, F.; Palazzi, R., 2012. Assessing the quality of organic and conventionally-farmed European sea bass (Dicentrarchus labrax). *Food Chemistry*, 131 (2): 427-433. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.08.082

van den Elsen, L.W.J.; van Esch, B.C.A.M.; Hofman, G.A.; Kant, J.; van de Heijning, B.J.M.; Garssen, J.; Willemsen, L.E.M., 2013. Dietary long chain n-3 polyunsaturated fatty acids prevent allergic sensitization to cow's milk protein in mice. *Clinical and Experimental Allergy*, 43 (7): 798-810. http://dx.doi.org/10.1111/cea.12111

Vasta, V.; Luciano, G., 2011. The effects of dietary consumption of plants secondary compounds on small ruminants' products quality. *Small Ruminant Research*, 101 (1-3): 150-159. http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.09.035

Vasta, V.; Nudda, A.; Cannas, A.; Lanza, M.; Priolo, A., 2008. Alternative feed resources and their effects on the quality of meat and milk from small ruminant. *Animal Feed Science and Technology*, 147 (1-3): 223-246. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.020

Veysset, P.; Benoit, M.; Laignel, G.; Bébin, D.; Roulenc, M.; Lherm, M., 2014. Analysis and determinants of the performances evolution of sheep for meat and suckler cattle farms in less favored areas from 1990 to 2012. *Inra Productions Animales*, 27 (1): 49-64. https://www6.inra.fr/productions-animales/layout/set/print/content/download/6711/91405/version/2/file/Prod_Anim_2014_27_1_05.pdf

Watson, R.; Gee, A.; Polkinghorne, R.; Porter, M., 2008a. Consumer assessment of eating quality - development of protocols for Meat Standards Australia (MSA) testing. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48 (11): 1360-1367. http://dx.doi.org/10.1071/ea07176

Watson, R.; Polkinghorne, R.; Thompson, J.M., 2008b. Development of the Meat Standards Australia (MSA) prediction model for beef palatability. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48 (11): 1368-1379. http://dx.doi.org/10.1071/ea07184

Weber, R., 2017. Learning from Dioxin & PCBs in meat - problems ahead? *59th International Meat Industry Conference Meatcon2017*. Bristol. Iop Publishing Ltd. http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012002

Weber, R.; Herold, C.; Hollert, H.; Kamphues, J.; Blepp, M.; Ballschmiter, K., 2018a. Reviewing the relevance of dioxin and PCB sources for food from animal origin and the need for their inventory, control and management. *Environmental Sciences Europe*, 30: 42. http://dx.doi.org/10.1186/s12302-018-0166-9

Weber, R.; Herold, C.; Hollert, H.; Kamphues, J.; Ungemach, L.; Blepp, M.; Ballschmiter, K., 2018b. Life cycle of PCBs and contamination of the environment and of food products from animal origin. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (17): 16325-16343. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-1811-y

Wilkinson, J.M.; Allen, J., 2015. Trends in efficiency of compound feed use by dairy cows in Great Britain. *Advances in Animal Biosciences*, 6: 106.

Wilkinson, J.M.; Lee, M.R.F., 2018. Review: Use of human-edible animal feeds by ruminant livestock. *Animal*, 12 (8): 1735-1743. http://dx.doi.org/10.1017/s175173111700218x

Chapitre 3 : Consommation de produits animaux et santé

Auteurs : Emmanuelle Kesse-Guyot, Fabrice Pierre et Didier Rémond (coordination du chapitre), Laurent Guillier.
Experte ponctuelle : Mathilde Touvier (section 3.3.1).

Sommaire

Chapitre 3 : consommation de produits animaux et santé 741
3.1. Périmètre du chapitre 742
3.2. La couverture des besoins nutritionnels 743
3.2.1 Les spécificités des produits animaux 743
3.2.2 La couverture des besoins nutritionnels dans des régimes plus ou moins riches en produits animaux 745
3.2.3 Effet des modes d'élevage et des procédés de transformation 748
3.3. Additifs et résidus 750
3.3.1 Utilisation d'additifs dans la formulation de produits alimentaires d'origine animale 750
3.3.2 Résidus de médicaments vétérinaires 754
3.4. Part des produits animaux dans le fardeau des maladies associées à des dangers biologiques 754
3.4.1 Utilisation des données nationales de déclaration des toxi-infections alimentaire collectives (TIAC) 755
3.4.2 Approche descendante basée sur des estimations de l'incidence des maladies 756
3.4.3 Conclusion de la partie sanitaire pour les dangers biologiques 760
3.5. L'Epidémiologie nutritionnelle pour étudier la relation entre consommation et santé 760
3.5.1 Niveau de preuve et indicateurs 760
3.5.2 Méthodes en épidémiologie nutritionnelle 763
3.5.3 Mortalité 764
3.5.4 Cancer 768
3.5.6 Maladies cardiovasculaires 773
3.5.7 Diabète de type 2 779
3.5.8 Obésité 781
3.5.9 Sarcopénie 785
3.5.10 Ostéoporose 787
3.5.11 Déficience en fer et anémie 788
3.5.12 MAMA 791
Conclusions 793
Périmètre, lacunes, perspectives 797
Références bibliographiques 800

3.1. Périmètre du chapitre

L'objectif de ce chapitre est de présenter un état des lieux des connaissances relatives aux associations entre la consommation d'aliments d'origine animale (viande et charcuterie, lait et produits laitiers, poissons, et œufs) et la santé.

Les spécificités nutritionnelles et sanitaires des produits alimentaires d'origine animale seront présentées.

Le champ de la santé est très vaste puisque l'OMS la définit ainsi : « *La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* ».

Aussi ne seront traitées dans ce chapitre que les maladies chroniques majeures en termes d'implication de santé publique. Les pathologies retenues sont les suivantes :

diabète, 2) cancer, 3) maladies cardiovasculaires (MCV), 3) troubles de la cognition, maladie d'Alzheimer et maladies apparentées, 4) sarcopénie, 5) ostéoporose, 6) anémie, 7) obésité et 8) la mortalité.

Ainsi d'autres critères de santé tels que les allergies, la dépression ou les troubles de la reproduction ne seront pas traités dans ce chapitre. L'analyse bibliographique ayant principalement porté sur les maladies chroniques liées à l'âge, les articles concernant les populations d'enfants ne sont pas considérés.

Il est noté que les modes de préparation (poisson vapeur ou frit, viande grillée ou rôtie, etc.) devraient idéalement être pris en compte dans les analyses. Toutefois, c'est rarement le cas dans les études publiées.

Des travaux de compilation des données disponible relatives à ces relations ont été publiés récemment et seront privilégiés dans ce chapitre :

- World Cancer Research Fund International (WCRF) (WCRF *et al.*, 2018a; b) ;
- Rapport d'expertise collective de l'Anses « Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles » (Anses, 2011) ;
- Rapport MAMA du Haut Conseil de la Santé Publique (Haut conseil de la santé publique, 2017)

Regard sur la bibliographie : Chapitre 3
318 références sont citées dans ce chapitre, ce sont très majoritairement sont des articles publiés dans des journaux scientifiques (89% des références). Le chapitre s'appuie également sur des rapports d'expertise collectives nationales ou internationales (17 références) et des réglementations (6 références). 88% des références citées ont été publiées entre 2009 et 2019. Les références antérieures sont généralement des articles 'princeps' ou des articles dans des domaines qui ne sont plus des fronts de science. Parmi les 34 auteurs cités plus de 5 fois seulement 6 sont français, les autres auteurs représentent bien l'ouverture internationale de la thématique. Les références citées proviennent des meilleurs journaux de nutrition (Am J Clin Nutr, Crit Rev in Food Sci Nutr, J Nutr, Nutrients, …) et de journaux a fort impact dans le domaine du cancer ou des pathologies chroniques.
La section sur la couverture des besoins regroupe 66 références, et la section TIAC, résidus et additifs en compte 83. La section sur les relations entre la consommation de produits animaux et les maladies non-transmissibles totalise 184 références. Le choix pour cette section a été de privilégier les méta-analyses qui permettent d'intégrer un grand nombre d'études épidémiologiques.

3.2. La couverture des besoins nutritionnels

3.2.1 Les spécificités des produits animaux

3.2.1.1 La fraction protéique

Bien que les produits animaux regroupent un nombre très important d'aliments, une des caractéristiques majeures de ces produits (au moins en ce qui concerne les matières premières : viande, lait, œuf), est leur teneur élevée en protéines de bonne qualité nutritionnelle.

Les protéines animales bénéficient en effet d'un bon équilibre en acides aminés, ce qui n'est pas toujours le cas des protéines végétales (céréales pauvres en lysine, graines de légumineuses pauvres en méthionine). De plus, la biodisponibilité des acides aminés des protéines animales est généralement supérieure à celle des protéines végétales (en raison d'une digestibilité plus élevée). La présence de produits animaux dans l'alimentation permet ainsi de faciliter la couverture des besoins pour les différents acides aminés, et limiter les risques de carence. Cet atout nutritionnel doit cependant objectivement être modulé. D'une part, il existe des produits végétaux, tels que le soja ou le quinoa, qui présentent un bon équilibre en acides aminés, et d'autre part la combinaison de différentes sources de protéines végétales peut permettre d'atteindre un équilibre satisfaisant en acides aminés (*cf.* paragraphe 1.2). De plus, la digestibilité des produits végétaux peut être notablement améliorée par leur mode de préparation avant consommation. En effet, la plus faible digestibilité des protéines végétales s'explique en grande partie par la structure des végétaux qui protège les protéines de l'attaque des enzymes digestives, et par la présence de composés qui bloquent l'activité protéolytique de ces enzymes (facteurs antitrypsiques, tannins, …). La cuisson entraîne une fragilisation de la structure de la graine, et une inactivation des inhibiteurs de protéase, améliorant ainsi la digestibilité des protéines. La fermentation des graines avant cuisson permet également de réduire sensiblement l'activité de ces enzymes.

Outre la composition en acides aminés et leur biodisponibilité, d'autres paramètres apparaissent aujourd'hui pour caractériser la valeur nutritionnelle des protéines. Il s'agit notamment de leur vitesse de digestion et de leur potentialité à libérer des peptides (enchaînement de quelques acides aminés) présentant des activités biologiques intéressantes pour la santé humaine (peptides bioactifs).

Il a été clairement montré que la cinétique de digestion des protéines alimentaires conditionne l'efficacité de leur assimilation ; la cinétique optimale n'étant pas nécessairement la même pour tous les sujets. Par exemple, pour les personnes âgées, il semble préférable d'ingérer des protéines rapidement digérées ou de concentrer l'apport journalier de protéines alimentaires sur un seul repas, de façon à accentuer l'augmentation de l'aminoacidémie postprandiale et relancer la synthèse protéique musculaire. À partir de ces observations, des stratégies nutritionnelles sont aujourd'hui développées pour lutter contre la fonte musculaire liée à l'âge (sarcopénie) (Dardevet *et al.*, 2012). Les viandes et poissons sont dans ce cadre des aliments très intéressants, d'une part en raison de leur forte teneur en protéines très digestibles qui permet de concentrer l'apport protéique sur un repas, et d'autre part en raison de leur vitesse de digestion élevée (Remond *et al.*, 2007).

De plus en plus de résultats démontrent les effets physiologiques de certains peptides présents dans l'aliment, ou produits par la digestion des protéines alimentaires, sur l'activité du tractus digestif ou d'autres fonctions physiologiques (activité antihypertensive, opioïde, immunomodulatrice, anxiolytique). Parmi les peptides présents dans les aliments certains sont préformés et abondants dans le substrat alimentaire originel ; ce sont, par exemple, pour les viandes et poissons, les dipeptides de l'histidine (carnosine, ansérine) ou le glutathion. D'autres sont présents à l'intérieur des protéines et peuvent être libérés lors des procédés de transformation des aliments ou lors de la digestion intestinale. La biodisponibilité de ces peptides fait toujours débat. Dans le cas des dipeptides de l'histidine, elle est mesurable et plutôt élevée (environ ¼ de l'apport par la viande (Bauchart *et al.*, 2007) ce qui peut présenter un intérêt non négligeable pour la santé du consommateur en raison de leurs nombreuses activités biologiques : pouvoir tampon, activité antioxydante, réduction des aldéhydes formés à partir des acides gras insaturés lors d'un stress oxydant, protection contre la glycation et la réticulation des protéines. Ces dernières propriétés sont particulièrement intéressantes pour la prévention des complications secondaires liées au diabète, et la protection contre les désordres neurodégénératifs tels que la maladie d'Alzheimer.

En ce qui concerne les peptides libérés lors de la digestion (Remond *et al.*, 2016), de nombreuses études ont été réalisées sur des peptides possédant des propriétés anti-hypertensives basées sur l'inhibition de l'enzyme de conversion de l'angiotensine (ACE). Cette activité semble pouvoir se manifester dans des conditions normales d'alimentation, des études menées chez l'homme ayant montré une baisse significative de la pression artérielle par rapport à un groupe témoin, suite à l'ingestion répétée de lait fermenté qui contenait des peptides antihypertenseurs (Seppo *et al.*, 2003). D'autre part, une substitution partielle des glucides alimentaires par de la viande rouge permettait également d'abaisser la pression sanguine chez des personnes hypertensives (Hodgson *et al.*, 2006).

Bien que le domaine des peptides bioactifs ait été exploré plus récemment dans le cas des produits végétaux, il semble que les protéines végétales puissent également être des sources intéressantes de peptides bioactifs (Pihlanto *et al.*, 2017). Il est donc difficile de conclure à un intérêt supérieur des produits animaux dans ce domaine.

3.2.1.2 La fraction lipidique

Cette fraction est très variable en quantité et qualité dans les différents produits d'origine animale. Les teneurs en lipides des viandes et des poissons sont globalement peu importantes 1-10% pour les poissons, 4-15% pour les viandes. Selon la viande et le morceau considéré, les lipides sont constitués de 30 à 51% d'acides gras saturés, 38 à 51% d'acides gras monoinsaturés et 6 à 30% d'acides gras polyinsaturés. La viande de volaille possède la teneur la plus basse en acides gras saturés et se situe dans les valeurs supérieures pour les acides gras polyinsaturés. La spécificité de la chair de poisson comparée à celle des viandes réside dans sa richesse en acides gras polyinsaturés (AGPI, 70% des lipides totaux), avec une proportion élevée d'AGPI n-3. La chair de poisson constitue également une très bonne source d'AGPI à longue chaîne tel que l'acide docosahexaénoïque (DHA) ou l'acide eicosapentaénoique (EPA), intéressants pour la prévention des maladies cardiovasculaires. Elle combine ainsi l'avantage d'un apport protéique de qualité avec celui d'un apport de lipides de qualité, en apportant à la fois des acides aminés et des acides gras indispensables. Pour cette raison, il est généralement conseillé d'en manger deux fois par semaine (en favorisant les poissons gras, plus riches en EPA, DHA). Les limites à la consommation de c*et* aliment « vertueux » résident essentiellement dans sa disponibilité, mais aussi dans le risque de sa contamination par des polluants de l'environnement (dioxine, PCB, methyl-mercure…). On peut aussi trouver du DHA dans les œufs, le lait ou le fromage si les animaux ont été nourris avec des produits riches en DHA. Le DHA (de même que l'acide EPA) peut être synthétisé par le foie à partir de l'acide alphalinolénique végétal, contenu par exemple dans les huiles de noix, lin, colza, germe de blé et soja. Cette conversion est cependant très limitée, surtout chez l'Homme.

3.2.1.3 La fraction non énergétique

Synthétisée uniquement par les microorganismes, la vitamine B12 est spécifique des produits animaux. C'est le seul élément qui rend indispensable la consommation de produits animaux si on ne veut pas avoir recours à des supplémentations.

Les produits laitiers constituent une source importante de calcium (de 115 g/100 ml de lait, à 1 000 mg/100 g de fromages à pâte pressée cuite) avec une biodisponibilité élevée (30-40%). On trouve également des quantités importantes de calcium (80-200 mg/100 g) dans certains végétaux tels que le chou, le brocoli, les épinards et les haricots secs. Cependant en dehors des brassicacés (chou, brocoli) la biodisponibilité du calcium est généralement bien plus faible, notamment en raison de la présence d'acide oxalique qui insolubilise le calcium, comme dans les épinards. A titre de comparaison un apport de 100 mg de calcium absorbable peut être assuré par 30 g de fromage (type emmental), 500 g de chou ou 2 kg d'épinard. L'éviction complète des produits laitiers du régime alimentaire augmente ainsi largement le risque de déficit, voire de carences en calcium.

Les viandes et abats constituent d'excellentes sources en minéraux tels que le fer, le zinc et le sélénium. Le fer héminique présent dans les viandes (40-70% du fer total selon l'espèce animal) bénéficie d'une meilleure biodisponibilité que celui des végétaux ou des produits laitiers (fer non héminique). De plus la présence de viande dans les repas permet d'augmenter la biodisponibilité du fer non héminique des végétaux. Dans le cadre d'une alimentation équilibrée, riche en produits végétaux non purifiés, l'apport de viande n'est pas en soi indispensable pour disposer d'un bon statut en fer, un apport modéré de viande rouge permettra cependant de limiter le risque de carence.

La viande apporte également des quantités importantes de zinc (2,7 à 6,8 mg/100 g de viande de bœuf) et de sélénium (9,8 à 14,6 µg/100 g de viande de bœuf) (Bauchart *et al.*, 2008).

3.2.2 La couverture des besoins nutritionnels dans des régimes plus ou moins riches en produits animaux

Les apports nutritionnels conseillés (ANC), représentent la quantité moyenne d'énergie ou de nutriments dont la consommation est nécessaire pour satisfaire les besoins de la plus grande partie de la population (97,5%) et lui assurer un bon état de nutrition, en limitant les risques de carence, de déséquilibre et de surcharge pondérale.

3.2.2.1 Les protéines

Les protéines sont impliquées dans de nombreuses fonctions de notre organisme : la structure des tissus (ex : collagène), la contraction musculaire (ex : actine), le transport de molécules (ex : albumine), l'immunité (ex : immunoglobulines), les réactions biochimiques (ex : enzymes), la régulation du métabolisme (ex : hormones, récepteurs). Chaque protéine a une composition particulière en acides aminés, dictée par le code génétique. Le renouvellement permanent de toutes les protéines (à des taux variables) est ainsi à l'origine de besoins spécifiques pour l'organisme. Parmi les 20 acides aminés qui constituent les protéines, 9 d'entre eux, appelés acides aminés indispensables, ne sont pas synthétisés par l'organisme, et doivent donc obligatoirement être apportés dans l'alimentation. L'absence ou la quantité insuffisante d'un de ces acides aminés suffit à perturber la synthèse protéique. C'est donc l'équilibre entre les différents acides aminés indispensables (histidine, isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane, valine) qui va être le premier facteur de qualité des protéines alimentaires. L'ANC de 0,8 g de protéines/kg de poids corporel/j, pour des adultes en bonne santé, est ainsi établi pour des protéines dont la composition assure un apport suffisant en chacun des acides aminés indispensables, et qui présentent une forte digestibilité dans l'intestin (Afssa, 2007). C'est généralement le cas des protéines des produits animaux mais pas toujours celui des produits végétaux. La combinaison des sources végétales entre elles peut permettre d'améliorer le profil en acides aminés indispensables (par exemple en combinant céréales et légumineuses), mais la complémentarité n'étant pas parfaite et la digestibilité des protéines végétales étant généralement inférieure, la quantité de protéine végétale à consommer pour couvrir les besoins de l'ensemble des acides aminés indispensable est généralement supérieure à celle de protéines animales (Tableau 3-1).

Tableau 3-1. Teneur en acides aminés indispensables (AAI) digestibles (mg/g de protéines)

	Protéine de référence[a]	Lait[b]	Viande[c]	Blé[d]	Riz[b]	Pois[b]	Soja[b]	Blé/pois 50/50	Riz/pois 50/50	Riz/pois /soja 30/30/40	viande/lait/blé/pois 35/15/30/20
Thr	25	48	66	21	23	35	35	28	29	31	43
Val	40	67	45	30	40	38	44	34	39	41	43
Ile	30	58	44	25	35	40	44	32	38	40	40
Leu	61	117	80	48	65	69	74	58	67	70	75
His	16	32	32	17	22	20	24	19	21	22	26
Trp	7	16	24	8	16	12	14	10	14	14	16
Lys	48	101	88	20	34	57	56	38	45	50	63
AAS[e]	23	32	45	30	28	16	24	23	22	23	34
AAA[f]	41	124	72	50	93	67	86	58	80	82	76
AAI_{lim}[g]		AAS	Val	Lys	Lys	AAS	AAS	Lys	AAS	AAS	Val
Quantité de protéines nécessaire pour couvrir l'ensemble des besoins en AAI d'un adulte de 70 kg, en g											
	56	40	50	136	79	83	53	70	59	56	52

[a] protéine de référence pour un individu de plus de 3 ans ([a]FAO (2013) ; [b]Rutherfurd et al. (2015) ; [c] Données personnelles ; [d] Cervantes-Pahm et al. (2014) ; [e] Acides aminés soufrés : Cys + Met ; [f] Acides aminés aromatiques : Phe + Tyr ; [g] acide aminé indispensable en quantité la plus faible par rapport à la protéine de référence.

Même en incorporant du soja, la source végétale la plus proche de la protéine de référence, un régime ne comprenant pas de protéines animales, devrait à minima contenir 10% de plus de protéines qu'un régime omnivore comprenant 50% de protéines animales. Plus ce type de régime incorpore de céréales plus ce pourcentage augmente, en raison de leur très faible teneur en lysine. Ainsi au-delà de 50% de protéines végétales dans le régime, le risque d'inadéquation de l'apport protéique est en premier lieu lié à la quantité de protéines consommées, puis au-delà de 70% la nature des protéines consommées devient importante, et le pourcentage de légumineuse, noix et graines consommé doit augmenter pour prévenir notamment une déficience en lysine (de Gavelle *et al.*, 2017).

Ainsi, pour les pays occidentaux comme la France, dans lesquels la consommation journalière de protéines excède généralement les ANC, le risque d'inadéquation des apports en acides aminés indispensables demeure faible, même pour les populations consommant peu ou pas de protéines animales, à condition de combiner les sources de protéines végétales entre elles. Le problème se pose en revanche clairement pour les pays en voie de développement où les apports en énergie et protéines sont faibles (en dessous des recommandations) et où les ressources végétales disponibles sont peu variées et souvent peu digestibles. Le problème peut également se poser pour les personnes âgées, chez lesquelles les besoins en protéines ont tendance à augmenter alors que leurs apports spontanés diminuent, et pour lesquelles des besoins spécifiques en certains acides aminés apparaissent : leucine pour stimuler la synthèse protéique (Dardevet *et al.*, 2012), acides aminés soufrés pour détoxifier les médicaments tels que le paracétamol et lutter contre le stress oxydatif (Mast *et al.*, 2018). Pour cette population en augmentation (on estime qu'en 2050 une personne sur 5 au niveau mondial, et une personne sur 3 au niveau français, aura plus de 60 ans), la présence de produits animaux dans l'alimentation est une garantie pour la couverture des besoins protéiques. Ainsi, une corrélation a été mise en évidence entre le pourcentage de protéines animales dans le régime alimentaire et la préservation de la masse musculaire chez les sujets âgés (Aubertin-Leheudre et Adlercreutz, 2009 ; Landi *et al.*, 2017).

3.2.2.2 Les lipides

En ce qui concerne les lipides, le principal intérêt des produits animaux est celui des acides gras polyinsaturés à longue chaine apportés par les produits de la mer (notamment le DHA considéré comme un acide gras indispensable). Sans consommation de ces produits il est impossible de couvrir les ANC en DHA (250 mg/j) (Anses, 2011). Les études épidémiologiques mettent systématiquement en évidence des proportions plus faibles de DHA dans les lipides sanguins des végétariens et végétaliens (Sanders, 2009). Bien que EPA et DHA puissent être produits de façon endogène, pour ces populations la question d'une déficience se pose de façon aigüe pour la femme enceinte et pour les très jeunes enfants, ces acides gras étant indispensables au bon développement du système nerveux central et de la fonction cognitive chez l'enfant (Burdge *et al.*, 2017). Elle est également pertinente pour les séniors avec la prévention par le DHA des maladies neurodégénératives telles que la démence sénile ou la maladie d'Alzheimer (Shahidi et Ambigaipalan, 2018).

Les produits animaux sont souvent montrés du doigt pour leur teneur élevée en acides gras saturés (AGS) et leur potentiel effet délétère sur le système cardio-vasculaire. Cependant le lien entre consommation d'AGS et maladie cardio-vasculaire est aujourd'hui largement remis en cause (Fattore et Massa, 2018 ; Gershuni, 2018). L'ANSES dans son dernier rapport reconnait la difficulté de fixer une limite haute à leur consommation (par défaut 12% de l'apport énergétique total) mais propose toutefois de limiter la consommation du sous-groupe d'AGS constitué des acides lauriques, myristiques et palmitiques qui peuvent être athérogènes en cas d'excès (Anses, 2011). De fait, les récentes méta-analyses d'études épidémiologiques ne montrent par exemple pas d'association entre la consommation de produit laitier, pourtant riches en AGS, et les maladies cardio-vasculaires (Bechthold *et al.*, 2019 ; Guo *et al.*, 2017). A l'intérieur des produits laitiers, même la consommation de beurre, longtemps décriée, ne semble pas être associée aux maladies cardio-vasculaires et au diabète (Pimpin *et al.*, 2016), et le fromage pourrait même avoir un effet protecteur contre les maladies cardio-vasculaires (Guo *et al.*, 2017). L'ensemble de ces résultats est conforté par une récente étude longitudinale sur une cohorte regroupant des individus (n=136 384) de 21 pays répartis sur 5 continents (Dehghan *et al.*, 2018). Tous ces travaux soulignent l'importance de considérer l'aliment dans sa globalité et de ne pas se limiter pour le caractériser à un seul nutriment potentiellement délétère (Thorning *et al.*, 2017).

La chair de poisson combine ainsi l'avantage d'un apport protéique de qualité avec celui d'un apport de lipides de qualité, en apportant à la fois des acides aminés et des acides gras indispensables. Pour cette raison, il est généralement conseillé d'en manger deux fois par semaine. Les limites à la consommation de cet aliment résident essentiellement dans sa disponibilité, mais aussi dans le risque de sa contamination par des polluants de l'environnement (dioxine, PCB, methyl-mercure…). On peut aussi trouver du DHA dans les œufs, le lait ou le fromage si les animaux ont été nourris avec des produits riches en DHA.

Dans les années 1970, le cholestérol alimentaire a été suggéré comme pouvant accroitre le risque de maladies cardiovasculaires. Cette hypothèse a conduit à des recommandations alimentaires visant à limiter la consommation de d'aliments riches en cholestérol (œuf, viande, …). Le lien entre cholestérol alimentaire et MCV s'est depuis largement distendu (Soliman, 2018), et les limites supérieures de consommation en cholestérol ont été supprimées des recommandations. Toutefois un apport limité reste recommandé pour les personnes à risque de MCV, telles que les diabétiques ou les hypertendus, et les personnes pour lesquelles la cholestérolémie est très corrélée au cholestérol alimentaire.

Les produits animaux sont également sources d'acides gras *trans* (AG *trans*) dont la consommation est recommandée inférieure à 2% de l'apport énergétique (AE). Il faut cependant souligné que les AG *trans* issus des ruminants ne sont pas associés à un risque accru de ces maladies cardiovasculaires, contrairement aux AG *trans* obtenus par hydrogénation des huiles végétales.

3.2.2.3 La fraction non énergétique

Même si certains produits végétaux sont de très bonnes sources de calcium, la richesse des produits laitiers en calcium les rend indispensables pour couvrir facilement les besoins avec une alimentation courante (sans supplément). Leur éviction complète du régime alimentaire augmente largement le risque de déficit, voire de carences en calcium. Ainsi, comparées aux omnivores ou aux végétariens, les personnes végétaliennes ont généralement un moins bon statut calcique (lié à des apports faibles), associé à un moins bon statut en vitamine D, ce qui se traduit par un risque accru de fracture osseuse (Appleby *et al.*, 2007 ; Crowe *et al.*, 2011 ; Hansen *et al.*, 2018). Chez les personnes âgées, la consommation régulière de yogourt a été associée à une densité minérale osseuse plus élevée et de meilleures performances physiques (Laird *et al.*, 2017).

Bien que les études de consommation (comme Nutrinet-Santé) montrent que le risque d'apport inadéquat en fer n'est pas plus élevé chez les végétariens et végétaliens que chez les consommateurs de viande (Alles *et al.*, 2017), les études épidémiologiques mettent généralement en évidence des réserves corporelles en fer plus faibles chez les végétariens et végétaliens que chez les consommateurs de produits carnés (Haider *et al.*, 2018). La différence de biodisponibilité des formes de fer ainsi que la présence dans les produits végétaux d'agent inhibant l'absorption du fer (acide phytique, tanins) expliquent en grande partie cette divergence entre apports et statut en fer (Perignon *et al.*, 2018). Pour les personnes à risque d'anémie ferriprive, femmes en âge de procréer ou enceintes, enfant de 6 mois à 4 ans ou personnes âgées, la présence dans le régime alimentaire de viandes et produits carnés, et plus particulièrement de viande rouge, permet indéniablement un meilleur maintien du statut martial.

Le zinc est présent dans les produits végétaux et animaux, mais la présence d'acide phytique dans les produits végétaux, comme pour le fer, limite fortement sa biodisponibilité. Les études épidémiologiques mettent ainsi en évidence, à la fois une plus faible consommation de zinc et des concentrations sériques en zinc plus faibles chez les végétariens, et encore plus chez les végétaliens, que chez les omnivores (Foster *et al.*, 2013). Le zinc est impliqué dans de nombreuses fonctions biologiques, et les carences en zinc constituent une préoccupation de santé publique mondiale (World Health Organization, 2002), notamment en raison des liens entre le zinc et le système immunitaire (Sanna *et al.*, 2018).

La vitamine B12 n'étant pas présente dans les végétaux, la prévalence d'apport insuffisant est supérieure chez les végétaliens et dans une moindre mesure chez les végétariens par rapport aux omnivores (Alles *et al.*, 2017; Pawlak *et al.*, 2014). La prise de suppléments ou la consommation d'aliments fortifiés en vitamine B12 peut cependant permettre de couvrir les besoins de ces populations (Schupbach *et al.*, 2017). Ces supplémentations sont particulièrement critiques chez la femme enceinte *et* allaitante, une carence en vitamine B12 pendant cette période pouvant avoir des répercussions graves sur le

développement du fœtus, et le développement des fonctions cognitives (Black, 2008). Des déficiences en vitamine B12 sont également souvent observées chez les personnes âgées soit par défaut d'apport, ces personnes ayant tendance à consommer moins de viande, soit par défaut d'absorption (Remond *et al.*, 2015). Elles peuvent avoir pour conséquences des troubles hématologiques (anémie), mais elles semblent également impliquées dans les complications neurologiques de type Alzheimer (Politis *et al.*, 2010), ou dans le développement de syndrome dépressif (Hibbeln *et al.*, 2018). La consommation de produits animaux demeure la meilleure solution pour la prévention de ces carences.

Le poisson, les produits de la mer et les produits laitiers constituent la principale source d'iode de notre alimentation. L'éviction de ces aliments augmente ainsi le risque de déficience. Cette déficience en iode est d'autant plus critique chez les femmes enceintes et allaitantes dans la mesure où elle se traduit par des retards de développement intellectuel de l'enfant (Abel *et al.*, 2017; Bath *et al.*, 2013). Les études épidémiologiques (basées sur l'iode urinaire) montrent systématiquement un apport en iode plus faible chez les végétaliens, comparé aux végétariens et omnivores, avec des niveaux moyens nettement inférieurs aux recommandations (Brantsaeter *et al.*, 2018; Krajcovicova-Kudlackova *et al.*, 2003 ; Leung *et al.*, 2011 ; Schupbach *et al.*, 2017).

Dans le domaine de la prévention nutritionnelle, et dans l'optique d'une couverture de l'ensemble des besoins, la présence de produits animaux dans l'alimentation reste donc recommandée. Basés sur un processus d'optimisation incluant les critères de couverture des besoins nutritionnels, et imposant des limites de consommation supérieures pour la viande de boucherie et la charcuterie, les travaux de l'Anses (2016a) montrent clairement qu'en raison des contraintes nutritionnelles à satisfaire (notamment en fer), si il est possible de fortement réduire la consommation de charcuterie (au moins pour les hommes), il est plus difficile de réduire celle de viande de boucherie par rapport aux consommations actuelles. La simulation montre également qu'il est très difficile de se passer de la consommation de produits laitiers.

3.2.3 Effet des modes d'élevage et des procédés de transformation

3.2.3.1 Elevage

Protéines

La viande est constituée d'une multitude de protéines et parmi elles, il est possible de distinguer les protéines contractiles (environ 60% : myosines, actines), sarcoplasmiques (environ 30%) et celles du tissu conjonctif (environ 10%). La composition en acides aminés des différentes sortes de viandes est très semblable. Elle est essentiellement influencée par la teneur du muscle en collagène, dont la composition en acides aminés est très particulière (pauvre en AAI, carencé en tryptophane, riche en proline, hydroxyproline et glycine). Il faut cependant noter que, même pour des teneurs extrêmes en collagène (20% dans la joue), son impact sur la composition en acides aminés indispensables reste modéré. Les protéines contractiles, qui sont majoritaires dans le muscle, jouent un rôle clé dans le maintien de la position et la motricité de l'animal, leur séquence en acides aminés, dictée par le code génétique, est ainsi une des plus conservée au cours de l'évolution, ce qui explique le peu de variabilité observée dans la composition en acides aminés des différentes viandes (espèce, race, élevage) (Remond, 2018). Il y a donc peu de levier pour modifier cette composition, qui, du reste, est déjà quasi-optimale par rapport aux besoins de l'homme. Le même raisonnement s'applique aux laits et aux œufs, chaque protéine au sein de ces produits remplissant une fonction biologique très précise, la composition globale en acides aminés est très peu variable.

Lipides

Contrairement aux protéines la qualité des lipides des produits animaux est fortement liée aux systèmes d'élevage, et ce quelle que soit l'espèce. Chez les ruminants, une alimentation à base d'herbe conduit à des viandes plus riches en AGPI n-3 (acide alpha-linolénique mais aussi EPA et DHA), donc à une meilleure qualité nutritionnelle. Toutefois, en raison de sa plus faible teneur en lipide, la contribution de cette viande produite 'à l'herbe' aux apports en AGPI n-3 de l'alimentation reste limitée. De même, l'incorporation dans la ration de graines riches en AGPI n-3 permet d'accroître les teneurs en AGPI n-3 des viandes de ruminants, même si une part importante des acides gras alimentaire est dégradée dans le rumen (exemple de la

filière Bleu-Blanc-Cœur avec la graine de lin). Cette stratégie est d'autant plus intéressante chez les animaux monogastriques (porc et volaille) chez lesquels la composition en acides gras déposés dans les muscles est en relation directe avec la nature des acides gras ingérés (Baeza et Berri, 2018; Mourot *et al.*, 2018). Ainsi, chez ces animaux un enrichissement de la ration en AGPI n-3 (graine de lin, huile de poisson, ou algues marines) se traduit par une augmentation correspondante en AGPI n-3 dans les viandes produites. Cet effet se retrouve également dans la composition en acides gras des œufs (Nys *et al.*, 2018), l'incorporation de 10% de graines de lin dans la ration des poules multipliant de 5 à 10 fois la teneur en AGPI n-3 (Œufs oméga-3). Le type d'alimentation influence également la composition en acides gras du lait : le pâturage se traduisant par exemple par des teneurs plus élevées en AGPI n-3.

Prises individuellement, les stratégies alimentaires mises en œuvre dans les différentes filières pour améliorer la composition en acides gras des produits animaux peuvent paraitre peu efficaces par rapport à l'impact sur la couverture des besoins nutritionnels en lipides de l'homme (Martin *et al.*, 2019). Néanmoins les efforts cumulés de chacune des filières pourrait permettre d'améliorer significativement la qualité globale de l'apport lipidique liée à la consommation de produits animaux.

Deux méta-analyses récentes se sont intéressées à la différence entre agriculture conventionnelle et biologique sur la composition en acides gras du lait (Srednicka-Tober *et al.*, 2016b) et de la viande (Srednicka-Tober *et al.*, 2016a). La teneur en AGPI n-3 s'est révélée significativement supérieure pour le lait issu de l'agriculture biologique (acide alpha-linolénique, DHA, EPA). Les auteurs concluent que cette différence est essentiellement liée au mode d'alimentation, l'agriculture biologique faisant une part plus importante aux fourrages pâturés et conservés. Le profil en acide gras des viandes produites en agriculture biologique semble également aller vers une plus forte proportion en AGPI, mais l'hétérogénéité des données est très élevée, et comme pour le lait cette différence semble expliquée en grande partie par le mode d'alimentation des animaux. De même, en raison de l'accès à un parcours herbagé, les œufs de poules élevées en agriculture biologique présentent des teneurs en AGPI n-3 (particulièrement en acide alpha-linolénique et DHA) plus élevées (Mugnai *et al.*, 2014).

Vitamines et minéraux

Dans la mesure où les besoins des animaux sont couverts, les teneurs en vitamines et minéraux des viandes semblent peu impactées par les systèmes de productions. Par contre, en jouant sur l'alimentation des poules, il est possible de produire des œufs enrichis en vitamines (à l'exception des vitamines C et B3) et en minéraux (notamment iode et sélénium). Pour une consommation de 25 g d'œuf par jour, la couverture des besoins en vitamines pourrait ainsi passer de 2-15% à 10-50% entre un œuf standard et un œuf enrichi (Nys *et al.*, 2018). La composition vitaminique du lait peut également significativement varier en fonction de l'alimentation des ruminants. Ainsi, par rapport à une ration à base de maïs, une alimentation à l'herbe permet d'augmenter la teneur en vitamines A, E, B2 et B9, mais conduit à une teneur plus basse en vitamines B12. Toutefois, au niveau de la consommation de produits laitiers actuellement observés en France, ces différences, bien que marquées, n'ont qu'un impact marginal sur la contribution des produits laitiers à la couverture des besoins en vitamines (Martin *et al.*, 2019).

Des produits animaux issus de l'agriculture biologique semblent être peu différents des autres en termes de composition en vitamines et minéraux. Une méta-analyse (Srednicka-Tober *et al.*, 2016b) met cependant en évidence des teneurs plus faibles en iode et sélénium dans le lait 'bio', mais des teneurs plus élevées en fer et tocophérol.

3.2.3.2 Procédés de transformation

Le traitement thermique est le procédé technologique le plus communément utilisé. En ce qui concerne les protéines ils peuvent engendrer dénaturation, oxydation et agrégations moléculaires. On parle de protéine dénaturée lorsque les changements induits au niveau structural ne permettent plus à la protéine d'assurer sa fonction biologique. L'augmentation de la température a pour effet de rompre en premier lieu les liaisons faibles hydrogène reliant les radicaux de la chaîne. De même, en milieu trop acide, trop alcalin ou très concentré en électrolytes, la plupart des protéines se dénaturent. Les régions hydrophobes se tournent alors vers l'extérieur de la protéine, et les hydrophiles vers le centre. Cela conduit à une perte de solubilité des protéines, leur précipitation et pour certaines leur gélification. L'oxydation des protéines par les radicaux libres

concerne trois classes d'acides aminés : les basiques, les soufrés et les aromatiques. Les acides aminés basiques (particulièrement la lysine et l'arginine) subissent une désamination oxydative en présence d'un radical hydroxyle, générant un groupement carbonyle. L'oxydation des cystéines conduit à la formation de ponts disulfures. Enfin, l'oxydation des acides aminés aromatiques par le radical hydroxyle conduit pour la phénylalanine à la formation de tyrosine, pour la tyrosine à de la dityrosine et pour le tryptophane à de l'hydroxytryptophane. La formation de carbonyles, de ponts disulfures ou de dityrosine, les modifications des charges et l'augmentation de l'hydrophobie de surface des protéines entraînent de nouvelles interactions entre les chaînes polypeptidiques et provoquent la formation d'agrégats. De plus, la formation de protéines glyquées (produits de la réaction de Maillard), dont la quantité s'accroît de façon considérable lors d'un chauffage intense en présence de glucides, participe à la formation de ces agrégats.

Les effets des traitements thermiques sur la digestion des protéines diffèrent selon les produits. C'est pour les œufs que l'effet de la cuisson est le plus spectaculaire. La digestibilité des protéines entre l'œuf cru et l'œuf cuit passe de 50 à 90% (Evenepoel *et al.*, 1998). Pour le lait, le chauffage favorise la réaction de Maillard, qui est connue pour diminuer la biodisponibilité de la lysine (un des acides aminés indispensables) (Rerat *et al.*, 2002). Cependant, avec les traitements industriels classiquement utilisés (pasteurisation, UHT, séchage par atomisation) on n'observe pas de différence notable de digestibilité des protéines (qui reste très élevée) et pas de corrélation entre la qualité nutritionnelle du lait et le traitement thermique appliqué (Lacroix *et al.*, 2006). En ce qui concerne la viande, des différences de digestibilité des protéines ont été observées en fonction du mode de cuisson (Hodgkinson *et al.*, 2018; Oberli *et al.*, 2015), mais celles-ci demeurent faibles et dans tous les cas la digestibilité reste très élevée.

Les effets des traitements thermiques sur la digestion des protéines s'observent surtout sur la vitesse de digestion, qui elle-même affecte l'efficacité d'utilisation des protéines par l'organisme. Par exemple, pour le lait, le traitement UHT entraîne une augmentation de la vitesse de digestion des protéines par rapport au lait cru ou pasteurisé (Lacroix *et al.*, 2008). Pour la viande, la cuisson permet également de moduler la vitesse de digestion (Bax *et al.*, 2013). Cet effet n'est cependant pas linéaire, mais semble suivre une évolution 'en cloche', la vitesse de digestion la plus élevée étant observée pour une température de cuisson de l'ordre de 75°C à cœur. Cette évolution pourrait s'expliquer par une dénaturation progressive des protéines pour des températures de cuisson jusqu'à 75°C, puis par la formation d'agrégats moléculaires pour des températures plus élevées, suite à la mise en place de processus d'oxydation. Ces phénomènes conduisent respectivement à une augmentation, puis à une diminution de l'accessibilité des enzymes digestives à leur site de coupure (Bax *et al.*, 2012).

Il est intéressant de noter que les différences de vitesse de digestion induites par les traitements thermiques se traduisent par des différences significatives dans l'efficacité d'utilisation par l'organisme des protéines du lait (Lacroix *et al.*, 2008) et de la viande (Buffiere *et al.*, 2017). Ces observations soulignent l'importance de la prise en compte de la microstructure des aliments dans la prédiction de la qualité d'un aliment. De façon similaire la macrostructure peut impacter la qualité nutritionnelle d'un aliment. Par exemple, la gélification du lait ralentit la vitesse de digestion de ses protéines (Barbe *et al.*, 2013), ou le hachage de la viande accélère la vitesse de digestion et l'efficacité d'utilisation des protéines chez les personnes âgées (Pennings *et al.*, 2013).

La cuisson impacte généralement peu la fraction lipidique, comme cela a été montré pour les viandes (Duchene et Gandemer, 2016). On peut cependant noter que la cuisson de la viande peut entraîner des pertes importantes en nutriments solubles par expulsion dans les jus de cuisson, c'est notamment le cas des vitamines B12 et B3, et également par dégradation thermique pour la vitamine B6 et le fer héminique qui se transforme partiellement en fer non-héminique.

3.3. Additifs et résidus

3.3.1 Utilisation d'additifs dans la formulation de produits alimentaires d'origine animale

Les additifs autorisés par catégorie de produits alimentaires ainsi que les doses maximales autorisées (lorsque celles-ci ont été définies) et les spécifications d'usage sont règlementés au niveau de l'Union Européenne (2011). Sont présentés ici des exemples d'additifs fréquemment retrouvés sur le marché français dans les produits d'origine animale et pour lesquels des effets potentiels sur la santé ont été suggérés dans des études expérimentales in vivo/in vitro et, plus rarement, dans des études épidémiologiques chez l'Homme.

Afin d'estimer les occurrences d'additifs, la base de données collaborative Open Food Facts a été utilisée[1]. Cette initiative française contient des données sur des centaines de milliers de produits alimentaires commercialisés en France. Les contributeurs ajoutent en permanence des produits à cette base de données, en scannant le code-barres et en envoyant des photos de l'emballage. L'information est automatiquement traitée pour enregistrer différentes informations comme le nom commercial, la marque, la liste des ingrédients, la présence ou l'absence de chaque additif alimentaire (information qualitative sans dose) et la composition nutritionnelle.

Il ne s'agit pas d'une revue systématique de la littérature, les listes présentées ci-dessous ne sont donc pas exhaustives.

3.3.1.1 Viandes, charcuteries et produits à base d'œufs

Parmi les additifs fréquemment retrouvés dans les aliments transformés d'origine animale de type viandes, charcuteries et produits à base d'œufs, on retrouve principalement les additifs suivants[1] : nitrite de sodium (E250, conservateur), nitrate de potassium (E252, conservateur), acétate de sodium (E262, conservateur), acide ascorbique (E300, antioxydant), ascorbate de sodium (E301, antioxydant), érythorbate de sodium (E316, antioxydant), sels métalliques de diphosphates (E450, émulsifiants/conservateurs), triphosphates (E451, émulsifiants/conservateurs), carraghénanes (E407, émulsifiants), et acide carminique (E120, colorant). Certains effets sur la santé ont été suggérés pour plusieurs de ces additifs.

Par exemple, les nitrates de potassium et les nitrites de sodium sont utilisés en tant qu'additifs alimentaires pour stabiliser les produits carnés et les fromages (Menard *et al.*, 2008). Ces composés ont été associés dans des cohortes prospectives à la mortalité toutes causes confondues (nitrates/nitrites de viande conservée/transformée) (Etemadi *et al.*, 2017) et aux cancers gastriques et pancréatiques (Quist *et al.*, 2018 ; Santarelli *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2015). Des études expérimentales ont suggéré des associations avec le développement de carcinomes colorectaux (Santarelli *et al.*, 2010) et œsophagiens (Endo *et al.*, 2010 ; Kuroiwa *et al.*, 2008), alors que d'autres suggèrent à l'inverse des bénéfices cardiovasculaires potentiels in vivo (Ahluwalia *et al.*, 2016; Machha et Schechter, 2011). Les nitrites – y compris sous forme d'additifs alimentaires – contribuent à la formation de nitrosamines, dont certaines sont cancérigènes. En 2017, l'EFSA concluait que certaines études épidémiologiques avaient mis en évidence des éléments permettant de lier (i) les nitrites alimentaires et les cancers gastriques et (ii) la combinaison des nitrites et des nitrates provenant de la charcuterie et le cancer colorectal (Mortensen *et al.*, 2017), mais recommandait la mise en place de nouvelles études épidémiologiques et expérimentales pour mieux comprendre les relations entre exposition aux nitrites, nitrates, nitrosamines et santé. Les simulations d'exposition réalisées par l'EFSA suggèrent qu'une proportion relativement importante de la population est susceptible de dépasser les doses journalières admissibles (DJA) pour les nitrites et nitrates toutes sources confondues (additifs alimentaires, présence naturelle dans les aliments/eaux de boisson et contaminants environnementaux). Pour les nitrates sous forme d'additifs (E252), les niveaux d'exposition actuels étaient inférieurs à la DJA, en revanche pour les nitrites sous forme d'additif (E250), des dépassements de la DJA seraient observés dans les simulations d'exposition (ex : chez les enfants) (Mortensen *et al.*, 2017).

Les additifs phosphatés, dont les sels métalliques de diphosphates (E450) et le triphosphate (E451) jouent un rôle particulièrement important dans l'industrie de la viande où ils sont utilisés comme conservateurs (Ritz *et al.*, 2012). Des effets adverses ont été suggérés au niveau expérimental sur la fonction rénale (Block *et al.*, 2013 ; Hong *et al.*, 2015), des effets cancérigènes (Hong *et al.*, 2015), une perturbation du métabolisme minéral (Kemi *et al.*, 2009; Vorland *et al.*, 2017), et un risque cardiovasculaire (Dhingra *et al.*, 2007 ; McCarty et DiNicolantonio, 2014 ; Ritz *et al.*, 2012 ; Tonelli *et al.*, 2005) ont également été suggérés. L'EFSA a estimé en 2019 que les additifs alimentaires constituaient 6 à 30% de l'apport total moyen en phosphore (Younes *et al.*, 2019). L'agence souligne par ailleurs que l'exposition alimentaire aux phosphates pourrait

[1] Open Food Facts. Liste des additifs - France [Internet]. Open Food Facts. 2019 [cited 2019 May 16]. Available from: https://fr.openfoodfacts.org/additifs

dépasser la DJA fixée (combinée pour tous les phosphates) dans plusieurs groupes de population (nourrissons, enfants, adolescents) (Younes *et al.*, 2019).

Les carraghénanes sont couramment utilisés comme additifs alimentaires épaississants et émulsifiants pour améliorer la texture des produits de charcuterie (Martino *et al.*, 2017). Les études sur les potentiels effets santé des carraghénanes sont mitigées. Plusieurs études expérimentales ne montrent pas d'effet carcinogène, génotoxique ou développemental (Weiner, 2014), d'autres suggèrent en revanche que les carraghénanes pourraient déclencher ou amplifier une réponse inflammatoire intestinale, favorisant le développement de maladies inflammatoires chroniques de l'intestin (MICI) (Martino *et al.*, 2017), mais aussi avoir un effet sur la tolérance au glucose (Bhattacharyya *et al.*, 2015; Bhattacharyya *et al.*, 2012) ou encore un potentiel effet carcinogène (Tobacman, 2001). De plus amples études sont donc nécessaires afin de pouvoir statuer sur le risque lié à l'utilisation des carraghénanes (David *et al.*, 2018). En 2018, sur la base de la littérature disponible, l'EFSA conclut à une faible probabilité d'effets carcinogènes ou génotoxiques, mais souligne des incertitudes en ce qui concerne l'évaluation de l'exposition et les données biologiques et toxicologiques, recommandant une réévaluation dans 5 ans (Younes *et al.*, 2018b). Le Panel a également conclu à un dépassement possible de la DJA jusqu'à environ 10 fois pour certains scenarios et groupes de population. Le rapport précise que bien que l'exposition puisse être surestimée, l'ampleur du dépassement de la DJA (10 fois) peut constituer un problème de sécurité sanitaire (Younes *et al.*, 2018b).

L'acide ascorbique (E300) pourrait contribuer en tant qu'additif alimentaire à l'apport total en vitamine C et aux bénéfices potentiels associés à ce nutriment, comme le suggère l'évaluation de l'EFSA en 2015 (Aguilar *et al.*, 2015).

Parmi les additifs précités, certains sont autorisés dans le cadre du label Agriculture Biologique : acide ascorbique (E300), nitrite de sodium (E250), carraghénanes (E407), ascorbate de sodium (E301) et nitrate de potassium (E252). Par ailleurs, l'usage d'additifs est strictement réglementé (autorisations particulières) pour les charcuteries bénéficiant d'une Appellation d'Origine Contrôlée (AOC) telles que le jambon de Parme, ou le jambon sec de Corse (République Française, 2012).

3.3.1.2 Poissons et produits de la mer

Dans le groupe des poissons et produits de la mer transformés, on retrouve principalement les additifs suivants[1] : acide citrique (E330, antioxydant), amidons modifiés (E1401-1452, épaississants), gomme xanthane (E415, émulsifiant), gomme de guar (E412, émulsifiant), carraghénanes (E407, émulsifiants), extrait de paprika (E160c, colorant), disulfite de sodium (E223, conservateur), benzoate de sodium (E211, conservateur), sels métalliques de diphosphates (E450, émulsifiants) et sorbate de potassium (E202, conservateur).

Parmi ces additifs, plusieurs (en plus des carraghénanes et diphosphates discutés ci-dessus) ont fait l'objet d'études suggérant de possibles effets santé. Par exemple, des études expérimentales ont montré des associations entre le disulfite de sodium (E223) et une altération du microbiote intestinal (Irwin *et al.*, 2017), ainsi que des effets neurotoxiques (Kocamaz *et al.*, 2012). Ces résultats restent toutefois mitigés. En 2016, l'EFSA concluait que les données disponibles ne laissaient pas penser à un risque majeur de génotoxicité, cancérogénicité ou reprotoxicité, mais que des données supplémentaires sur les sulfites étaient nécessaires pour en « confirmer pleinement » la sécurité. Les simulations d'exposition pour l'apport total en sulfites se sont en outre révélées supérieures aux DJA fixées pour tous les groupes de populations étudiés.

Par ailleurs, des études expérimentales ont suggéré des effets génotoxiques, carcinogènes, cytotoxiques et inflammatoires du benzoate de sodium (E211) (Abo-El-Sooud *et al.*, 2018 ; Nair, 2001 ; Raposa *et al.*, 2016; Turkoglu, 2007 ; Zengin *et al.*, 2011). De plus, des mélanges de colorants avec du benzoate de sodium (E211) ont été associés à une hyperactivité accrue chez l'enfant (McCann *et al.*, 2007). L'EFSA a estimé en 2016 que l'utilisation de benzoate de sodium en tant qu'additif alimentaire ne soulevait pas de problème de génotoxicité ni de potentiel carcinogène. Les simulations d'exposition suggéraient un dépassement de la DJA chez les nourrissons et les enfants (Aguilar *et al.*, 2016; del Olmo *et al.*, 2017).

Parmi les additifs précités, l'acide citrique (E330), la gomme xanthane (E415), la gomme de guar (E412) et les carraghénanes (E407) sont autorisés dans les produits issus de l'Agriculture Biologique.

3.3.1.3 Produits laitiers

Les additifs suivants sont fréquemment utilisés dans la transformation des produits laitiers : carraghénanes (E407, émulsifiants), amidons modifiés (E1401-1452, épaississants), gomme de guar (E412, émulsifiant), pectines (E440,

émulsifiants), farine de graines de caroube (E410, émulsifiant), acide citrique (E330, antioxydant), gomme xanthane (E415, émulsifiant), lécithines (E322, antioxydant), carboxyméthylcellulose (E466, émulsifiant) et acésulfame potassium (E950, édulcorant). Les additifs phosphatés, dont les sels métalliques de diphosphates (E450) et les polyphosphates (E452, émulsifiants) sont également utilisés comme composants des sels de fonte dans la production de fromages à pâte molle (Ritz *et al.*, 2012).

En sus des additifs discutés précédemment, de potentiels effets sur la santé ont été suggérés pour plusieurs de ces additifs. Par exemple, la carboxyméthylcellulose (E466) est notamment utilisée dans de nombreuses crèmes fraiches. Elle a été associée lors d'études expérimentales *in vivo* à des altérations du microbiote intestinal, à une hausse de l'inflammation, au syndrome métabolique et à des effets pro-carcinogènes (Chassaing *et al.*, 2015 ; Chassaing *et al.*, 2017 ; Holder et Chassaing, 2018 ; Martino *et al.*, 2017 ; Roca-Saavedra *et al.*, 2018 ; Swidsinski *et al.*, 2009 ; Viennois et Chassaing, 2018 ; Viennois *et al.*, 2017; Zinocker et Lindseth, 2018). Cependant, l'EFSA a estimé en 2018 que les données disponibles ne justifiaient pas l'établissement d'une DJA pour cet additif (Younes *et al.*, 2018a).

Dans les crèmes laitières, une étude expérimentale a montré que l'ajout de carraghénanes et d'esters de mono/diglycérides d'acides gras n'altérait pas le métabolisme des lipides, mais était associée, au niveau du duodénum, à une augmentation de l'expression des gènes impliqués dans l'absorption lipidique (Milard *et al.*, 2018).

L'acésulfame potassium (E950), édulcorant largement utilisé dans les yaourts sans sucres, a fait l'objet d'études suggérant de potentiels effets adverses sur la santé cardiométabolique humaine et l'adiposité (Azad *et al.*, 2017) et a été associé à la néoplasie et à l'altération du microbiote intestinal dans des études expérimentales chez le rat (Bandyopadhyay *et al.*, 2008 ; Bian *et al.*, 2017; Suez *et al.*, 2014). L'EFSA n'a pas encore effectué la réévaluation de cet additif.

Parmi ceux cités ci-dessus, les additifs suivants sont autorisés en Agriculture Biologique : carraghénanes (E407), gomme de guar (E412), pectines (E440), farine de graines de caroube (E410), acide citrique (E330), gomme xanthane (E415), lécithines (E322). A noter que selon la directive Européenne 1333/2008, aucun additif n'est autorisé dans le beurre, dans le lait pasteurisé et stérilisé non aromatisé (y compris UHT), dans la crème pasteurisée nature non aromatisée (à l'exclusion de la crème allégée), dans les produits laitiers fermentés non aromatisés (non traités thermiquement après fermentation), ni dans le babeurre non aromatisé (à l'exclusion du babeurre stérilisé) (Union Européenne, 2008).

De plus, pour la fabrication des fromages bénéficiant d'une AOC, la présence des additifs est strictement règlementée par le décret n°2006-416 (République Française, 2006).

Les niveaux maximaux autorisés d'additifs alimentaires fixés par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA)[2] et le JECFA de l'OMS-FAO au niveau international (FAO et WHO, 2011) sont destinés à protéger les consommateurs contre les effets potentiels de chaque substance individuelle présente dans un produit alimentaire donné. Cependant, malgré l'ampleur du travail d'analyse et l'expertise collective de ces institutions, leurs évaluations (et les recommandations et règlements sous-jacents) n'ont pu être fondées que sur les données scientifiques disponibles qui proviennent principalement de recherches expérimentales *in vitro* ou *in vivo* et de simulations d'exposition chez l'homme. En attendant, les informations concernant l'impact sur la santé de la consommation régulière et cumulée d'additifs alimentaires chez l'homme sont toujours manquantes. De même, il existe très peu d'information concernant de potentiels effets « cocktails », alors même que plusieurs études expérimentales ont commencé à suggérer des interactions et des synergies entre les additifs alimentaires (Basak *et al.*, 2017; Lau *et al.*, 2006 ; McCann *et al.*, 2007).

[2] European Food Safety Authority. Food Additives [Internet]. European Food Safety Authority. [cited 2018 Sep 7]. Available from: https://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/food-additives

3.3.2 Résidus de médicaments vétérinaires

Dans l'alimentation, un résidu est défini comme une substance présente sur ou dans un produit alimentaire, suite à l'application de produits pesticides, biocides ou à l'utilisation de médicaments vétérinaires. Pour ces résidus, il est donc défini un seuil réglementaire dit Limite Maximale de Résidus (LMR) qui tient compte de la toxicité de la substance et de l'exposition possible du consommateur. Les LRM sont fixées par décision de la Commission Européenne basée sur un avis scientifique rendu par l'Agence européenne du médicament (EMA). La LMR s'applique à une substance et pour une denrée spécifique.

Concernant l'emploi des médicaments vétérinaires, il est réglementé par la législation européenne et internationale (Union Européenne, 2010). L'administration de médicaments vétérinaires à des animaux peut entraîner la présence de résidus dans les denrées alimentaires d'origine animale (la viande, le poisson, le lait, les œufs sont les produits qui relèvent du périmètre de cette ESCo). Le respect des modalités d'utilisation (voie d'administration, posologie) et du temps d'attente après traitement permet de garantir avec une forte probabilité des niveaux de résidus inférieurs aux LMR et une absence de risque toxicologique pour le consommateur. Des plans de contrôle officiels sont mis en place par l'Anses pour surveillance la présence de résidus de médicaments. Une non-conformité est alors déclarée soit par la simple présence de résidus, lorsque la substance est interdite d'emploi, soit par la présence de résidus à des concentrations supérieures à celles autorisées (LMR). Ces plans de contrôle sont mis en place depuis 1989 en production primaire bovine et de volaille afin de répondre aux exigences européennes et en particulier de la directive 96/23/CE relative aux mesures de contrôle à mettre en œuvre à l'égard d'antibiotiques et de leurs résidus dans les animaux vivants et leurs produits (Union Européenne, 1996).

Concernant les volailles et les œufs, plusieurs familles de médicaments vétérinaires sont autorisées : antibiotiques, antiparasitaires, anthelminthiques, anticoccidiens, mais il est à noter que le nombre de molécules disponibles est restreint chez les poules pondeuses en raison de la production d'œufs et du risque de transfert des résidus dans l'œuf. Les résultats de ces plans de contrôle montrent que les muscles et les œufs commercialisés en Europe (European Food Safety Authority, 2016) sont en grande majorité exempts de contaminants chimiques réglementés. En France en 2015, les non-conformités détectées dans le muscle de volaille ne concernaient que les antibiotiques avec seulement 0,24% des viandes et 0,43% des œufs concernés (Roudaut et Fournet, 2017).

Concernant les résidus d'antibiotiques dans la viande bovine et le lait, aucune non-conformité n'avait été retrouvée dans le lait en 2013, mais 0,7% des viandes bovines présentaient une non-conformité. Les familles les plus fréquemment à l'origine de ces non-conformités sont les tétracyclines (42%), les aminosides (28%), les macrolides (23%), les fluoroquinolones et les beta-lactamines. Les non-conformités concernent essentiellement les vaches laitières de réforme (44%) puis les veaux et jeunes bovins (30%) et enfin les vaches allaitantes (26%). Mais globalement, ce taux global de 0,7% de non-conformité peut être considéré comme très faible (Fournet et Roudaut, 2015). Au-delà du respect des LMR, des résidus d'antibiotiques peuvent être présents à des niveaux inférieurs au seuil réglementaire (Dervilly-Pinel *et al.*, 2017).

3.4. Part des produits animaux dans le fardeau des maladies associées à des dangers biologiques

Les aliments sont à l'origine de la transmission de dangers biologiques, qui occasionnent des effets néfastes sur la santé des consommateurs. L'identification des aliments à l'origine des effets néfastes et/ou des causes ayant conduit à leur apparition n'est pas toujours évidente et nécessite l'utilisation d'une méthodologie communément appelée attribution des sources. Pour les dangers microbiologiques, il existe différentes méthodes d'identification et de mesure de la contribution des sources alimentaires (Pires, 2013 ; Pires *et al.*, 2009). Il est possible d'adopter une démarche descendante (ou approche « top-down ») fondée principalement sur des données épidémiologiques, une démarche ascendante (ou approche « bottom-up ») qui s'appuie sur l'appréciation quantitative des risques ou encore d'utiliser la connaissance d'experts. Récemment plusieurs rapports et publications de l'Anses (Anses, 2014 ; 2015 ; 2017 ; 2018) et de Santé Publique France (Van Cauteren *et al.*, 2015 ; Van Cauteren *et al.*, 2017 ; 2018) ont été publiés sur cette question de l'importance des maladies d'origine alimentaire et sur l'attribution des sources. Ils s'appuient sur des démarches descendantes et sur l'élicitation de dire d'experts. Ils permettent aujourd'hui l'évaluation de la place des aliments d'origine animale dans le fardeau sanitaire des principaux dangers biologiques. Deux approches sont ici présentées. La première utilise les données observées d'épidémies d'origine

alimentaire connue, la seconde approche se base sur les données de maladies observées et sur l'estimation de l'origine alimentaire de ces maladies.

3.4.1 Utilisation des données nationales de déclaration des toxi-infections alimentaire collectives (TIAC)

3.4.1.1 Bilan des données de TIAC

Les méthodes descendantes peuvent être basées sur des investigations épidémiologiques comme l'analyse des données de TIAC (Greig et Ravel, 2009).

Les investigations d'épidémies permettent de recueillir des données sur les cas humains, l'agent pathogène incriminé, l'exposition alimentaire, lorsqu'elle a pu être retrouvée, ainsi que les facteurs ayant contribué à l'épidémie. L'analyse rétrospective de ces épidémies permet de mesurer l'importance des voies de transmission (alimentaires, inter-humaines…), des véhicules (les aliments) ou des pratiques (comme les modes de consommation) à l'origine des épidémies. Ces bilans peuvent également permettre de hiérarchiser les sources, c'est-à-dire les réservoirs (bovin, volaille, environnement, …), à l'origine des épidémies.

En France, la surveillance des épidémies alimentaires repose principalement sur la déclaration obligatoire (DO) des toxi-infections alimentaires collectives (TIAC) et les centres nationaux de référence (CNR) dans le cadre de la surveillance de maladies à déclaration obligatoire (par ex. listériose, botulisme) ou non (par ex. salmonelloses non typhiques, campylobactériose).

Un bilan de données de TIAC a été récemment réalisé en France par l'Anses (2018). L'analyse a été réalisée à partir des TIAC pour lesquelles l'agent pathogène a été isolé dans un échantillon d'origine humaine ou dans les aliments consommés par les malades. La répartition par agent et par catégorie d'aliments de 1 602 TIAC à agent confirmé recensé par Santé Publique France de 2006 à 2015 est présentée dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2. Pourcentage de TIAC à agent confirmé (N=1602) par catégorie d'aliment et par danger biologique pour la période 2006-2015 (d'après Anses, 2018).

	B. cereus	Campylobacter	C. perfringens	Histamine	Salmonella	S. aureus	Norovirus	TOTAL
Viandes	1,7	5,2	3,7	0,1	16,8	2,9	0,3	30,7
Lait et produits laitiers	–	0,2	–	0,1	4,6	1,9	–	6,9
Œufs et préparations à base d'œufs	–	0,2	–	–	23,5	0,3	0,2	24,3
Produits de la pêche	0,7	0,1	0,3	5,9	2,2	0,6	5,0	14,8
Végétaux	0,6	0,1	0,6	–	0,2	0,4	0,3	2,2
Plats composites	5,6	1,4	4,7	0,2	3,7	4,2	0,7	20,7
Eau	–	0,2	–	–	–	–	–	0,2
Autres aliments	–	0,2	–	–	–	–	–	0,2
TOTAL	8,6	7,8	9,4	6,3	50,9	10,4	6,6	100

3.4.1.2 Part des denrées d'origine animale et attribution aux réservoirs animaux

Les denrées d'origine animale sont particulièrement impliquées dans les TIAC avec les viandes, les œufs et préparations à base d'œufs (crus ou peu cuits) et les produits de la pêche qui totalisent 70% des TIAC (Tableau 3-1).

En regardant l'impact des filières les volailles sont à l'origine de 35,3% des TIAC à agent confirmé contre 11,2% pour les porcins et 8,2% aux bovins (Anses, 2018).

3.4.1.3 Limites de l'estimation des sources à partir des épidémies

L'analyse des données de TIAC est régulièrement effectuée car elle est la plus simple à réaliser. Cependant, comme elle n'est basée que sur les données de la surveillance des TIAC, elle peut conduire à des biais (Mangen *et al.*, 2010). Par exemple, une étude récente réalisée aux Etats-Unis a montré en se basant sur l'analyse des données de 2 655 TIAC sur la période 1998-2012 que 68% des cas de campylobactériose seraient associés aux produits laitiers contre seulement 8% aux viandes de

volailles. Pourtant, la part relative due aux filets de volaille est certainement supérieure à celle des produits laitiers, mais les cas de campylobactériose associés aux produits issus de la filière volaille sont plus souvent des cas sporadiques et ne sont pas pris en compte dans le calcul (IFSAC, 2015).

3.4.2 Approche descendante basée sur des estimations de l'incidence des maladies

Les données de TIAC ne représentent qu'une part minoritaire des maladies associées aux dangers biologiques. Le nombre de personnes touchées par les maladies d'origine alimentaire est en effet difficile à estimer. La non-consultation, l'absence de diagnostic ou encore la performance du système de déclaration rendent très incertaine l'estimation du nombre de cas. Pour illustrer cette difficulté et l'écart entre les cas recensés et l'incidence réelle, l'exemple de *Campylobacter* est intéressant. En France, 4 629 cas de campylobactériose par an ont été en moyenne recensés par le CNR sur la période 2011 à 2013 (InVS, 2015). Récemment une estimation de l'incidence « réelle » en population générale des infections à *Campylobacter* a été réalisée sur la période 2008-2013 à partir de différentes sources de données (système de surveillance, bases médico-administratives, etc.) (Van Cauteren *et al.*, 2015). L'incidence annuelle est estimée dans un intervalle de crédibilité à 95% compris entre 330 000 et 1 000 000 de cas.

3.4.2.1 Appréciation de l'incidence des maladies

Le tableau 3-3 rapporte les données d'incidence des maladies d'origine alimentaire. Les données de SPF permettent d'établir le bilan pour 15 agents pathogènes. L'Anses a complété cette estimation de l'incidence pour 13 autres pathogènes à partir des données des Centre Nationaux de Reference et des données recensées par le système de Déclaration Obligatoire. Les incidences annuelles ainsi estimées des 26 maladies ont été classées en cinq classes d'incidence (des incidences de moins de 0,01 cas pour 100 000 habitants ; jusqu'à des incidences supérieures 100 cas pour 100 000 habitants).

Tableau 3-3. Incidences des maladies alimentaires associées aux bactéries (ainsi qu'à leurs toxines et leurs métabolites), aux virus et aux parasites (d'après Anses et al. (2014) ; Augustin et al. (en révision)

Dangers		Incidence estimée / 100 000 habitants	Classe d'incidence (en nbre de cas pour 100 000 habitants	Références	Nombre de DALY pour 1000 cas (d'après ANSES 2015)
Bactéries, toxines et leurs métabolites	Bacillus cereus	110	>100	Van Cauteren *et al.* (2017)	<10
	Brucella spp.	0.04	0,01–0,1	Déclaration obligatoire	100–999
	Campylobacter spp.	600	5	Van Cauteren *et al.* (2017)	10–99
	Clostridium botulinum	0.03	0,01–0,1	Van Cauteren *et al.* (2017)	100–999
	Clostridium perfringens	180	5	Van Cauteren *et al.* (2017)	<10
	E. coli producteurs de shigatoxine	28	10-100	Van Cauteren *et al.* (2017)	10–99
	Listeria monocytogenes	0.6	0,1–1	Van Cauteren *et al.* (2017)	>1000
	Salmonella spp., non-typhoidal	280	>100	Van Cauteren *et al.* (2017)	10–99
	Shigella spp.	5.2	1-10	Van Cauteren *et al.* (2017)	10–99
	Staphylococcus aureus	110	>100	Van Cauteren *et al.* (2017)	<10
	Vibrio parahaemolyticus	0.008	<0,01	Centre National de Référence des vibrions	<10
	Yersinia enterocolitica	32	10-100	Van Cauteren *et al.* (2017)	10–99
	Histamine	0.3	0,1–1	Déclaration obligatoire	<10
Virus	Norovirus	800	>100	Van Cauteren *et al.* (2017)	<10
	Hepatitis A virus	4.0	1-10	Van Cauteren *et al.* (2017)	100–999

	Hepatitis E virus	3.5	1-10	Centre National de Référence VHE	100–999
Parasites	Anisakis spp.	0.01	0,01–0,1	(Van Cauteren *et al.*, 2018)	<10
	Cryptosporidium spp.	0.2	0,1–1	CNR des Cryptosporidies	<10
	Cyclospora cayetanensis	0.01	0,01–0,1	Réseau Anofel	<10
	Echinococcus multilocularis	0.04	0,01–0,1	(Van Cauteren *et al.*, 2018)	>1000
	Fasciola hepatica	0.008	<0,01	(Van Cauteren *et al.*, 2018)	10–99
	Giardia spp.	0.7	0,1–1	Réseau Anofel	<10
	Taenia saginata	51	10-100	Van Cauteren *et al.* (2017)	<10
	Toxoplasma gondii, congenital	0.5	0,1–1	Van Cauteren *et al.* (2017)	>1000
	Toxoplasma gondii, acquired	18	10-100	Van Cauteren *et al.* (2017)	10–99
	Trichinella spp.	0.02	0.01–0.1	Déclaration obligatoire	10–99

3.4.2.2 De l'incidence vers le fardeau

L'incidence de la maladie n'est que l'un des critères de comparaison des dangers biologiques, la sévérité est également à prendre en compte. En France (Anses, 2015) ainsi qu'au niveau international (Kirk *et al.*, 2015 ; Mangen *et al.*, 2010), le critère retenu pour l'évaluation de la sévérité des maladies est le DALY (Disability Adjusted Life Years-Années de vie ajustées sur l'incapacité). Le DALY correspond à la somme des années de vie potentielles perdues en raison d'une mortalité prématurée et/ou des années de vie productives perdues en raison d'incapacités. Le DALY moyen pour un malade dépend de la mortalité associée à la maladie et de la gravité de cette maladie qui dépend des profils des malades en termes d'âges, de sexe et des symptômes/syndromes observés.

Il n'existe pas de données de DALY spécifiquement estimées pour la France. L'Anses a proposé un niveau de gravité pour les 26 principaux agents pathogènes ou dangers d'origine alimentaire (y compris l'histamine et la différenciation des formes congénitale et acquise de la toxoplasmose) sur la base d'estimation réalisée en Europe (Kirk *et al.*, 2015 ; Mangen *et al.*, 2010). Ces valeurs sont présentées dans le tableau 3-2. Comme pour l'incidence, l'utilisation de catégories générales pour la notation prend indirectement en compte les incertitudes de données concernant la gravité.

La combinaison de l'incidence et de la gravité permet d'obtenir le fardeau global en France des différentes maladies d'origine alimentaire. Environ 60% du fardeau est attribué à Campylobacter spp. et Salmonella spp. L'importance de ces deux agents pathogènes a également été observée par Hoffmann *et al.* (2012) qui ont estimé qu'environ 50% du fardeau aux États-Unis était dû à ces deux bactéries. Kirk *et al.* (2015) ont également estimé que la salmonellose et la campylobactériose représentaient environ 50% des DALY au niveau européen.

3.4.2.3 Part des denrées d'origine animale dans le fardeau sanitaire associé aux dangers biologiques

Pour chaque agent pathogène d'origine alimentaire, les principaux aliments considérés comme des voies d'exposition significatives ont été identifiés à partir des données de la littérature et de l'avis d'experts (Anses, 2015). Pour chaque danger, il a été considéré que les aliments avaient une contribution équivalente. La fraction attribuable du fardeau sanitaire de chacune des catégories d'aliments a ainsi pu être estimée.

Les viandes sont considérées comme la principale catégorie d'aliments contribuant à l'origine d'environ 60% (IC90, 50% à 69%) du fardeau (tableau 3-4). Parmi eux, la viande de volaille est le principal contributeur. Les produits laitiers, les œufs, les produits crus et les aliments composites sont responsables d'environ 10% du fardeau. Les fruits de mer sont estimés comme des catégories mineures avec moins de 5% du fardeau.

Tableau 3-4. Attribution du fardeau des maladies aux différentes catégories d'aliments.

Catégorie	Part du fardeau sanitaire % (CI90) (a)	Sous-catégorie	Part du fardeau sanitaire % (IC90)	Aliment tel que consommé	Part du fardeau sanitaire % (% (IC90)
Viandes	59 (50-69)	Boeuf	8 (4-20)	Viande de bœuf hachée à cuire	4 (2-13)
				Viande de bœuf hachée crue	4 (2-13)
				Viande de bœuf	0.3
		Volaille	35 (34-44)	Volailles	35 (34-44)
		Porc	11 (9-21)	Viande de porc	7 (5-16)
				Foie de porc et de sanglier	3
				Porc en plein air, sanglier	0.003
				Charcuterie	2 (0-3)
				Conserves de viandes et salaison familiales	0.01 (0-0.03)
		Autres viandes	3 (1-5)	Agneau, viande de cheval	3 (1-5)
Lait et fromages	11 (5-22)	Lait non pasteurisé	1 (0-2)	Lait thermisé	1 (0-2)
				Lait cru	1 (0-2)
		Fromages au lait cru	9 (4-21)	Fromage frais	0.01 (0-0.03)
				Pâte pressée non cuite	4 (2-12)
				Pâte molle	6 (2-15)
		Fromages au lait pasteurisé	0.5 (0.2-1.6)	Pâte molle	0.5 (0.2-1.6)
Œufs	7 (3-19)	_	_	Œufs	4 (2-13)
				Produits à base d'œufs crus	4 (2-13)
Produits de la mer	3 (1-6)	Poisson	0.5 (0.2-1.6)	Poisson cuit	0.0002 (0-0.0003)
				Poisson cru	0.0002 (0-0.0003)
				Poisson fumé	0.5 (0.2-1.6)
				Poisson à forte concentration en histidine	0.003
		Coquillages et crustacés	3 (1-5)	Crustacés	0.5 (0.2-1.6)
				Mollusques bivalves cuits	1 (0-3)
				Mollusques bivalves crus	1 (0-3)
Végétaux crus	11 (6-20)	_	_	Produits crus surgelés (fruits rouges, légumes)	1 (0-3)
				Produits crus non congelés	9 (5-18)
				Produits crus sauvages (cresson, pissenlit)	0.0003
				Fruits rouges	0.3
Plats prêts à consommer ou plats préparés	10 (8-12)	Plats cuisinés conserves au froid	2 (0-3)	Toutes sortes d'emballages	2 (0-3)
				Emballé sous vide	0.01 (0-0.02)
		Faits maison	5 (3-6)	En particulier ceux contenant des ingrédients céréaliers (pâtes, riz, semoule) ou déshydratés	2 (0-3)
				En particulier de la viande cuite dans une sauce	3

Aliments composites	3 (1-5)	Plats préparés, gâteaux, aliments à manipulation extensive (sandwichs)	3 (1-5)
		Conserves maison	0.01 (0-0.03)

(a) IC90 : intervalle de crédibilité à 90 %

3.4.2.4 Limites de l'approche utilisée

L'élicitation de dire d'experts a été utilisée pour identifier les principales voies d'exposition menant à une maladie d'origine alimentaire, car d'autres données n'étaient pas disponibles. Les estimations sont ainsi sensibles au jugement des experts. Les résultats d'autres études sur l'attribution des sources de denrées alimentaires ne sont pas entièrement comparables en raison des différences de couverture géographique, de méthodes et de classification des aliments (Hoffmann *et al.*, 2017).

3.4.3 Conclusion de la partie sanitaire pour les dangers biologiques

Pour les deux méthodes décrites, la part attribuable aux produits d'origine animale dans les maladies d'origine alimentaire reste importante. Il est encore difficile d'estimer la part relative de chaque filière animale du fait du manque de connaissances sur l'origine des souches observées chez les patients. Les avancées récentes associées au séquençage des souches humaines et alimentaires laissent envisager une amélioration d'attribution de la part relative de chacune des filières (Thepault *et al.*, 2017).

En outre les données présentées sont le reflet actuel des modes de production (tels que décrits dans le chapitre 2) et des pratiques de consommation. L'amélioration de ces dernières (cuisson adaptée des viandes, application de meilleures pratiques d'hygiène dans la cuisine, respect de la chaîne du chaud et du froid) est susceptible de réduire de 70% le fardeau sanitaire (sans changement de la qualité microbiologique des produits délivrés aux consommateurs) (Anses, 2014 ; 2015).

En outre la réduction possible à l'avenir de la consommation des produits à base de viande ne permet pas d'envisager mécaniquement une baisse du nombre de maladies dues aux dangers biologiques. L'augmentation de la consommation de produits végétaux laisse peut-être envisager une réduction du fardeau pour les dangers fortement associés aux réservoirs animaux (comme *Salmonella* ou *E. coli*) mais également une augmentation potentielle de la part des dangers ubiquistes dans l'environnement (*L. monocytogenes* et *Bacillus cereus*, par exemple).

3.5. L'Epidémiologie nutritionnelle pour étudier la relation entre consommation et santé

3.5.1 Niveau de preuve et indicateurs

L'épidémiologie est réalisée par enquête et englobe 3 types d'études : descriptive, étiologique et évaluative. Il est également possible de caractériser ces types d'enquêtes par le schéma expérimental. Ainsi, on distingue les études d'intervention, les enquêtes transversales et les études prospectives ou rétrospectives.

Les études étiologiques qui nous intéressent ici ont pour objectif de rechercher les causes et les facteurs de risques des maladies. Ces approches reposent sur des études cas-témoins ou sur des études de cohorte. Selon la temporalité entre la mesure de l'exposition et l'identification des maladies on distingue les études prospectives ou rétrospectives. Le niveau de preuve des études prospectives est considéré supérieur à celui des études rétrospectives car elles sont exemptes de biais d'anamnèse (les malades relatent l'exposition différemment des non malades).

Ces différents types d'études conduisent à des niveaux de preuve différents, les études prospectives de cohorte représentant le schéma d'étude avec le niveau de preuve le plus élevé (Mann, 2003). Il existe aussi, avec un niveau de preuve encore plus élevé, les essais randomisés contrôlés ayant pour objectif de comparer un groupe spécifique à un groupe contrôle (**voir figure 3-1**).

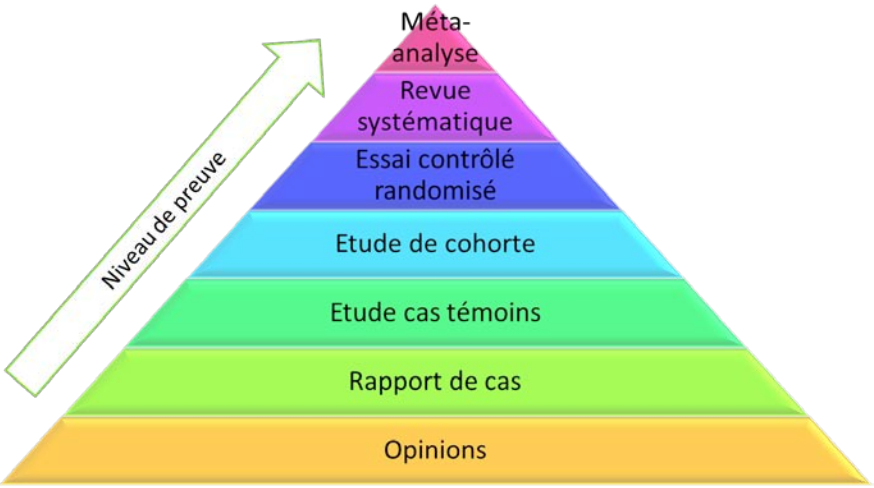


Figure 3-1. Représentation schématique des types d'enquêtes et du niveau de preuve

Si les essais randomisés contrôlés sont largement mis en œuvre en clinique et en thérapeutique pour identifier par exemple la supériorité d'un traitement, ces études sont difficilement réalisables lorsqu'il s'agit d'évaluer les associations relatives au comportement alimentaire.

Dans les études de cohorte, le sur-risque évalué par le **hasard ratio** (HR) permet d'approcher le **risque relatif** (RR). Il est souvent donné par comparaison de groupes de consommateurs (par exemple, petits consommateurs versus grands consommateurs) ou pour une augmentation de consommation (incrément) en grammes par jour ou en portions par semaine. Le HR (ou RR) s'interprète par rapport à la valeur 1. Un HR > 1 correspond à une augmentation du risque alors qu'un HR < 1 traduit une diminution du risque. En raison des contraintes méthodologiques sus mentionnées, les indicateurs d'association sont toujours présentés avec un intervalle de confiance, la plupart du temps à 95% afin d'approcher l'incertitude. Si l'intervalle de confiance ne contient pas 1 l'association est alors statistiquement (au seuil de 5%) significative. Il est important de noter que les biais n'invalident pas pour autant les résultats de ces études puisque les épidémiologistes mettent en œuvre des méthodes notamment analytiques qui permettent de corriger en partie ces biais. En particulier, les biais de confusion fréquents dans le champ de la nutrition sont liés au fait que des consommations alimentaires sont corrélés à d'autres facteurs (alimentaires ou non), eux-mêmes étant liés à la pathologie étudiée. L'ajustement est une technique d'analyse statistique visant à maîtriser l'effet d'un ou plusieurs facteurs de confusion dans la relation entre un facteur de risque ou de protection et une maladie, dans les études. Ainsi ces facteurs sont neutralisés, afin de vérifier si le facteur étudié est bien lié lui-même à l'événement de santé. En épidémiologie sont utilisés des modèles qui permettent de maîtriser le rôle des facteurs de confusion.

Encadré définitions :

Risque relatif : rapport de l'incidence dans le groupe soumis à une exposition et de l'incidence dans le groupe non exposé.

L'intervalle de confiance (IC) définit une valeur minimale et une valeur maximale entre lesquelles se situe, pour un risque d'erreur donné, la valeur exacte de l'ensemble de la population. Plus l'échantillon est grand, plus cet intervalle est réduit, et donc l'estimation est précise (Rothman *et al.*, 2008).

Pour conclure qu'un facteur de risque est réellement un facteur causal, il convient de vérifier différents éléments. Les plus connus sont les **critères de Hill** définit en 1965 qui sont repris dans l'ouvrage « Modern Epidemiology » (Rothman *et al.*, 2008) :

- association forte : quantifiée par la mesure d'association (HR)
- relation dose-effet : on parle de gradient biologique, il s'agit d'une relation monotone entre le niveau d'exposition (dose) et le risque
- la cause précède l'effet
- spécificité de l'association : sous tendant une relation causale
- reproductibilité des résultats : réplication dans plusieurs études
- plausibilité biologique : cohérence avec les résultats des études expérimentales (*in vivo* et *in vitro*)
- cohérence biologique : la causalité n'est pas remise en cause par les résultats des études expérimentales
- présence de données expérimentales
- analogie avec d'autres hypothèses

Les résultats des études épidémiologiques constituent des « lignes de preuve » de qualité variable qu'il est possible de caractériser au moyen de systèmes de cotation (système GRADE par exemple). Le consensus scientifique provient de la synthèse quantitative de l'ensemble des lignes de preuves dans le cadre de revues systématiques de la littérature ou de méta-analyses quand le nombre d'études et la comparabilité sont satisfaisants. Les méta-analyses permettent d'estimer une quantification du risque basée sur l'analyse regroupée des différentes lignes de preuve.

C'est à partir de ces méta-analyses que l'on définit le poids des preuves. Un groupe de travail de l'Anses (GT MER) a été constitué afin de fournir un guide de bonne pratique dans l'analyse des lignes de preuves (Martin *et al.*, 2018). Ce travail a donné lieu à un rapport publié en 2017 (Anses et Groupe de travail "Méthodologie des risques", 2017). Ainsi, le GT MER a recensé 25 méthodes d'évaluation du poids des preuves dans des articles scientifiques ou des guides méthodologiques. Une méta-analyse se caractérise par l'hétérogénéité ou l'homogénéité des résultats observés dans les études individuelles incluses. L'hétérogénéité peut être caractérisée de manière qualitative ou quantitative par le test du I^2 mesurant l'inconsistance entre les résultats. Une valeur du $I^2 > 0,5$ reflète une hétérogénéité forte.

Le GT MER propose la définition suivante : **« Le poids des preuves (PDP) est une synthèse formalisée de lignes de preuves, éventuellement de qualités hétérogènes, dans le but de déterminer le niveau de plausibilité d'hypothèses ».**

L'analyse du poids des preuves peut être réalisée au moyen de méthodes quantitatives (probabilistes), initialement proposées par Good (1979) ou qualitatives. Le GT MER définit ainsi la revue systématique (étape préliminaire à la réalisation d'une méta-analyse) :

« *Une revue systématique de la littérature scientifique consiste à assembler, évaluer et synthétiser de manière exhaustive toutes les études pertinentes, parfois contradictoires, qui abordent une question précise. Une revue systématique est basée sur la rédaction d'un protocole détaillé au préalable favorisant la transparence de la démarche et sa reproductibilité »***.**

On distingue également des méthodes avec et sans notation. Aujourd'hui, il existe un grand nombre de méthodes disponibles pour décrire les **Étapes du processus d'évaluation du PDP.** Les méthodes les plus citées sont : AMSTAR (Assessment of Multiple Systematic Reviews), Centre International de Recherche sur le Cancer, GRADE (The Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation), ILSI (International Life Sciences Institute), PRISMA, Cochrane et World Cancer Research Fund.

La méthode définie par le WCRF est typique du domaine de la nutrition et le GT MER recommande l'utilisation des méthodes **qualitatives proposées par le CIRC ou le WCRF** pour la combinaison des lignes de preuves, en incluant explicitement une liste permettant de vérifier la prise en compte des critères de Hill.

Le WCRF a défini cinq niveaux de preuve pour qualifier les relations entre les facteurs nutritionnels (ou alimentaires) et le risque de cancer mais ces critères peuvent s'appliquer à d'autres indicateurs de santé ou de pathologie.

- *Niveau de preuve* **convaincant** (justifiant de donner lieu à des recommandations ; preuves provenant de plusieurs types d'études, au moins deux cohortes indépendantes, faible hétérogénéité dans les méta-analyses, bonne qualité des études épidémiologiques considérées permettant de conclure que le résultat n'est pas dû à des biais de confusion, sélection ou

classement, ou au risque de première espèce, présence d'un gradient dose-réponse plausible, linéaire ou non, forte plausibilité mécanistique)

- *Niveau de preuve* **probable** (au moins deux cohortes indépendantes ou au moins cinq cas-témoins, faible hétérogénéité, bonne qualité des études épidémiologiques, plausibilité mécanistique satisfaisante)
- *Niveau de preuve* **suggéré** (au moins deux cohortes indépendantes ou au moins cinq cas-témoins, hétérogénéité possible, plausibilité mécanistique)
- *Niveau de preuve* **non concluant** (peu d'études disponibles ou effets différents entre les études ou études présentant des lacunes méthodologiques. Des recherches additionnelles sont nécessaires pour conclure)
- *Niveau de preuve* effet **peu probable** (même exigences que pour le niveau de preuve convaincant, mais montrant une absence d'association)

3.5.2 Méthodes en épidémiologie nutritionnelle

L'épidémiologie a pour objectif d'étudier et de quantifier chez l'Homme les liens existants entre des facteurs d'exposition et la santé. Pour cela, des données individuelles sont nécessaires, elles sont collectées par les épidémiologistes dans des études populationnelles saines ou malades.

Les études épidémiologiques permettent ainsi d'identifier (ou non) des associations entre des facteurs d'exposition qui peuvent être délétères ou bénéfiques et d'estimer le risque de survenue d'une pathologie. La force des associations est quantifiée par différentes mesures statistiques, et en particulier le risque relatif qui permet de traduire un sur-risque associé à la présence d'un facteur de risque (et vice-versa).

Dans le cas de l'épidémiologie nutritionnelle, des difficultés spécifiques émergent. Tout d'abord les facteurs alimentaires ou nutritionnels émanent de données auto-rapportées. En effet, en épidémiologie, les données sont collectées au travers d'enquêtes alimentaires qui ont pour objectif de mesurer la consommation alimentaire au niveau individuel. Elle recouvre un ensemble de méthodes permettant d'estimer les consommations sur une période spécifique ou les consommations habituelles et que l'on peut regrouper en 4 catégories ; les questionnaires de fréquence souvent semi-quantitatif, les questionnaires d'histoire alimentaire, les rappels de 24 heures (auto-administrés ou réalisés par un enquêteur) et les carnets alimentaires portant sur une période variant de 3 à 7 jours. Chacune de ces méthodes présentent des spécificités en termes de niveau de précision et période couverte. Par exemple les rappels et les carnets pourront permettre aisément de collecter de l'information précise sur les aliments réellement consommés mais également sur les modes de cuisson, les marques, les labels etc. Cependant les consommations sont estimées sur une fenêtre d'exposition courte pouvant aboutir à une évaluation biaisée de la variabilité intra-individuelle (jour de la semaine, saison, aliments peu consommés).

Quelle que soit la méthode utilisée, des biais sont inhérents aux méthodes d'enquêtes. Lors de la collecte, les biais de mémoire, biais de désirabilité, biais liés à l'estimation des portions et biais de sous-déclaration sont fréquents et peuvent être limités par l'utilisation d'outils préalablement validés. L'informatisation du recueil peut permettre d'améliorer les estimations. Une fois les données relatives à la consommation collectées, l'estimation des apports en nutriments est réalisée au moyen d'une table de composition qui elle-même peut être sujette aux biais que l'on peut limiter en utilisant des données récentes, adaptées à la population étudiée.

Afin de valider les données, c'est-à-dire évaluer l'ampleur de l'erreur liée à l'estimation des apports ou d'obtenir des données objectives lorsque les moyens financiers, logistiques et humains le permettent, l'utilisation de biomarqueurs est possible pour certains indicateurs (apports énergétiques ou certains nutriments). Afin d'améliorer la précision de la mesure de l'exposition, l'utilisation de marqueurs biologiques est recommandée. Toutefois, les biomarqueurs existants concernent majoritairement des nutriments et non des aliments. Par ailleurs une concentration biologique n'est que le reflet d'une consommation en raison des processus métaboliques. De nouvelles technologies telles que la métabolomique et en particulier l'étude du Food Métabolome devrait conduire à l'identification de marqueurs fiables du niveau de consommation (Scalbert *et al.*, 2014).

Par ailleurs, les pathologies étudiées sont souvent multifactorielles ce qui rend difficile, voire impossible, de conclure en termes de causalité car la prise en compte des facteurs de confusion n'est jamais totale. Enfin l'exposition nutritionnelle via l'alimentation est présente tout au long de la vie et peut varier ce qui rend d'autant plus difficile l'interprétation des résultats et la mise en évidence de fenêtres d'exposition majeures. Aussi, on part souvent du postulat que l'alimentation mesurée est le reflet de l'alimentation usuelle (c'est-à-dire sans modification majeure) d'un individu, ce qui est par essence erronée. Une autre difficulté réside dans le fait qu'il n'est pas possible de prouver l'absence de relations car les biais méthodologiques liés aux études épidémiologiques contribuent fortement à ce phénomène même si les méthodes et les modèles utilisés en épidémiologie tentent de pallier ces écueils.

3.5.3 Mortalité

Globalement, la durée de vie moyenne de la population mondiale a augmenté depuis la deuxième guerre mondiale. En 50 ans, l'espérance de vie à la naissance a augmenté de 14 ans pour les deux sexes confondus soit de 58,4 en 1970 à 72,5 ans en 2016. En France métropolitaine, l'espérance de vie à la naissance en 2017 est de 79,5 ans pour les hommes et 85,4 ans pour les femmes. Au cours des 60 dernières années, les hommes comme les femmes ont gagné, tout comme pour la population mondiale, 14 ans d'espérance de vie en moyenne. Cependant, depuis le milieu des années 1990, les gains obtenus par les femmes sont moins rapides que ceux des hommes et l'écart entre les sexes se resserre. Globalement nos choix individuels (tabagisme mais aussi choix nutritionnels) peuvent influencer fortement sur l'espérance de vie et donc la mortalité globale.

En 2013, le nombre de décès dans le monde s'élevait à près de 55 millions avec près de 70% qui étaient causés par des maladies non transmissibles : 33% par une maladie cardiovasculaire, 15% par un cancer. En France, 567 078 décès ont été enregistrés en France en 2013, avec respectivement 163 602 et 142 175 décès dus à un cancer (29%) et aux maladies cardiovasculaires (25%) (Santé publique France, 2017).

Les études épidémiologiques récentes ont permis de proposer définitivement que nos choix nutritionnels peuvent prévenir ou augmenter le risque de mortalité prématurée. Dans ce contexte, les groupes alimentaires pertinents pour l'ESCo sont les produits laitiers, le poisson, les œufs, les viandes de boucherie hors volailles et la charcuterie (viandes transformées au niveau international). En effet, des méta-analyses récentes (Aune *et al.*, 2016 ; Mayhew *et al.*, 2016 ; Wang *et al.*, 2014 ; Zhao *et al.*, 2016) ; ont montré que la consommation de fruits et légumes, de noix et de poisson était associée à un moindre risque de mortalité, alors que la consommation de viandes de boucherie hors volailles et/ou transformées étaient associées à un risque accru. Quelques études plus rares ont intégré les œufs, le lait dans les groupes d'aliments étudiés. Aucune association n'avait été trouvée pour la consommation de viande blanche (Abete *et al.*, 2014).

La méta-analyse de Schwingshackl *et al.* (2017c) a étudié les associations de 12 groupes d'aliments, dont **les œufs, les produits laitiers, les poissons, les viandes de boucherie hors volailles** (incluant bœuf, veau, porc, agneau, mouton, cheval et chèvre) **et transformées** (viandes transformées par salage, salaison, fermentation, fumage ou appertisation). Les viandes transformées contiennent pour beaucoup du porc mais peuvent également contenir d'autres viandes de boucherie dont la volaille, des abats ou du sang. Au niveau national, les viandes transformées incluent quasi exclusivement les charcuteries). Dans cette étude, étaient aussi intégrés les céréales raffinées ou non, les légumes, les fruits, les noix, les légumineuses et les boissons sucrées type soda.

Au global, une consommation optimale des aliments associés à une réduction du risque (céréales complètes, légumes, fruits, noix et poissons) entraîne une diminution de 56% de la mortalité globale, tandis que la consommation des aliments associés à l'augmentation du risque (œufs, viandes de boucherie hors volailles et viandes transformées) est associée à un risque deux fois plus élevé de mortalité globale.

Dans le cadre de cette ESCo, les données les plus solides de cette méta-analyse de 2017 montrent qu'une consommation croissante de **poissons** est associée à une diminution significative du risque de 7% (RR=0,93; IC 95%=0,88-0,98), alors qu'un apport élevé de **viandes de boucherie hors volailles** augmente le risque significativement de 10% (RR=1,10; IC

95%=1,04-1,18) et une consommation plus importante de **viandes transformées,** une augmentation significative du risque de 23% (RR=1,23; IC 95%=1,12-1,36).

Les résultats de cette méta-analyse globale ont été détaillés ci-dessous et comparés avec ceux préalablement publiés sur certains types d'aliments afin d'estimer la cohérence.

***Charcuteries**

Sept études ont été incluses dans la méta-analyse de Schwingshackl *et al.* (2017c) en comparant les consommations les plus faibles aux consommations les plus élevées (fourchette de consommation de 0 à 200 g/j) et une association positive significative a été observée (RR=1,21 ; IC 95%=1,16-1,26 ; I^2=56%). Par incrément de 50 g de viande transformée consommée par jour, une augmentation significative du risque de 23% de la mortalité globale (RR=1,23 ; IC 95%=1,12-1,36 ; I^2=94%) a été observée. Les analyses stratifiées pour la localisation géographique ont montré des associations plus fortes dans les études menées aux États-Unis par rapport à l'Europe.

Précédemment, les méta-analyses de Wang *et al*. (2016), O'Sullivan *et al*. (2013) et Abete *et al*. (2014) avaient aussi étudiées cette association. L'étude de O'Sullivan *et al*. (2013) avait aussi conclu à une association positive significative entre la consommation de viandes transformées et le risque de mortalité globale (RR=1,21 ; IC 95%=1,16-1,28, n=5 études). Dans l'étude de Abete *et al*. (2014), la méta-analyse dose-réponse avait permis d'observer une augmentation significative par incrément de 50 g consommés par jour (RR=1,22 ; IC 95 %=1,16-1,29; I^2=44,4%). Les analyses stratifiées par sexe avaient permis d'observer cette association positive chez les hommes et les femmes. Enfin, plus récemment, l'étude de Wang *et al.* (2016), avec une méta-analyse de 5 études, a mis en évidence qu'en comparaison des faibles ou non consommateurs de viandes transformées, la consommation une fois par jour est associée à une augmentation du risque de 11% (RR=1,11 ; IC 95%=1,07-1,16), deux fois par jour de 19% (RR=1,19 ; IC 95%=1,13-1,24), trois fois par jour de 27% (RR=1,27 ; IC 95%=1,19-1,34) et quatre fois par jour de 35% (RR=1,35 ; IC 95%=1,23-1,46).

***Viandes de boucherie hors volailles**

Douze études ont été incluses dans la méta-analyse de Schwingshackl *et al*. (2017c) en comparant les consommations les plus faibles aux consommations les plus élevées (fourchette de consommation de 0-200 g/j) et une association positive significative a été rapportée avec une augmentation de 10% (RR=1,10 ; IC 95%=1,00-1,22 ; I^2=93%). La consommation de viandes de boucherie hors volailles a été aussi significativement associée à un risque accru de 10% de la mortalité globale par incrément de 100 g consommé par jour (RR=1,10 ; IC 95%=1,04-1,18 ; I^2=92% ; n=10 études). Cette association positive a persisté lors de l'analyse stratifiée par sexe ou par localisation géographique.

Précédemment, les méta-analyses de Wang *et al.* (2016), O'Sullivan *et al*. (2013) et Abete *et al.* (2014) avaient aussi étudiées cette association. L'étude de O'Sullivan *et al*. (2013) a aussi rapporté une association positive significative entre la consommation de viandes de boucherie hors volailles et le risque de mortalité globale (RR = 1,17 ; IC 95%=1,08-1,27). Dans l'étude de Abete *et al.* (2014), la méta-analyse comparant les niveaux de consommation les plus élevés aux plus bas a mis en évidence une association positive significative (RR=1,14 ; IC 95%=1,01-1,29) mais seulement si l'étude initiale conduite en Asie en 1999 par Whiteman *et al*. (1999) n'était pas intégrée dans la méta-analyse. Enfin, dans la méta-analyse de 5 études conduite par Wang *et al*. (2016), la consommation de viandes de boucherie hors volailles n'est pas associée à une augmentation significative de risque de mortalité globale (RR=1,05 ; IC 95%=0,93-1,19), sauf pour les études conduites sur la population d'Amérique du nord (3 études) ou le risque est significativement augmenté de 15% (RR=1,15 ; IC 95%=1,12-1,19).

***Poissons**

Trente-neuf études ont été incluses dans la méta-analyse de Schwingshackl *et al*. (2017c) en comparant les consommations les plus faibles aux consommations les plus élevées (plage d'ingestion totale : 0-225 g consommé par jour). Une association inverse significative a été observée entre le risque de mortalité globale et les niveaux de consommation les plus hauts en comparaison des plus faibles (RR=0,95 ; IC 95%=0,92-0,98 ; I^2=51%) et dans l'analyse dose-réponse avec un incrément de 100 g consommés par jour (RR=0,93 ; IC 95%=0,88-0,9;8 ; I^2=53% ; n=19 études).

Par contre, aucune association significative n'avait été observée pour les études menées en Europe. En 2016, la méta-analyse conduite par Zhao *et al. (2016)* a mis en évidence que comparativement à la consommation la plus faible, la consommation la plus élevée de poissons était associé à un risque significativement réduit de mortalité globale de 6% (RR=0,94 ; IC 95%=0,90-0,98 ; I^2=39,1%). Comparativement aux personnes n'ayant jamais consommé, la consommation de 60 g de poisson par jour était associée à une réduction significative de 12% (RR=0,88 ; IC 95%=0,83-0,93) du risque de mortalité globale. De la même manière, Wan *et al.* (2017) ont mis en évidence dans une méta-analyse de 22 études de cohorte que la consommation de poisson était associée à une diminution du risque de mortalité globale de 6% (RR=0,94 ; IC 95%=0,90-0,98 ; I^2=50,2% ; comparaison des plus fortes consommations aux plus faibles).

***Produits laitiers, laits, fromages et beurre**

Vingt-sept études ont été incluses dans la méta-analyse de Schwingshackl *et al*. (2017c) en comparant les consommations les plus faibles aux consommations les plus élevées (plage d'ingestion totale : 0 à 1 041 g consommés par jour). Aucune association significative n'a été obervée avec l'apport élevé en comparaison de l'apport faible (RR=1,03 ; IC 95%=0,98-1,07 ; I^2=94%). De la même manière, aucune association n'a été notée par incrément de consommation de 200 g de produits laitiers consommés par jour (RR=0,98 ; IC 95%=0,93-1,03 ; I^2=96%; n=16 études).

La même année, les travaux de Guo *et al.* (2017) et Tong *et al*. (2017) se sont intéressés à l'association avec respectivement la consommation de produits laitiers, lait et la consommation de fromages.

Au total, 29 études ont été intégrées dans la méta-analyse de Guo *et al.* (2017). Aucune association n'a été trouvée avec la mortalité globale pour les produits laitiers totaux (qu'ils soient riches ou pauvres en matières grasses) ou le lait. A l'inverse, des associations négatives ont été observées entre les produits laitiers fermentés totaux (produits laitiers acides, fromage ou yogourt inclus ; pour 20 g consommés par jour) et la mortalité globale (RR=0,98 ; IC 95%=0,97-0,99 ; I^2=94,4%). Toutefois, il est important de noter que ces associations légèrement négatives avec les produits laitiers et fromages fermentés ont été atténuées dans les analyses de sensibilité en supprimant une grande étude suédoise. Dans l'étude de Tong *et al.* (2017), le risque-relatif de l'association entre la mortalité globale et la consommation de fromage la plus élevée en comparaison de la plus faible était de 1,02 (IC 95%=0,97-1,06) démontrant dans cette étude aussi une absence d'association. Cette association ne différait pas significativement selon le lieu d'étude, le sexe, l'âge. Il n'y avait pas non plus de relation dose-réponse (par incrément de 43 g consommés par jour) entre la consommation de fromages et le risque de mortalité globale (RR=1,03 ; IC 95%=0,99-1,07).

Dans le même sens en 2013, O'Sullivan *et al. (2013)* n'avaient noté aucune association entre produits laitiers totaux et risque de mortalité globale. Dans cette étude, l'association avec la consommation de lait, fromages et beurre avait été étudiée sans, là aussi, rapporter d'association significative.

De plus en 2011, la méta-analyse de Soedamah *et al. (2011)* n'avait rapporté aucune association significative entre la consommation de lait par incrément de 200 ml consommés par jour et le risque de mortalité globale (RR=0,99 ; IC 95%=0,95-1,03 ; n=8 études).

Enfin, dans la méta-analyse de Pimpin *et al*. (2016), chaque portion quotidienne de beurre (14 g/j) était associée à un risque de mortalité significativement augmenté de 1% (RR=1,01 ; IC 95%=1,0003-1,0266 ; 2 études).

***Œufs**

Huit études ont été incluses dans la méta-analyse de Schwingshackl *et al*. (2017c) en comparant les consommations les plus élevées aux plus faibles (fourchette globale de consommation de 4 à 68 g/j). Une association positive limite de la significativité a été observée pour la consommation la plus élevée (RR=1,06 ; IC 95%=1,00-1,12) avec une forte hétérogénéité rapportée (I^2=71%). De plus, pour chaque supplément quotidien de 50 g consommés, une augmentation non significative du risque a été rapportée (RR=1,15 ; IC 95%=0,99-1,34) avec là aussi une forte hétérogénéité (I^2=87%). Plus récemment, la méta-analyse conduite par Xu *et al.* (2019) a observé que l'association positive avec la consommation de 7 ou plus œufs par semaine n'était pas significative (RR=1,09 ; IC 95%=0,997-1,200).

***Substitution entre produits animaux**

Lorsque l'impact de la consommation d'une catégorie de produits animaux a été identifié comme associée à un risque, plusieurs études ont évalué si la substitution de la consommation de cette catégorie par une autre pouvait être efficace pour limiter ce risque.

Les travaux emblématiques de ces approches concernent les études menées par Thomsen *et al.* (2019; 2018) sur la substitution de la consommation de viandes de boucherie, hors volailles et charcuteries, par la consommation de poisson dans la population adulte danoise. Pour conduire ces travaux, les auteurs ont utilisé les années de vie corrigées de l'incapacité (DALY pour Disability-Adjusted Life Year). Cette évaluation permet de mesurer le nombre des années de vie perdues du fait d'une mortalité prématurée mais aussi celles qui le sont du fait des années vécues sans être en pleine santé. Plus que le seul suivi de la mortalité, ce marqueur utilisé par l'OMS (Salomon, 2010) permet d'évaluer la charge globale de morbidité.

Dans l'étude de 2018, Thomsen *et al.* (2018) ont rapporté un gain associé à la substitution par le poisson. En effet, environ 150 DALY pour 100 000 personnes pourraient être évités chaque année si les adultes danois consommaient 350 g de poisson par semaine (gras ou mélange de gras et de maigre) tout en diminuant la consommation de viande rouge et transformée. Toutefois, un impact bénéfique moindre a été noté lorsque la consommation de poisson était limitée aux poissons maigres (80 DALYs/100 000 personnes évités) mais surtout un effet négatif de la substitution est rapporté si la substitution de la viande de boucherie hors volailles et charcuterie, est limitée au thon (perte de 180 DALYs/100 000 personnes). Pour expliquer cet effet négatif associé à la substitution par le thon, les auteurs proposent les effets toxiques et neurotoxiques de la contamination au méthylmercure (World Health Organization, 2008). En effet les poissons carnassiers en fin de chaine alimentaire et particulièrement le thon sont les plus contaminés.

Dans l'étude de 2019, Thomsen *et al. (2019).* ont confirmé l'effet protecteur de la substitution par le poisson en rapportant un gain de 134 DALY (IC 95% : 102-169) par 100 000 personnes chaque année. De plus, ils ont identifié que l'impact sur la santé variait considérablement selon l'âge et le sexe, le plus grand avantage pour la santé de la substitution étant observé chez les jeunes femmes en âge de procréer et chez les personnes âgées, principalement les hommes.

Mécanismes impliqués dans les associations avec la mortalité globale

Au cours des 30 dernières années, l'identification des facteurs liés au mode de vie influençant positivement ou négativement le risque de mortalité est une avancée importante du point de vue de la santé publique. En effet, les études qui ont traduit ces réductions/augmentations du risque en espérance de vie ont estimé que les populations à profil de risque faible (non-fumeur, activité physique régulière, régime alimentaire sain) pourraient présenter une espérance de vie supérieure de 10 à 15 ans de celles avec un profil à risque élevé (O'Doherty *et al.*, 2016). Toutefois, les mécanismes biologiques sous-jacents sont souvent mal identifiés, car reposant sur le principe que un/des composant(s) de ces groupes d'aliments dont les aliments d'origine animale ont une action sur le risque de une ou plusieurs maladies (maladie cardiovasculaire, diabète, cancer …).

***Viandes de boucherie hors volailles et viandes transformées et œufs**

L'association positive avec les viandes de boucherie, hors volailles, et les viandes transformées pourraient être fondée sur des effets pro-inflammatoires, pro-oxydants ou cancérogènes associés aux nitrosamines et autres composés néoformés tels que les composés N-nitrosés et amines hétérocycliques, au fer total et fer héminique ou aux acides gras saturés (Wang *et al.*, 2016). L'association positive limite de la significativité associée à la consommation d'œufs est souvent expliquée par l'impact de cette consommation sur l'homéostasie du cholestérol (Kuang *et al.*, 2018).

***Poisson et produits laitiers fermentés**

L'association négative avec la consommation de poisson est le plus souvent liée à leur richesse en acides gras polyinsaturés oméga 3 (effet anti-inflammatoire, limitation de la carcinogenèse, restauration du ratio oméga 6 / oméga 3 dans les pays occidentaux …) (Lee *et al.*, 2017). Pour les produits laitiers fermentés, la modeste association négative avec les produits fermentés est souvent expliquée par la richesse en calcium et en bactéries produisant des acides gras à chaînes courtes comme le butyrate (Veiga *et al.*, 2014).

3.5.4 Cancer

En 2012, le nombre de nouveaux cas de cancers en France métropolitaine était de 355 000 (200 000 chez l'homme et 155 000 chez la femme). Chez l'homme, le cancer de la prostate est le cancer le plus fréquent (56 800 nouveaux cas par an) devant le cancer du poumon (28 200 nouveaux cas) et le cancer colorectal (23 200 nouveaux cas). Chez la femme, le cancer du sein est le cancer le plus fréquent (48 800 nouveaux cas par an), devant le cancer colorectal (18 900 nouveaux cas) et le cancer du poumon (11 300 nouveaux cas).

Les cancers sont des maladies multifactorielles : de multiples causes (on parle de facteurs de risque) peuvent être à l'origine de l'apparition et du développement d'un cancer. On dissocie généralement les facteurs de risque en deux groupes : **les facteurs évitables** et **les facteurs non évitables**. Les premiers sont des éléments relatifs à notre comportement ou nos habitudes de vie : le tabac, le soleil et l'équilibre alimentaire entre autres. Les facteurs non évitables sont quant à eux liés à notre âge, notre sexe, notre patrimoine génétique.

Le passage d'une cellule normale à une cellule cancéreuse est un processus long et complexe, au cours duquel ces facteurs interviennent et engendrent des modifications génétiques et des perturbations du fonctionnement des cellules. Ces mutations peuvent être liées à une prédisposition génétique (les facteurs de risque non évitables) ou provoquées ou favorisées par des « agressions externes » provenant de l'environnement, c'est à dire les facteurs de risques évitables : rayons solaires, radon, diesel mais aussi expositions sur le lieu de travail (rayons ionisants, amiante...) ou les habitudes et conditions de vie (tabac, nos choix nutritionnels...).

La part des cancers liés à la transmission d'une mutation génétique prédisposant au cancer est estimée à moins de 10%. Celle qui résulte d'interactions gène/environnement (polymorphismes génétiques/ensemble des facteurs auxquels l'organisme est exposé) est bien supérieure. On estime en effet que 40% des cancers et 35% des décès par cancer résulteraient de l'exposition à ces facteurs de risque évitables, liés à nos modes de vie et à nos comportements (CIRC, 2018). À la fois source de facteurs de risques et de facteurs protecteurs, la nutrition qui englobe les produits animaux, fait partie des facteurs comportementaux sur lesquels il est possible d'agir dans le cadre de la prévention des cancers.

Sur les 346 000 nouveaux cas de cancer diagnostiqués chez les adultes de plus de 30 ans en France en 2015, 142 000 sont attribuables à 13 facteurs de risques étudiés par le CIRC, soit plus de 40% des nouveaux cas de cancer (CIRC, 2018). Si le tabac arrive en tête avec 20% des cancers attribuables, 18 800 nouveaux cas de cancer (10 900 chez les hommes et 7 900 chez les femmes) étaient attribuables **à une alimentation sous-optimale**, soit 5,4% de l'ensemble des cas de cancer diagnostiqués (5,7% chez les hommes et 5,1% chez les femmes). Dans cette étude, les groupes alimentaires pertinents pour l'ESCo sont les produits laitiers, les viandes de boucherie hors volailles et la charcuterie. L'alimentation sous-optimale a été définie à partir des recommandations alimentaires du WCRF et du Haut Conseil de santé publique (HCSP). Le WCRF recommande de consommer au plus 350 à 500 g de viandes de boucherie hors volailles par semaine et de réduire à zéro la consommation de viandes transformées (CIRC, 2018). Au niveau international il est fait référence aux viandes transformées qui englobent les charcuteries consommées au niveau national. Concernant les produits laitiers, le Haut Conseil de la santé publique (HCSP) recommande d'en consommer deux portions par jour (soit 150 ml de lait, 30 g de fromage ou 125 g de yaourt) (Haut conseil de la santé publique, 2017).

Dans cette étude, 2,2% des cancers colorectaux ont été attribués à une faible consommation de produits laitiers (1,9% chez les hommes et 2,4% chez les femmes). De la même manière 4,3% des cas de cancers colorectaux et 2,9% des cas de cancer du pancréas ont été attribués à une consommation importante de viandes de boucherie hors volailles. Enfin, 10,7% des cancers de l'estomac et 9,8% des cas de cancer du côlon ont été attribués à une consommation importante de charcuteries.

Précédemment, plusieurs méta-analyses récentes de qualité avaient été conduites par le WCRF dont le bilan qui porte sur 8 groupes alimentaires et le risque de cancer est paru en 2018 (WCRF *et al.*, 2018b). Les méta-analyses conduites par le WCRF en l'appui de l'Impérial collège de Londres font référence pour les associations entre l'alimentation, l'activité physique et le risque de cancers avec la rédaction de rapports réguliers depuis 1997 et la mise en place du « Continuous Update Project (CUP) » qui a permis des mises à jour régulières. Les articles parus jusqu'en 2017 ont été considérés pour les méta-analyses relevant du périmètre de l'ESCo avec les groupes alimentaires suivant : les produits laitiers, le poisson, les viandes de boucherie hors volailles, les charcuteries et les œufs.

Les résultats de ces méta-analyses par type de produits animaux ont été les suivants : au global, une faible consommation de produits laitiers, ainsi qu'une consommation élevée de viandes de boucherie hors volailles et de viandes transformées ont été associées à une augmentation du risque de cancer colorectal, du nasopharynx, de l'œsophage, du pancréas, du poumon, de l'estomac, de la prostate et du sein avec des niveaux de preuve différents. Dans ces études, le terme de viandes de boucherie hors volailles fait référence aux muscles de mammifères incluant bœuf, veau, porc, agneau, mouton, cheval et chèvre. Le terme de viandes transformées renvoie aux viandes qui ont été transformées par des procédés de salage, de salaison, de fermentation ou fumage pour améliorer le goût ou la conservation. Les viandes transformées contiennent pour beaucoup du porc mais peuvent également contenir d'autres viandes de boucherie hors volailles, de la volaille, des abats ou du sang. Au niveau international les viandes transformées incluent aussi les viandes appertisées alors qu'au niveau national, les viandes transformées incluent quasi exclusivement les charcuteries.

-<u>Les conclusions les plus fortes avec les niveaux de preuve convaincant ou probable</u> ont été observées pour les associations entre la consommation de **viandes transformées** et l'augmentation du risque de cancer colorectal avec un niveau de preuve convaincant ; la consommation de **viandes de boucherie hors volailles** et l'augmentation du risque de cancer colorectal avec un niveau de preuve probable et enfin la consommation de **produits laitiers** et une diminution du risque de cancer colorectal avec un niveau de preuve probable (*cf.* ci-dessous pour plus de détails).

-<u>Avec un niveau de preuve moins important (niveau de preuve dit limité-suggéré)</u>, la consommation de **poisson** est associée à une baisse du risque des cancers du foie (RR=0,94 ; IC 95%=0,89-0,99 par 20 g consommés par jour) et colorectal (RR=0,89 ; IC 95%=0,80-0,99 par 100 g consommés par jour). De la même manière, la consommation de produits **laitiers** est associée à une diminution du risque de cancer du sein en post-ménopause (RR=0,95 ; IC 95%=0,92-0,99 par 200 g consommés par jour). Avec ce même niveau de preuve, la consommation de **viandes de boucherie hors volailles** est

associée à une augmentation du risque des cancers du nasopharynx (RR=1,35 ; IC 95%=1,21-1,51 pour 100 g consommés par semaine versus 0 g), du poumon (RR=1,22 ; IC 95%=1,02-1,46 par 100 g consommés par jour) et du pancréas (RR=1,19 ; IC 95%=0,98-1,45 par 100 g consommés par jour) et la consommation de **viandes transformées** est associée à une augmentation du risque des cancers du nasopharynx (RR=1,46 ; IC 95%=1,31-1,64 pour 30 g consommés par semaine versus 0 g), œsophage (carcinome des cellules squameuses ; RR=1,34 ; IC 95%=1,00-1,81 par 50 g consommés par jour), poumon (RR=1,14 ; IC 95%=1,05-1,24 par 50 g consommés par jour), estomac (non-cardia ; RR=1,18 ; IC 95%=1,01-1,38 par 50 g consommés par jour) et pancréas (RR=1,17 ; IC 95%=1,01-1,34 par 50 g consommés par jour). De la même manière, la consommation de viandes grillées a été associée à une augmentation du risque de cancer de l'estomac (RR=2,27 ; IC 95%=1,06-4,85) avec un niveau de preuve suggéré. Enfin, la consommation des **produits laitiers** a été associée à une augmentation de risque de cancer de la prostate (RR=1,07 ; IC 95%=1,02-1,12 par 400 g consommés par jour) avec ce même niveau de preuve.

-Autre aliment : les œufs. Une méta-analyse de Tse et Eslick (2014) permis de proposer une association positive entre consommation d'œufs et le risque de cancer du colorectal (RR=1,14 ; IC 95%=1,07-1,22 sans hétérogénéité, pour une consommation supérieure à 3 œufs par semaine). Plus récemment, une méta-analyse dose-réponse de 2017 (Schwingshackl *et al.*, 2017c) n'a pas mis en évidence d'effet de la consommation d'œufs sur le risque de cancer du sein, des ovaires mais observé une augmentation significative du risque de cancer de la prostate (RR=1,47 ; IC 95%=1,01-2,14 mais avec un biais de publication rapporté). Toutefois, le WCRF dans son rapport de 2018 (WCRF *et al.*, 2018b) considérait que les études étaient trop peu nombreuses ou trop inconsistantes pour proposer une conclusion. Les viandes blanches ne sont pas associées à une augmentation du risque de cancer.

-Autres localisations : Endomètre, ovaires, reins et vessies. Globalement les données concernant l'association entre la consommation de viandes de boucherie hors volailles, charcuteries, poissons, lait, produits laitiers et le risque de cancer pour ces différentes localisations sont trop inconsistantes pour permettre de conclure (WCRF *et al.*, 2018b).

Nous reviendrons ci-dessous en détails sur les associations positives ou négatives présentant les niveaux de preuve les plus importants (convaincants et probables).

***Viandes de boucherie hors volailles**

Parmi les 14 études identifiées au moment de la méta-analyse de 2018 (WCRF *et al.*, 2018b), 8 ont été incluses dans une méta-analyse dose-réponse. Une association positive limite de la significativité entre la consommation de viandes de boucherie hors volailles et le risque de cancer colorectal a été observée pour un incrément de 100 g consommé par jour (RR=1,12 ; IC 95%=1,00-1,25). L'hétérogénéité observée était faible (I^2=24%) et aucun biais de publication n'avait été identifié. La stratification par sexe n'a pas montré d'effet chez les hommes ou les femmes, toutefois la stratification géographique a montré une augmentation significative du risque en Europe (RR=1,23 ; IC 95%=1,08-1,41) mais pas en Amérique du nord. En parallèle à cette méta-analyse du WCRF, la méta-analyse dose-réponse de Zhao *et al.* (2017b) de 2017 avec neuf études de cohortes a mis en évidence une augmentation significative du risque de cancer colorectal avec un risque relatif de 1,16 (IC 95%=1,05-1,29) sans hétérogénéité (I^2=0%) par incrément de consommation 100 g/jour. Une augmentation qui a aussi été observée dans une méta-analyse de 2018 conduite à partir de 21 études et qui a mis en évidence une augmentation significative du risque de 12% par 100 g de viandes de boucherie hors volailles consommées par jour (RR=1,12 ; IC 95%=1,06-1,19) (Schwingshackl *et al.*, 2018).

***Viandes transformées**

Dix des treize études identifiées en 2018 avaient été intégrées dans une méta-analyse dose-réponse qui a montré une augmentation du risque de cancer du côlon significative de 16% par 50 g de viandes transformées consommées par jour (RR=1,16 ; IC 95%=1,08-1,26). L'hétérogénéité observé était faible (I^2=20%) et aucun biais de publication n'avait été

identifié. L'analyse stratifiée par sexe n'a pas mis en évidence de différences significatives entre hommes et femmes, à l'inverse la stratification géographique a montré une augmentation significative du risque en Europe (RR=1,13 ; IC 95%=1,03-1,24) mais pas en Amérique du nord ou Asie. En parallèle à cette méta-analyse du WCRF (2018b), la méta-analyse dose-réponse de Zhao *et al*. (2017b) avec huit études de cohorte a mis en évidence une augmentation significative du risque de cancer colorectal avec un risque relatif de 1,22 (IC 95%=1,12-1,33) avec une faible hétérogénéité (I^2=19%) par incrément de consommation 50 g/jour. Augmentation aussi observée dans la méta-analyse de 2018 conduite à partir de 16 études et qui a mis en évidence une augmentation significative du risque de 17% par 50 g de charcuteries consommées par jour (RR=1,17 ; IC 95%=1,10-1,23) (Schwingshackl *et al.*, 2018).

<u>*Produis laitiers, lait et fromages</u>

Dix des 14 études identifiées en 2018 avaient été intégrées dans une méta-analyse dose-réponse qui a montré une diminution du risque de cancer du côlon significative de 13% par 400 g de produits laitiers consommés par jours (RR=0,87 ; IC 95%=0,83-0,90). L'hétérogénéité observée était faible (I^2=18%) et aucun biais de publication n'avait été identifié. L'analyse stratifiée par sexe a permis de montrer une diminution significative chez les hommes (RR=0,84 ; IC 95%=0,80-0,89) et les femmes (RR=0,86 ; IC 95%=0,78-0,96). La stratification géographique a montré une diminution significative du risque en Europe (RR=0,88 ; IC 95%=0,82-0,95) et en Amérique du nord (RR=0,85 ; IC 95%=0,80-0,89). Dans le même sens, une méta-analyse de 2018 conduite à partir de 15 études a mis en évidence une diminution significative du risque de 7% par 200 g de produits laitiers consommés par jour (RR=0,93 ; IC 95%=0,91-0,94), Schwingshackl *et al*. (2018).

Neuf des 13 études identifiées en 2017 avaient été intégrées dans une méta-analyse dose-réponse qui a montré une diminution du risque de cancer du côlon significative de 6% par 200 g de lait consommé par jour (RR=0,94 ; IC 95%=0,92-0,96). L'hétérogénéité observée était nulle (I^2=0%) et aucun biais de publication n'avait été identifié. L'analyse stratifiée par sexe a permis de montrer une diminution significative chez les hommes (RR=0,92 ; IC 95%=0,87-0,98) mais pas chez les femmes (RR=0,96 ; IC 95%=0,89-1,03). La stratification géographique a montré une diminution significative du risque en Europe (RR=0,94 ; IC 95%=0,91-0,96) et en Amérique du nord (RR=0,93 ; IC 95%=0,88-0,99), mais pas en Asie.

Sept des neuf études identifiées en 2017 avaient été intégrées dans une méta-analyse dose-réponse qui n'a pas montré une diminution significative du risque de cancer du côlon significative par 50 g de **fromages** consommés par jour (RR=0,94 ; IC 95%=0,87-1,02). L'hétérogénéité observé était faible (I^2=10%) et aucun biais de publication n'avait été identifié. L'analyse stratifiée par sexe n'a pas permis de montrer une diminution significative chez les hommes comme chez les femmes. La stratification géographique n'a pas montré de diminution significative du risque en Europe comme en Amérique du nord.

Mécanismes impliqués dans les associations présentant les niveaux de preuve les plus importants

<u>*Viandes de boucherie hors volailles, transformées et cancer du côlon</u>

Si les mécanismes expliquant les associations positives entre consommation de viandes de boucherie hors volailles et/ou de viandes transformées et augmentation du risque de cancer du côlon ne sont toujours pas clairement définis, plusieurs hypothèses sont largement retrouvées dans la littérature. L'effet de plusieurs **produits néoformés** pendant la cuisson ou la digestion est largement proposé pour expliquer cette association positive :

les amines hétérocycliques (AHC), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) formés pendant la cuisson à haute température (Sinha *et al.*, 2005 ; Turesky, 2007). Les AHC sont des produits de réaction entre la créatine ou la créatinine, des acides aminés et des sucres provenant des muscles de la viande lorsqu'elle est cuite à haute température. Les plus abondantes sont le PhIP (2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine) et le MeIQx (2- amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline). Les HAP proviennent de la pyrolyse des acides gras de la viande lorsqu'elle est cuite directement au contact d'une flamme, comme lors de la cuisson au barbecue, par exemple. Un des HAP le plus abondant est le BaP (benzo[a]pyrène). Les effets génotoxiques des AHC et HAP sont bien établis chez l'animal et certains de ces produits néoformés se sont révélés cancérogènes pour les rongeurs et les primates dans des études de longue durée et à forte dose. Toutefois il apparaît assez

difficile de conclure car les études épidémiologiques centrées les AHC et les HAP ne sont pas concordantes (Cross *et al.*, 2010 ; Ollberding *et al.*, 2012). Ces différences pourraient s'expliquer par un polymorphisme génétique humain (Doaei *et al.*, 2018 ; Gilsing *et al.*, 2012; Lilla *et al.*, 2006). En ce sens, l'étude de Gilsing *et al.* (2012) montre en effet que le polymorphisme NAT1 (N-acétyl transferase 1) modifierait l'association entre l'apport de MeIQx et le risque d'adénomes colorectaux.

les composés N-nitrosés (NOC). La présence de nitrites peut favoriser deux types de réactions : les réactions de nitrosation et les réactions de nitrosylation aboutissant à la formation de composés N-nitrosés (Kuhnle et Bingham, 2007)). Les réactions de nitrosation correspondent à l'ajout d'ions nitrosonium NO+ sur une amine ou une amide, formant respectivement, des nitrosamines ou des nitrosamides. Les réactions de nitrosylation correspondent à l'ajout d'un ion nitrosyl NO- sur des métaux ou des groupements thiols, menant à la formation de S-nitrosothiols (RSNO), de fer ou fer héminique nitrosylé. Chez l'Homme, les nitrites impliqués dans ces réactions peuvent provenir de l'alimentation (ajout de nitrites ou nitrates pendant la fabrication des viandes transformées) ou du cycle entérosalivaire des nitrates et de la présence de nitrates réductases, portées par les bactéries buccales. La plupart des molécules formées par les réactions de nitrosation et de nitrosylation sont cancérigènes et il a été montré chez des volontaires sains que la consommation de viandes de boucherie hors volailles et de viandes transformées augmentait la formation de composés N-Nitrosés dans les fèces (Bingham *et al.*, 2002; Kuhnle *et al.*, 2007). Il est donc proposé que ces composés puissent être impliqués dans l'initiation et la promotion de la cancérogénèse colorectale.

En parallèle à ces travaux concernant les produits néoformés, le rôle d'un **nutriment** des produits carnés a été aussi mis en avant : *le fer héminique* (Gamage *et al.*, 2018). Une méta-analyse de 2011 a associé positivement la consommation de fer héminique au risque de cancer colorectal (Bastide *et al.*, 2011). Et des études dans des modèles animaux, avec des expositions proches de la consommation humaine, ont démontré un effet promoteur du fer héminique sur la carcinogenèse colorectale (Bastide *et al.*, 2015). Le fer héminique des viandes de boucherie hors volailles et viandes transformées apporté par la myoglobine et hémoglobine des produits carnés agirait par deux voies :

- la peroxydation des lipides produisant des produits terminaux génotoxiques et cytotoxiques : les alcénals, tels que le malondialdéhyde (MDA) ou le 4-hydroxynonénal (4-HNE). Le 4-HNE a été proposé pour participer à l'effet promoteur des produits carnés en lien avec son activité génotoxique et cytotoxique aboutissant à une sélection des cellules prénéoplasiques murines *in vitro* (Baradat *et al.*, 2011).

- ainsi que la nitrosation aboutissant à la production de NOC (Cross *et al.*, 2003) ; *cf.* précédemment et particulièrement de fer héminique nitrosylé.

<u>*Produis laitiers, lait et fromages</u>

Les associations négatives entre produits laitiers et cancer du côlon ont été largement attribuées dans la littérature scientifique à leur richesse en calcium. Deux hypothèses ont été le plus souvent proposées :

Le calcium a la capacité de piéger les acides biliaires secondaires comme l'acide désoxycholique (un sous-produit du métabolisme des graisses) qui est proposée pour favoriser la carcinogenèse colorectale dans les modèles animaux.

En parallèle le calcium est proposé pour agir directement sur l'épithélium colique, inhibant la prolifération des cellules épithéliales et induisant une différenciation cellulaire et une apoptose (mort cellulaire) des cellules tumorales (Pufulete, 2008).

Associés à l'hypothèse impliquant le calcium, la caséine et le lactose du lait sont importants car augmentant la biodisponibilité du calcium.

Enfin, d'autres nutriments du lait et composés bioactifs peuvent expliquer au moins partiellement cette association négative : certains travaux proposent que la lactoferrine, les acides gras à chaîne courte tels que butyrate et propionate puissent conférer un effet protecteur, sans toutefois permettent de conclure définitivement sur l'effet de ces composés.

3.5.6 Maladies cardiovasculaires

Les maladies cardio-vasculaires (MCV) sont la première cause de mortalité dans le monde : chaque année on estime à 17,7 millions le nombre de décès imputables aux maladies cardio-vasculaires, soit 31% de la mortalité mondiale totale. Les MCV constituent un ensemble de pathologies qui touchent le cœur et les vaisseaux sanguins : les maladies coronariennes (MCo), les accidents vasculaires cérébraux (AVC), les artériopathies périphériques dont l'hypertension, les cardiopathies rhumatismales, les malformations cardiaques congénitales, les thromboses veineuses profondes et les embolies pulmonaires (World Health Organization, 2011).

Plus des trois quarts des décès liés aux MCV interviennent dans des pays à revenu faible. En effet, dans beaucoup de pays à revenu élevé, le nombre de décès dus aux MCV a considérablement reculé grâce à des politiques publiques fortes. Toutefois la France, comme les autres pays occidentaux, reste impactée par ce problème de santé publique. En France, 150 000 personnes meurent chaque année à la suite d'une MCV, ce qui représente 400 décès par jour (World Health Organization, 2011 ; 2014).

Des études épidémiologiques ont permis toutefois de proposer qu'il soit possible de prévenir ces pathologies suite à l'identification des facteurs de risque comme le tabagisme, l'obésité, la sédentarité, l'alcool mais aussi notre alimentation. De plus, ces analyses ont permis de proposer que notre alimentation puisse agir aussi sur les facteurs de risque des MCV tels que l'obésité (*cf.* chapitre 5.8) et l'hypertension. Sur ce dernier point, la méta-analyse de Ralston *et al.* (2012) concluait que la consommation totale des produits laitiers (comparaison de la consommation la plus élevée par rapport à la consommation la plus faible) était associée à un risque d'hypertension significativement réduit (RR=0,87 ; IC 95%=0,81-0,94 ; 5 études). Cette diminution était associée à la consommation des produits à faible teneur en matières grasses (RR=0,84 ; IC 95%=0,74-0,95 ; 4 études) mais pas à celle des produits laitiers riches en matières grasses (RR=1,00 ; IC 95%=0,89-1,11 ; 4 études) ou des fromages (RR=1,00 ; IC 95%=0,89-1,12 ; 4 études). La même année, la méta-analyse de Soedamah-Muthu *et al.* (2012) étudia les mêmes associations. La consommation de produits laitiers totaux (9 études : consommation dans ces études de 100 à 700 g/j), produits laitiers à faible teneur en matières grasses (6 études : 100–500 g/j) et lait (7 études; 100–500 g/j) étaient inversement et linéairement associées à un risque plus faible d'hypertension. Les risques relatifs par 200 g consommés par jour étaient de 0,97 (IC 95%=0,95-0,99) pour les produits laitiers totaux, de 0,96 (IC 95%=0,93-0,99) pour les produits laitiers maigres et de 0,96 (IC 95%=0,94-0,98) pour le lait. Les produits laitiers riches en matières grasses (6 études), les produits laitiers fermentés totaux (4 études), le yogourt (5 études) et le fromage (8 études) n'étaient pas significativement associés à une diminution ou augmentation de l'incidence de l'hypertension. La méta-analyse conduite par Yang *et al.* (2016a) étudia l'association avec la consommation de poisson (comparaison des plus faibles aux plus fortes consommations) et concluait que cette consommation n'impactait ni négativement ni positivement le risque d'hypertension. Confirmant les données de Ralston *et al.* (2012), une méta-analyse récente (Schwingshackl *et al.*, 2017b) a montré que la consommation de produits laitiers (200 g/j) était associée significativement à un moindre risque d'hypertension (RR=0,95 ; IC 95%=0,94-0,97), alors que la consommation de viandes de boucherie hors volailles (100 g /j) était associée à une augmentation significative du risque de 14% (RR=1,14 ; IC 95%=1,02-1,28), tout comme celle de viandes transformées (50 g/j ; RR=1,12 ; IC 95%=1,00-1,26). Dans le même sens, les méta-analyses de O'Connor *et al.* (2017) et Richard *et al.* (2017) ont étudié respectivement l'impact de la consommation de viandes de boucherie hors volailles et d'œufs sur des facteurs de risque sanguin des MCV (Cholestérol total, LDL et HDL cholestérol, triglicérides …). Ces études ont montré que la consommation de viandes de boucherie hors volailles (≥ 0,5 portion par jour) ou d'œufs (6 à 12 œufs par semaine) n'impactait pas ces marqueurs sanguins.

Dans le contexte de l'association positive ou négative entre notre alimentation et le risque de MCV, les groupes alimentaires pertinents pour l'ESCo sont **les produits laitiers**, **fromages et laits, le poisson, les œufs, les viandes de boucherie hors volailles et viandes transformées** (viandes traitées par saumurage, salage, ou fumage soit principalement les charcuteries au niveau national). Les résultats des méta-analyses étudiant ces associations ont été détaillés ci-dessous. Parmi ces associations, les plus solides sont observées pour l'augmentation du risque de MCV, AVC et MCo associée à la consommation de charcuteries, pour l'augmentation du risque d'AVC associée à la consommation de viandes de boucherie hors volailles, pour l'augmentation du risque de MCV associée à la consommations d'œufs dans la population atteinte de diabète de type

2, pour la diminution du risque d'AVC et MCo associée à la consommation de poisson et pour la diminution du risque d'AVC associée à la consommation de produits laitiers en particulier maigres.

***Charcuteries**

Charcuteries et MCV : Six études ont été incluses dans la méta-analyse de Abete *et al.* (2014) en comparant les consommations les plus faibles aux consommations les plus élevées et une association positive significative a été observée (RR=1,18 ; IC 95%=1,05-1,32 ; I^2=73%) avec le risque de mortalité par MCV. Par incrément de 50 g de viande transformée consommée par jour, une augmentation significative du risque de 24% de la mortalité par MCV (RR=1,24 ; IC 95%=1,09-1,40 ; I^2=76%) a été observée. Les analyses stratifiées par sexe ont montré des associations plus fortes chez les femmes que chez les hommes. Enfin, plus récemment en 2016, l'étude de Wang *et al.* (2016) avec une méta-analyse de 5 études, a mis en évidence qu'en comparaison des faibles consommations de viandes transformées, les fortes consommations sont associées à une augmentation du risque de mortalité par MCV de 15% (RR=1,15 ; IC 95%=1,07-1,24). L'augmentation du risque est présentée comme presque linéaire par ces auteurs avec l'augmentation de la consommation.

Charcuteries et MCo et AVC : En 2010, l'analyse dose-réponse réalisée par Micha *et al.* (2010) a mis en évidence une augmentation significative du risque de MCo de 42% (RR=1,42 ; IC 95%=1,07–1,89 ; n=6 études) et du risque de diabète de 19% (RR=1,19 ; IC 95%=1,11–1,27 ; n=6 études) par incrément de 50 g de viandes transformées consommées par jour. Par contre, cette analyse dose réponse n'a pas mis en évidence d'association significative entre la consommation de viandes transformées et le risque d'AVC (n=2 études). Toutefois, dans l'étude de Kaluza *et al.* (2012), la méta-analyse de 5 études a mis en évidence une association positive significative entre la consommation de viandes transformées et le risque d'AVC (RR=1,13 ; IC 95%=1,03-1,24 ; par incrément de consommation quotidienne). L'analyse par sous-type d'AVC au travers d'une méta-analyse de 4 études avait permis d'observer une association positive significative avec le risque d'AVC ischémique (RR=1,15 ; IC 95%=1,06-1,24 ; par incrément de consommation quotidienne) mais pas avec le risque d'AVC hémorragique. L'analyse de Chen *et al.* (2013) a rapporté aussi une augmentation significative du risque d'AVC de 14% en comparant les faibles aux forts consommateurs de viandes transformées (RR=1,14 ; IC 95%=1,05–1,25 ; I^2=0% ; n=5 études) avec une augmentation de 19% du risque d'AVC ischémique (RR=1,13 ; IC 95%=1,08–1,31) mais pas d'augmentation du risque d'AVC hémorragique. Cette augmentation du risque d'AVC a été confirmée dans une analyse dose réponse rapportant une augmentation du risque de 11% par 50 g consommés par jour (RR=1,11 ; IC 95%=1,02–1,20 ; n=5 études). En 2016, la méta-analyse conduite par Yang *et al.* (2016b) avait aussi mis en évidence une association positive entre la consommation de viandes transformées (viandes bovines transformées pour cette étude) et le risque d'AVC en comparant les faibles aux forts consommateurs (RR=1,17 ; IC 95%=1,09-1,27 ; I^2=0% ; n=4 études), sans observer d'association positive par sous-type d'AVC (ischémique ou hémorragique). L'analyse dose réponse concluait à une augmentation du risque d'AVC dès un faible niveau de consommation. Plus récemment, l'étude de Kim *et al.* (2017) avait conclu à une association positive significative entre la consommation de viandes transformées (viandes bovines transformées pour cette étude) et l'incidence d'AVC (RR=1,17 ; IC 95%=1,08-1,25 ; I^2=0% ; n=8 études).

***Viandes de boucherie hors volailles**

Viandes de boucherie hors volailles et MCV : Sept études ont été incluses dans la méta-analyse de Abete *et al.* (2014) en comparant les consommations les plus faibles aux consommations les plus élevées ; et une augmentation significative de 16% du risque de mortalité par MCV a été observée (RR=1,16 ; IC 95%=1,03-1,32 ; I^2=82%). Par incrément de 100 g de viandes de boucherie hors volailles consommées par jour, une augmentation significative du risque de 15% de la mortalité par MCV (RR=1,15 ; IC 95%=1,05-1,26 ; I^2=76%) a été observée. Les analyses stratifiées par sexe ont montré des associations plus fortes chez les femmes que chez les hommes. Plus récemment en 2016, l'étude de Wang *et al. (2016)*, avec une méta-analyse de 5 études, a mis en évidence qu'en comparaison des faibles consommations de viandes de boucherie hors volailles, les consommations les plus élevées ne sont pas associées à une augmentation du risque de mortalité par MCV

(RR=1,06 ; IC 95%=0,88-1·28). Pour les seules études américaines (n=3), la méta-analyse dose réponse a montré une association positive avec la mortalité par MCV par incrément de consommation quotidienne (RR=1,19 ; IC 95%=1,13-1,26).

Viandes de boucherie hors volailles et MCo et AVC : En 2010, l'analyse dose-réponse réalisée par Micha *et al.* (2010) n'a pas mis en évidence une augmentation significative du risque de MCo (n=4 études), du risque de diabète (n=5 études) ou de risque d'AVC (n=2 études). Dans l'étude de Kaluza *et al.* (2012), la méta-analyse de 6 études a mis en évidence une association positive significative entre la consommation de viandes de boucherie hors volailles et le risque d'AVC (RR=1,11 ; IC 95%=1,03-1,20 ; par incrément de consommation quotidienne). L'analyse par sous-type d'AVC au travers une méta-analyse de 4 études avait permis d'observer une association positive limite de la significativité avec le risque d'AVC ischémique (RR=1,13 ; IC 95%=1,00-1,27 ; par incrément de consommation quotidienne) et par contre, aucune avec le risque d'AVC hémorragique. L'analyse de Chen *et al. (2013)* a confirmé en 2013 cette association, avec une augmentation significative du risque d'AVC de 9% en comparant les faibles aux forts consommateurs (RR=1,09 ; IC 95%=1,01–1,18 ; I^2=0% ; n=5 études) et avec une augmentation de 13% du risque d'AVC ischémique (RR=1,13 ; IC 95%=1,01–1,25) mais sans augmentation du risque d'AVC hémorragique. Cette augmentation du risque d'AVC a été confirmée dans une analyse dose réponse rapportant une augmentation du risque de 13% par 100 g consommés par jour (RR=1,13 ; IC 95%=1,03–1,23 ; n=5 études). En 2016, la méta-analyse conduite par Yang *et al.* (2016b) avait aussi mis en évidence une association positive entre la consommation de viandes de boucherie hors volailles et le risque d'AVC en comparant les faibles aux forts consommateurs (RR=1,13 ; IC 95%=1,04-1,22 ; I^2=0% ; n=5 études). L'analyse dose réponse concluait à une augmentation du risque d'AVC dès que la consommation était supérieure à 70 g/jour. Dans cette étude, si une association positive significative avec le risque d'AVC ischémique a été rapportée (RR=1,15 ; IC 95%=1,03-1,29 ; I^2=0%), aucune association n'a été observée pour le risque d'AVC hémorragique ou le risque d'infarctus cérébral. Plus récemment, l'étude de Kim *et al.* (2017) avait conclu à une association positive significative entre la consommation de viandes de boucherie hors volailles et l'incidence d'AVC (RR=1,11 ; IC 95%=1,03-1,20 ; I^2=0% ; n=8 études) sans noter toutefois d'association avec le risque de mortalité par AVC.

<u>*Poissons</u>

Quinze études ont été incluses dans la méta-analyse dose réponse de Larsson *et al.* (2011). Une association inverse significative a été observée entre le risque d'AVC et la consommation de poisson avec une réduction de 6% du risque par incrément de trois consommations hebdomadaires (RR=0,94 ; IC 95%=0,89-0,99 ; I^2=25,7 %). L'analyse comparant les plus faibles aux plus fortes consommations confirmait cette association négative avec une diminution du risque de 12% (RR=0,88 ; IC 95%=0,81-0,96). Les analyses dose-réponse par sous-type d'AVC rapportaient une association négative significative avec le risque d'AVC ischémique (RR=0,90 ; IC 95%=0,84–0,97 ; I^2=0% ; n=9 études) et non significative avec le risque d'AVC hémorragique. En 2012, la méta-analyse dose réponse de Zheng *et al. (2012)* a étudié la relation entre la consommation de poisson et le risque de mortalité par MCo, et mis en évidence une diminution du risque de 6% par incrément de 15 g consommés par jour (RR=0,94 ; IC 95%=0,90-0,98 ; I^2=63,1% ; n=17 études). Cette association négative significative a été retrouvée pour une consommation par semaine (RR=0,84 ; IC 95%=0,75-0,95 ; I^2=20,1% ; n=17 études), pour 2 à 4 consommations hebdomadaires (RR=0,79 ; IC 95%=0,67-0,92 ; I^2=56,7% ; n=13 études) et pour une consommation supérieure à 5 fois par semaine même si il faut noter que cette dernière est limite de la significativité (RR=0,83 ; IC 95%=0,68-1,01 ; I^2=0% ; n=5 études). En 2013, Li *et al.* (2013b) ont étudié la relation entre la consommation de poisson et le risque d'arrêt cardiaque. Dans cette analyse regroupant 5 études, si la consommation de 1 à 3 fois par mois n'impactait pas le risque, une consommation hebdomadaire était associée à une diminution significative du risque de 9% (RR=0,91 ; IC 95%=0,84-0,99), une consommation bihebdomadaire à une diminution du risque de 13% (RR=0,87 ; IC 95%=0,81-0,95), et de 14% pour plus de 5 consommations par semaine (RR=0,86 ; IC 95%=0,84-0,99). L'analyse dose réponse a confirmé cette association en mettant en évidence une diminution significative du risque d'arrêt cardiaque de 6% par incrément de 20 g de poisson consommé quotidiennement (RR=0,94 ; IC 95%=0,90-0,97). Dans l'analyse dose-réponse de Leung Yinko *et al.* (2014), chaque portion supplémentaire de 100 g de poisson par semaine était associée à un risque réduit de 5% du syndrome coronarien aigu (RR=0,95 ; IC 95%=0,92-0,97). L'analyse par sous-groupe avait permis de suggérer que la réduction du risque ne différait pas entre les sexes et les catégories d'âge.

***Œufs**

Œufs et MCV : En 2013, dans l'étude de Li *et al.* (2013a), comparée à la catégorie la plus basse, une consommation élevée d'œufs était associée à un risque accru de 19% de MCV (RR=1,19 ; IC 95%=1,02-1,38 ; I^2=54,4% ; n=12 études), qui augmente à 83% chez les personnes diabétiques (RR=1,83 ; IC 95%=1,42-2,37 ; I^2=14,7%, n=6 études). Les analyses stratifiées ne montrent pas de différence entre les sexes, mais une différence géographique avec un effet supérieur dans les pays occidentaux hors USA (RR=2,00 ; IC 95%=1,14-3,51), par rapport aux USA (RR=1,13 ; IC 95%=0,98-1,30). La même année, la méta-analyse de Shin *et al.* (2013) a étudié l'impact de la consommation d'œufs en comparant les plus forts consommateurs (> 1 œuf par jour) aux plus faibles (< 1 œuf par semaine ou jamais), sans mettre en évidence d'association négative ou positive avec le risque de MCV (RR=0,96 ; IC 95%=0,88-1,05). La même année, quatorze études ont été incluses dans la méta-analyse de Li *et al.* (2013a). La comparaison de la consommation d'œufs la plus élevée à la plus faible a mis en évidence une association positive avec l'augmentation du risque de MCV (RR=1,19 ; IC 95%=1,02-1,38 ; n=12 études), augmentation plus forte chez les personnes diabétiques (RR=1,83 ; IC 95%=1,42-2,37 ; n=6 études). L'analyse dose-réponse conduite dans cette étude a montré que pour chaque augmentation de la consommation de 4 œufs par semaine, l'augmentation du risque de MCV dans la population générale est significative (RR=1,06 ; IC 95%=1,03-1,10), augmentation qui est plus forte chez les personnes diabétiques (RR=1,40 ; IC 95%=1,25-1,57). Les analyses stratifiées montrent une différence significative entre les pays occidentaux (RR=2,00 ; IC 95%=1,14-3,51) et les USA ou l'association avec l'augmentation du risque n'est pas significative (RR=1,13 ; IC 95%=0,98-1,30).

Œufs et MCo et AVC : En 2013, 6 études ont été incluses dans la méta-analyse de Rong *et al.* (2013) afin d'évaluer l'effet de la consommation d'œufs sur le risque de MCo et d'AVC. La consommation d'œufs n'a pas été associée à une augmentation ou réduction dose-réponse du risque de MCo ou AVC dans cette étude. Mais une analyse par sous-groupe a permis d'observer une diminution significative du risque d'AVC hémorragique (RR=0,75 ; IC 95%=0,57-0,99) et limite de la significativité pour le risque d'AVC ischémique (RR=0,91 ; IC 95%=0,82-1,01) et une augmentation significative du risque de MCo chez la population diabétique (RR=1,54 ; IC 95%=1,14-2,09, n=2 études). En 2013, la méta-analyse de Shin *et al.* (2013) a étudié l'impact de la consommation d'œufs en comparant les plus forts consommateurs (> 1 œuf par jour) aux plus faibles (<1 œuf par semaine ou jamais). Cette méta-analyse n'a pas observé d'association positive ou négative significative dans la population générale entre la consommation d'œufs et le risque de cardiopathie ischémique (RR=0,97 ; IC 95%=0,86-1,09 ; I^2=12,3%, n=5 études) ou d'AVC (RR=0,93 ; IC 95%=0,81-1,07; I^2=0%, n=5 études). Plus récemment, Alexander *et al.* (2016b) au travers une méta-analyse de 7 études a étudié le lien entre la consommation d'œufs et le risque de MCo et d'AVC. Une diminution significative du risque d'AVC de 12% a été observée dans cette étude en comparant les plus faibles consommateurs avec moins de 2 œufs par semaine aux forts consommateurs avec généralement 1 œuf par jour (RR=0,88 ; IC 95%=0,81-0,97 ; I^2=7,5%). Par contre, aucune relation dose réponse n'a pu clairement être établie et aucune association n'a été observée avec le risque de MCo (RR=0,97 ; IC 95%=0,88-1,07 ; I^2=0%). Toutefois, il faut noter que les conclusions tirées de ces méta-analyses sont pondérées par des articles récents. En 2017, l'analyse des études d'intervention nutritionnelles chez l'Homme (n=10 études) permettait à Richard *et al.* (2017) de proposer que la consommation de 6 à 12 œufs par semaine, dans le contexte d'un régime alimentaire équilibré n'a pas d'effet indésirable sur les facteurs de risque de MCV chez les individus exposés au risque de développement du diabète ou atteints du diabète de type 2. Ces auteurs rapportaient que dans la majorité de ces 10 études, la consommation de 6 à 12 œufs par semaine n'avait pas de répercussion sur les concentrations plasmatiques du cholestérol total et des triglycérides, sur la glycémie à jeun, l'insuline ou la protéine C réactive. Enfin Geiker *et al.* (2018) proposait récemment que les associations de risque trouvées dans les études observationnelles soient susceptibles d'être attribuées à un régime alimentaire accompagnant souvent une consommation élevée d'œufs ou aux autres facteurs de risque chez les personnes consommant beaucoup d'œufs. Ces auteurs concluant que jusqu'à sept œufs par semaine peuvent être consommés en toute sécurité, mais en mettant l'accent sur un mode de vie sain chez les patients atteints de MCV ou diabète de type 2.

***Produits laitiers, laits, fromages et beurre**

Produits laitiers, laits, fromages, beurre et MCV : En 2015, 9 études ont été incluses dans la méta-analyse de Qin *et al.* (2015) afin d'évaluer l'effet de la consommation de produits laitiers sur le risque global de MCV. Une association inverse significative a été identifiée entre la consommation de produits laitiers et le risque global de MCV (RR=0,88, IC 95%=0,81-0,96 ; n=9 études). La méta-analyse d'Alexander *et al.* (2016a) a étudié les associations entre la consommation de produits laitiers totaux, fromages et lait avec le risque de MCV. Cette méta-analyse de 5 études n'a pas mis en évidence d'association négative significative avec la consommation de produits laitiers totaux pour le risque de MCV (RR=0,91 ; IC 95%=0,80-1,04 ; n=4 études). En 2017, la méta-analyse de Gholami *et al.* (2012) a par contre rapporté une association négative significative entre la consommation totale de produits laitiers et le risque de MCV (RR=0,90 ; IC 95%=0,81-0,99).

Concernant la consommation de lait et de fromages, les associations avec le risque de MCV étaient non significatives (respectivement RR=0,94 ; IC 95%=0,86-1,03 et RR=0,89 ; IC 95%=0,78-1,01 ; n=3 études) dans la méta-analyse d'Alexander *et al.* (2016a). Plus récemment, la méta-analyse de 9 études de Wu *et al.* (2017) a étudié la relation entre la consommation de yogourt et le risque de MCV. Comparée à la consommation la plus basse, la consommation de yogourt la plus élevée n'était pas significativement reliée au risque de développement de MCV (RR=1,01 ; IC 95%=0,95-1,08). Enfin, dans la méta-analyse de Pimpin *et al.* (2016), chaque portion quotidienne de beurre (14 g/j) n'était associée à aucune modification significative du risque de MCV (RR=1,00 ; IC 95%=0,98-1,02; n=4 études).

Produits laitiers, laits, fromages, beurre et MCo et AVC : En 2015, 12 études ont été incluses dans la méta-analyse de Qin *et al.* (2015) afin d'évaluer l'effet de la consommation de produits laitiers sur le risque global de MCo et d'AVC. Une association inverse significative a été identifiée entre la consommation de produits laitiers et le risque global d'AVC (RR=0,87 ; IC 95%=0,77-0,99 ; n=12 études). A l'inverse, aucune association n'a été établie entre la consommation de produits laitiers et le risque de coronaropathie (RR=0,94 ; IC 95%=0,82-1,07 ; n=12 études). Le risque d'AVC était significativement réduit par la consommation de produits laitiers maigres (RR=0,93 ; IC 95%=0,88-0,99 ; n=6 études) et de fromages (RR=0,91, IC 95%=0,84-0,98 ; n=4 études) et le risque de MCo était significativement réduite par la consommation de fromage (RR=0,84 ; IC 95%=0,71-1,00 ; n=7 études). La méta-analyse d'Alexander *et al.* (2016a) a étudié les associations entre la consommation de produits laitiers totaux, fromages et lait avec les risques de MCo et AVC. La méta-analyse de 7 études a mis en évidence une association négative significative entre consommation de produits laitiers totaux et risque d'AVC en comparant les plus fortes aux plus faibles consommations (RR=0,91 ; IC 95%=0,83-0,99). Cette association négative significative est retrouvée entre la consommation de calcium des produits laitiers et le risque d'AVC (RR=0,69 ; IC 95%=0,60-0,81 ; n=5 études). L'association négative avec la consommation de produits laitiers totaux n'était par contre pas significative pour le risque de MCo (RR=0,91 ; IC 95%=0,80-1,04 ; n=7 études). En 2017, la méta-analyse de Gholami *et al.* (2017) a étudié les associations entre consommation de produits laitiers et risque de MCo et AVC. Une association inverse a été identifiée entre la consommation totale de produits laitiers et le risque d'AVC (RR=0,88 ; IC 95%=0,82-0,95), alors qu'aucune association n'a été observée entre cette consommation de produits laitiers et le risque de MCo.

Dans la méta-analyse d'Alexander *et al.* (2016a), la consommation de fromages était significativement inversement associée avec le risque de MCo (RR=0,82 ; IC 95%=0,72-0,93 ; n=5 études), association significative lorsque la consommation est supérieure à 1,5 portions par jour (RR=0,86 ; IC 95%=0,79-0,94). La consommation de fromage avait été aussi associée à une diminution significative du risque d'AVC de 13% (RR=0,87 ; IC 95%=0,77-0,99). Très récemment, la méta-analyse de 9 études de Wu *et al.* (2017) a étudié la relation entre la consommation de yogourt et le risque de MCo et AVC. Comparée à la consommation la plus basse, la consommation de yogourt la plus élevée n'était pas significativement reliée à une modification du risque de MCo (RR=1,04 ; IC 95%=0,95-1,15) ou d'AVC (RR=1,02 ; IC 95%=0,92-1,13). Enfin, dans la méta-analyse de Pimpin *et al.* 2016 (2016), chaque portion quotidienne de beurre (14 g/j) n'était associée de manière significative à aucune modification du risque de MCo (RR=0,99 ; IC 95%=0,96-1,03 ; n=3 études) ou d'AVC (RR=1,01 ; IC 95%=0,98-1,03; n=3 études).

Mécanismes impliqués dans les associations présentant les niveaux de preuve les plus importants

<u>*Viandes de boucherie hors volailles, transformées et MCV, MCo et AVC</u>

Les mécanismes sous-jacents au risque accru de MCV associé à une consommation élevée de viandes de boucherie et surtout de charcuteries peuvent être liés au contenu nutritionnel de ces produits carnés. Il a été très fréquemment mis en avant que la richesse de certains produits carnés en graisses saturées en augmentant le taux de cholestérol plasmatique pouvait participer à cette augmentation du risque de MCV. Toutefois des données récentes montrent que la diminution de la consommation de graisses saturées et son remplacement par des AGPI est peu susceptible de réduire les événements de MCV (Hamley, 2017). De plus, la viande rouge est riche en fer hémique, catalysant des réactions d'oxydation pouvant altérer les lipides, protéines et l'ADN, augmentant le risque de cancer, maladies métaboliques, mais aussi cardiovasculaires. Dans ce sens, une étude prospective de 2013 (Kaluza *et al.*, 2013) avait montré que la consommation de fer héminique, en comparant la plus forte (≥ 2,34 mg/j) à la plus faible consommation (< 1,28 mg/j), serait associée à une augmentation du risque d'AVC (RR=1,16 ; IC 95%=1,03 à 1,31) et de MCo (RR=1,15 ; IC 95%=1,00-1,31).

De plus, les viandes transformées sont aussi une source importante de sel. La consommation importante de sel est associée à un risque accru d'hypertension artérielle, un facteur de risque des MCV (Rust et Ekmekcioglu, 2017). Indépendamment de l'augmentation de la pression artérielle, le sel alimentaire est également associé à une augmentation de la masse ventriculaire gauche cardiaque, de l'épaisseur et rigidité artérielles, l'incidence des accidents vasculaires cérébraux et de la gravité de l'insuffisance cardiaque (Meneton *et al.*, 2005).

***Œufs et MCV chez les personnes atteintes de diabète**

La relation mécanistique entre la consommation d'œufs et le risque de MCV, en particulier dans les populations atteintes de diabète, n'est pas bien comprise. Une méta-analyse d'essais randomisés de 2001 (Weggemans *et al.*, 2001), avait toutefois montré que la consommation d'œufs pouvait augmenter le ratio cholestérol total / HDL-cholestérol, affectant ainsi négativement le profil du cholestérol sérique, un facteur de risque pour le développement de l'athérosclérose et de maladies cardiovasculaires. De plus, dans les populations atteintes de diabète, l'insulino-résistance est souvent associée à une dyslipidémie avec une augmentation des triglycérides et diminution du HDL-cholestérol. Par conséquent, il a été proposé que la consommation d'œufs puisse fortement induire des effets défavorables sur les profils lipidiques chez les patients diabétiques en diminuant le taux de HDL-cholestérol, et conduire ainsi à un risque accru de MCV.

***Poisson et AVC et MCo**

Si des études conduites principalement dans des modèles animaux ont permis d'observer que par rapport à d'autres sources de protéines animales, la consommation de poissons va diminuer le taux de triglydérides circulant en postprandiale (Torris *et al.*, 2018), l'effet protecteur de la consommation de poissons sur le risque de MCV est le plus souvent associé à leur richesse en acides gras polyinsaturés (AGPI) de type oméga 3. Les AGPI oméga 3 sont des acides gras essentiels que l'organisme humain ne peut produire et qui sont donc largement retrouvés dans les poissons. L'analyse de la littérature réalisée par Kris-Etherton *et al.* (2002) en 2002 avait permis de proposer que les oméga 3 soient hypo-triglycéridémiques, anti-inflammatoires, qu'ils diminuent faiblement mais de manière dose dépendante la pression artérielle et qu'ils puissent présenter un effet direct sur le cœur en étant anti-arythmique, agissant ainsi sur les principaux facteurs de risque de MCV.

***Produits laitiers maigres et AVC**

En ce qui concerne les mécanismes de cette association négative, plusieurs études ont rapporté que la consommation de produits laitiers peut faire baisser la tension artérielle, un facteur de risque important des maladies cardiovasculaires et particulièrement des AVC (Ackley *et al.*, 1983 ; Benatar *et al.*, 2013). Dans ce sens, une étude réalisée en 2009 (Engberink *et al.*, 2009) avait confirmé cette association et rapporté qu'en comparant la plus forte à la plus faible consommation de produits laitiers, les plus forts consommateurs présentaient une diminution significative du risque d'hypertension de 31% (RR=0,69 ; IC 0,95%=0,56-0,86). Le mécanisme par lequel les produits laitiers réduisent la tension artérielle reste à établir. Les produits laitiers sont riches en protéines et en peptides bioactifs, susceptibles d'exercer un effet bénéfique sur la pression artérielle,

par exemple en agissant au niveau de l'endothélium. De même, les minéraux contenus dans les produits laitiers, tels que le calcium, mais aussi le magnésium et le potassium, jouent un rôle important dans la régulation de la tension artérielle et ont été associés à une réduction du risque d'hypertension (Griffith *et al.*, 1999). Une méta-analyse de 40 essais contrôlés randomisés a montré que la supplémentation en calcium pouvait réduire de manière significative la pression artérielle, en particulier chez les populations ayant un apport en calcium habituellement faible (van Mierlo *et al.*, 2006). De plus, des études sur ce sujet ont montré une plus grande cohérence avec les aliments entiers qu'avec les suppléments de calcium non diététiques (Schwingshackl *et al.*, 2017a), ce qui suggère l'importance de l'ensemble des habitudes alimentaires.

3.5.7 Diabète de type 2

Le diabète de type 2 est la forme la plus fréquente de diabète et actuellement considérée comme une pandémie avec une projection à 642 millions de cas en 2040 (International Diabetes Federation, 2015). La prévalence augmente avec l'âge et ses complications sont diverses : atteintes du système vasculaire (infarctus, accident vasculaire cérébral), atteinte des reins, du système nerveux périphérique et de la rétine.

La grande majorité des cas (environ 90%) serait imputable à des facteurs de modes de vie et en particulier l'alimentation. Les principaux facteurs de risque de diabète de type 2 sont le surpoids et l'obésité, le mode de vie sédentaire et la consommation élevée de viande rouge, de viande transformée, de céréales raffinées et de boissons sucrées (Zheng *et al.*, 2018).

L'American Diabetes Association recommande un régime alimentaire réduisant les calories ainsi que les apports en graisses alors que les apports en fibres et la consommation d'aliments complets devraient être augmentés. En particulier, la consommation de boissons sucrées devrait être limitée. Une méta-analyse récente et majeure (niveau élevé de qualité avec un protocole publié PROSPERO (Schwingshackl *et al.*, 2016a)) est parue en 2017 et porte sur 12 groupes alimentaires majeurs et le risque de diabète de type 2 (Schwingshackl *et al.*, 2017a). Les articles parus avant février 2017 ont été considérés. Dans le cadre de l'ESCo les groupes alimentaires pertinents sont les œufs, les produits laitiers, le poisson, la viande rouge et la charcuterie. Une analyse dose-réponse a été réalisée et la qualité des 88 études (parmi les 14 167 articles identifiés dans la littérature) incluses a été quantifiée. Les relations entre consommation et diabète de type 2 étaient linéaires pour les œufs, les produits laitiers, le poisson, la viande rouge (P de non linéarité > 0,05). En revanche, concernant la charcuterie la relation n'était pas linéaire. Les résultats de cette méta analyse par type de produits animaux étaient les suivants :

- Au global aucune association significative avec la consommation d'œufs. Toutefois dans les analyses de sensibilité une association de type dose-réponse était observée dans les études américaines de même que dans les études les plus puissantes avec plus de 1 000 cas. Ainsi l'association semblait non linéaire avec un risque maximum de 13% pour des consommations supérieures à 50 g/jour.

- 21 études portaient sur la consommation de produits laitiers. Une réduction de 9% du risque de diabète était observée par comparaison des grands versus petits consommateurs et le RR était de 0,97 (IC 95%=0,94–0,99) pour chaque augmentation de portion (200 g par jour). Cette association était spécifique des populations asiatiques et australiennes. Par type de produits laitiers (selon le taux de graisses) la relation était à la limite de la significativité pour les produits pauvres en lipides alors qu'aucune association n'était observée pour les produits plus riches en gras.

- Pour le poisson, à partir de 16 études, aucune association n'était observée que ce soit par comparaison des petits et grands consommateurs ou par incrément de 100 g (correspondant environ à une portion). Cependant une forte association était observée dans les populations américaines.

- Quinze études ont été considérées pour l'évaluation de la relation entre consommation de viande rouge et risque de diabète correspondant à plus de 45 000 cas de diabète. Une association significative et linéaire était observée (RR=1,17 ; IC 95%=1,08–1,26, I^2=83%, n=14 études) par incrément de 100 g. L'hétérogénéité était élevée et ce même dans les analyses en sous-groupes. L'association était présente dans les études américaines et européennes mais pas dans les études asiatiques.

- Enfin 14 études ont été retenues pour la charcuterie. Chaque augmentation de consommation de 50 g/jour était associée à un sur-risque de diabète : (RR=1,37 ; IC 95%=1,22–1,55, I^2=88%, n=14 études). Toutefois, la relation ne semblait pas linéaire avec une augmentation de 30% du risque pour les consommations supérieures à 50 g par jour.

Les résultats de cette méta-analyse ont été comparés avec ceux préalablement publiés afin d'estimer la cohérence.

***Œufs**

Concernant la consommation d'œufs, deux autres méta-analyses ont été publiées en 2016.

La première publiée par Tamez *et al.* (2016) était de type dose-réponse basée sur 13 études (N=12 156 cas de diabète). La consommation d'œufs était positivement associée au risque de diabète de type 2 (risk ratio (RR)/œuf par jour : 1,13 ; IC 95%=1,04-1,22). La localisation de l'étude était un facteur majeur d'hétérogénéité avec une association bien plus forte dans les études menées aux USA (RR 1,47 ; IC 95%=1,32-1,64). Une analyse de sensibilité a porté sur les seules études considérées de très haute qualité conduisant à des résultats nuls.

La seconde (Wallin *et al.*, 2016) publiée dans *Diabetologia* était intégrée à une étude prospective suédoise dans laquelle les 39 610 hommes âgés de 45 à 79 ans ont été suivis pendant 15 ans. 4 173 cas de diabète ont été diagnostiqués. Dans cette étude, aucune association significative entre la consommation d'œufs et le risque de diabète n'a été détectée. De manière cohérente avec l'étude ci-dessus, leur méta-analyse montrait une association uniquement dans les études conduites aux USA avec un HR de 1,18 (IC 95%=1,13-1,24) pour un incrément de 3 portions supplémentaires par semaine.

***Produits laitiers**

Une autre méta-analyse récente et d'envergure parue en 2016 (Gijsbers *et al.*, 2016), a inclus 22 études de cohorte (579 832 sujets et 43 118 cas de diabète) et a considéré les différents types de produits laitiers (total, faible ou riche en matières grasses, types de lait, types de produits laitiers fermentés, crème, crème glacée et sorbet). Une réduction du risque de diabète était observée pour un incrément de 100 g de la consommation journalière de produits laitiers totale (RR=0,97 per 200-g/d incrément; IC 95%=0,95-1,00 ; P=0,04;I^2=66%). Une relation suggérée avec la consommation de produits laitiers pauvres en matières grasses a également été rapportée (RR=0,96 per 200 g/d; IC 95%=0,92-1,00 ; P=0,072 ; I^2=68%). Ces deux résultats sont cohérents avec la méta-analyse de Schwingshackl *et al*. (2017a). Des relations non linéaires et inverses ont été détectées pour les yaourts (80 g/d, RR=0,86 versus 0 g/d ; IC 95%=0,83-0,90 ; P< 0,001 ; I^2=73%) et la crème glacée (environ 10 g/d, RR=0,81 ; IC 95%=0,78-0,85 ; P< 0,001 ; I^2=86%).

La méta-analyse d'Aune *et al*. (2013) plus ancienne avait rapporté un HR de 0,93 (IC 95%=0,87-0,99) pour chaque augmentation de 400 g par jour de produits laitiers.

***Beurre**

Une seule méta-analyse portant sur la consommation de beurre a été publiée en 2016 (Pimpin *et al.*, 2016). Un total de 11 publications portant sur des populations adultes de 15 pays a été sélectionné (environ 24 000 cas de diabète). La consommation de beurre était inversement et modérément liée au risque de diabète dans cette méta-analyse (n=11 ; RR=0,96 ; IC 95%=0,93-0,99 ; P=0,021).

*** Charcuterie / viande**

Dans la méta-analyse de Micha *et al.* (2010), des études prospectives et des études cas témoins avaient été sélectionnées.

Concernant la consommation de viande rouge la relation observée avec le risque de diabète était non significative (n=5 ; RR $_{\text{incrément 100 g par jour}}$=1,16 ; IC 95%=0,92-1,46 ; P=0,25).

En revanche, l'association était significative avec la consommation de charcuterie (n=7; RR $_{\text{incrément 50 g par jour}}$=1,19 ; IC 95%=1,11-1,27 ; P<0,001).

*** Profils alimentaires**

Une méta-analyse de 2014 (Esposito *et al.*, 2014) a porté sur les études prospectives sans duplication (étude la plus récente retenue dans ce cas) à partir de la compilation de 2 556 articles. Finalement, 18 études parues entre 2002 et 2013 ont été retenues pour la méta-analyse. Celle-ci ne porte pas spécifiquement sur les groupes d'aliments mais sur les profils alimentaires. Ainsi une réduction de 20% (IC 95%=14%-26%) du risque de diabète était observée chez les sujets ayant un score élevé (comparé à un score bas) pour le profil sain (riche en fruits et légumes). L'effet était encore plus fort dans le sous-groupe de personnes à risques. Ces résultats étaient en accord avec les résultats d'une méta-analyse portant sur le régime méditerranéen (Schwingshackl *et al.*, 2015).

Les mécanismes d'origine nutritionnelle impliqués dans l'étiologie du diabète de type 2 sont présentés sur la Figure 3-2. Tous les facteurs alimentaires susceptibles de perturber le métabolisme du glucose *via* l'insuline aboutissant à une hyperglycémie sont potentiellement associés au risque de diabète de type 2 (Zheng *et al.*, 2018).

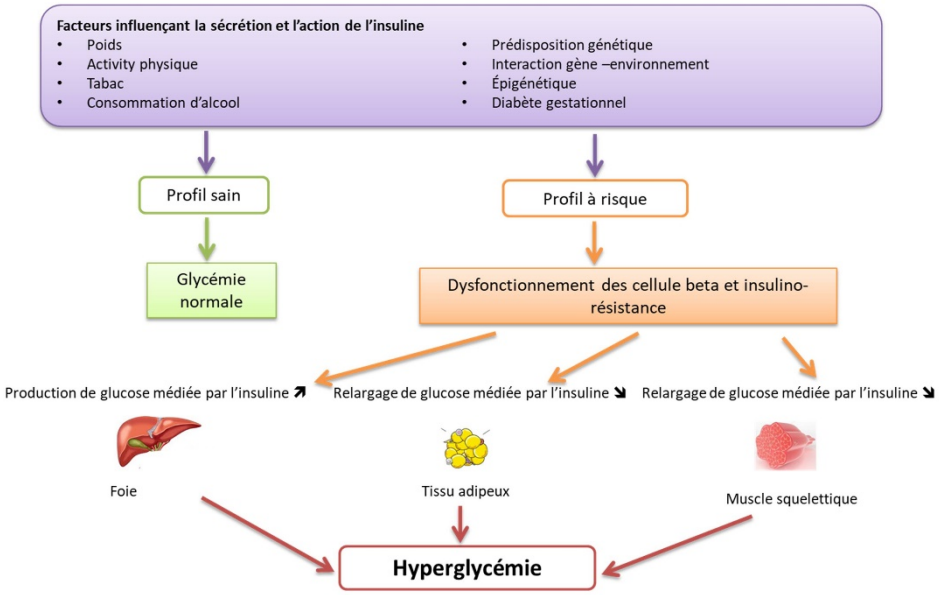


Figure 3-2. Mécanismes physiopathologiques d'origine nutritionnelle impliqués dans le développement du diabète de type II (adapté de Zheng et al. (2018)).

3.5.8 Obésité

L'obésité est une maladie multifactorielle qui, s'l est possible en grande partie de la prévenir, affecte avec le surpoids, plus d'un tiers de la population mondiale actuelle. Le surpoids et l'obésité qui se définissent comme une accumulation anormale ou excessive de graisse corporelle avec un risque pour la santé peuvent être évalués avec le suivi de l'indice de masse

corporelle (IMC) qui correspond au poids divisé par le carré de la taille (exprimé en kg/m^2) (Hruby et Hu, 2015). Sur cette base, une personne ayant un IMC de 30 ou plus est généralement considérée comme obèse et une personne dont l'IMC est égal ou supérieur à 25 est considérée comme étant en surpoids.

D'après l'OMS et basés sur de nombreuses études épidémiologiques, le surpoids et l'obésité sont des facteurs de risques majeurs de plusieurs maladies chroniques, comme les maladies cardio-vasculaires, le cancer et le diabète (WHO 2018[3] ; (Abdelaal *et al.*, 2017).

Pendant les dernières cinq décennies, la prévalence mondiale du surpoids et de l'obésité a considérablement augmenté. En effet, bien que l'augmentation ait commencé à ralentir dans certains pays dit développés, l'augmentation de l'obésité a eu tendance à s'accélérer dans les pays dits non développés ou en cours de développement. Dans le monde, l'OMS estimait ainsi qu'en 2016 le surpoids concernait 1,9 milliards d'adultes soit environ 35% des adultes, que 650 millions adultes étaient obèses et que 40 millions d'enfants de moins de cinq ans avaient un poids trop élevé. Le surpoids et l'obésité entrainent d'après l'OMS au minimum 2,8 millions de victimes chaque année. D'ici 2030, les projections du nombre de personnes en surpoids permettent de proposer qu'il devrait atteindre 3,3 milliards (WHO, 2018)[4].

En France, les données récentes de Santé Publique France rapportaient que 54% des hommes et 44% des femmes sont en surpoids ou obèses, que 17% des hommes et femmes sont obèses. En comparant les données de 2006 à 2015, il apparaît que la prévalence du surpoids et obésité reste stable, de l'ordre de 49% et celle spécifique de l'obésité est donc stable à 17% de la population adulte (Verdot *et al.*, 2017)

Des facteurs environnementaux sont capables d'impacter sur le risque de surpoids et/ou obésité. Ainsi, les choix nutritionnels et l'activité physique impactent ce risque au premier plan. Dans ce cadre, le WCRF avec le support de l'Imperial Collège de Londres a fait très récemment l'analyse exhaustive de la littérature étudiant les associations entre l'activité physique, l'alimentation et le risque de surpoids et obésité (WCRF *et al.*, 2018a).

Cette analyse publiée en 2018 a permis de proposer que, de manière convaincante, l'activité physique régulière, y compris la marche, la consommation d'aliments riches en fibres alimentaires, et l'adoption d'un régime alimentaire « type méditerranéen » sont susceptibles de réduire le risque de prise de poids et d'obésité. Inversement, une augmentation du temps de sédentarité, particulièrement du temps passé devant un écran, tout comme un régime « de type occidental », et la consommation de boissons sucrées, de céréales raffinées sont susceptibles d'augmenter le risque de gain de poids et d'obésité, avec un niveau de preuve convaincant là aussi.

Avec un niveau de preuve plus limité, la consommation de céréales complètes, de fruits et légumes pourrait diminuer le risque de surpoids et d'obésité, alors que consommer des céréales raffinées pourrait l'augmenter.

Les conclusions du WCRF n'ont pas porté spécifiquement sur les groupes alimentaires pertinents pour l'ESCo, toutefois certains de ces groupes sont des composantes principales des régimes « de type méditerranéen » ou « de type occidental » associés respectivement à une diminution et augmentation du risque de surpoids et obésité.

S'il existe des scores reconnus pour quantifier l'adhésion à un régime alimentaire de type « méditerranéen » (Zaragoza-Marti *et al.*, 2018), sa composition n'est pas définie quantitativement mais elle correspond généralement à une alimentation riche en fruits et légumes, avec des quantités modestes de **viandes, charcuteries** et de **produits laitiers**, mais avec du **poisson**, du vin et de l'huile d'olive non raffinée. Un régime « de type occidental » est à l'inverse caractérisé par des apports élevés en sucres libres, en viandes et **charcuteries** et en graisses alimentaires. Ces différentes composantes alimentaires sont proposées comme étant les facteurs responsables des effets de ces deux types de régime sur le risque de l'obésité (WCRF *et al.*, 2018a).

---

[3] WHO, 2018. Obesity and overweight. https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight

[4] WHO, 2018. Obesity and overweight. https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight

En parallèle à un rappel des conclusions du WCRF proposant qu'un régime pauvre en viandes, charcuteries et en produits laitiers mais riche en poisson est associé à une diminution du risque et qu'à l'inverse, un régime riche en viandes et graisses alimentaires est associé à une augmentation de risque, les méta-analyses récentes étudiant les associations avec les groupes alimentaires individuellement sont présentées ci-dessous.

***Charcuteries/ Viandes transformées**

Concernant l'association entre consommation de viandes transformées et le risque de surpoids et d'obésité, l'analyse du WCRF (2018a) a intégrée six études de 2002 à 2011, avec 17 résultats concernant l'association avec le poids, le gain de poids (> 2 kg ou < 2 kg), la perte du poids (> 2 kg ou < 2 kg), l'IMC, le tour de taille et le tour de taille pour un IMC donné. Parmi ces 17 analyses, 15 ont rapporté une association positive avec la consommation de viande transformée mais seulement neuf étaient statistiquement significatives. De plus, deux résultats (obtenus chez l'homme) ont montré une association inverse, dont l'un était statistiquement significatif en mettant en évidence un risque accru de perte de poids associé à une consommation croissante de viande transformée. L'ensemble de ces éléments étaient donc insuffisamment cohérents pour que le WCRF conclue quant à l'association du risque avec la consommation de viandes transformées.

Toutefois, la métra-analyse de Rouhani *et al.* (2014), qui a étudié en 2014 l'association du risque d'obésité avec la consommation de viandes transformées plus viandes de boucherie hors volailles, a montré qu'en comparaison des consommations les plus faibles, la consommation importante de viandes (transformées et de boucherie hors volailles) était associée significativement à l'augmentation du risque d'obésité (RR=1,37 ; IC à 95%=1,14–1,64).

***Viandes de boucherie hors volailles**

Dans l'analyse du WCRF de 2018, 7 études de cohortes de 1997 à 2010 avaient été intégrées avec 11 résultats au total concernant le suivi du changement de poids, de l'IMC, du tour de taille et du tour de taille pour un IMC donné. Neuf résultats ont montré une association positive entre la consommation de viande rouge et l'adiposité, mais seulement quatre étaient statistiquement significatifs, et deux présentaient une association négative, ce qui explique l'absence de conclusion du WCRF sur l'association du risque avec les seules viandes de boucherie.

Mais, comme présenté dans le paragraphe ci-dessus, l'étude de Rouhani *et al.* (2014) a montré en 2014 qu'en comparaison à des consommations les plus faibles, la consommation importante de viandes (transformées et de boucherie hors volailles) était associée significativement à l'augmentation du risque d'obésité (RR= 1,37 ; IC à 95%=1,14–1,64).

***Poissons**

Dans l'analyse de 2018, le WCRF rapporte la revue de la littérature de Summerbell *et al*. (2009), qui inclue 3 études, qui n'ont révélé aucune association significative entre le niveau de consommation de poisson (comparaison de la plus faible à la plus forte consommation) et le changement de poids ou de tour de taille sur des périodes de 2,2 à 6 ans. Le WCRF n'apporta donc pas de conclusion sur l'association du risque avec la consommation de poissons.

***Produits laitiers**

Dans son rapport de 2018, le WCRF (2018a) a rapporté huit méta-analyses d'études d'intervention randomisées portant sur l'effet de la consommation de produits laitiers sur le poids, le tour de taille, les masses maigre et grasse corporelles. Parmi ces 8 méta-analyses, six ont rapporté une association inverse entre la consommation de produits laitiers et les mesures d'adiposité, mais seulement deux étaient statistiquement significatives. Deux résultats ont rapporté une association positive avec le poids total, et la masse maigre, ces deux résultats étant significatifs.

De plus, présentées dans le rapport du WCRF de 2018, les méta-analyses d'études de cohorte conduites par Schwingshakl *et al.* (2016b) avaient portées sur l'association entre consommation de produits laitiers et le risque de surpoids et obésité. Les 4 méta-analyses ont montré une association inverse entre la consommation de produits laitiers et la mesure de l'adiposité ; mais un seul résultat était significatif : il concerne l'association négative entre la consommation des produits laitiers et le risque d'obésité abdominale (RR=0,85 ; IC à 95%=0,76-0,95) et un autre était à la limite de la significativité (association négative avec le risque de surpoids). L'analyse par sous-type de produits conduite par Schwingshakl *et al.* (2016b) avait montré que la consommation de yaourt est inversement associée à la prise de poids corporel alors que la consommation de fromage est positive associée à la prise de poids corporel. L'inconsistance des données n'a pas permis au WCRF de conclure quant à l'association entre produits laitiers et le risque de surpoids ou obésité.

***Œufs**

Dans son rapport de 2018, le WCRF (2018a) n'a pas étudié l'association entre consommations d'œufs et le risque d'obésité et/ou surpoids et aucune méta-analyse de cette association n'a été identifiée dans la littérature.

Mécanismes impliqués dans les associations présentant les niveaux de preuve les plus importants

Comme évoqué ci-dessus, les données actuelles n'ont pas permis au WCRF de conclure spécifiquement quant au rôle des groupes alimentaires relevant pour l'ESCo. Toutefois, comme certains de ces groupes sont des composantes principales des régimes « de type méditerranéen » ou « de type occidental » associés respectivement à une diminution et augmentation du risque de surpoids et obésité, les mécanismes proposés pour expliquer l'effet de ces régimes et le possible rôle des produits carnés et produits laitiers sont résumés ci-dessous.

L'effet du régime « type méditerranéen » est souvent rapproché de sa faible densité énergétique en comparaison du régime « type occidental », de sa richesse en aliments végétaux, qui fournissent une grande quantité et une grande variété de fibres alimentaires solubles et insolubles, augmentant le sentiment de satiété et la vitesse de transit. De plus le régime type méditerranéen aboutit à une diminution de la consommation de graisses saturées et une augmentation de l'apport en acides gras polyinsaturés de type oméga 3 provenant de la consommation d'huile d'olive et de poissons. En effet, la consommation d'huile d'olive et d'acides gras polyinsaturés oméga 3 semble favoriser la thermogenèse induite par le régime alimentaire. Toutefois, la consommation d'huile d'olive est également étroitement liée à la consommation de légumes, la consommation d'huile d'olive étant peut-être ainsi un simple indicateur d'un régime alimentaire plus sain (WCRF *et al.*, 2018a).

L'effet du régime « type occidental » est à l'inverse souvent rapproché de sa forte densité énergétique en comparaison du régime « type méditerranéen », de sa richesse en produits carnés. En effet, concernant **les viandes transformées et viandes de boucherie hors volailles**, Fogelholm *et al.* (2012) et le WCRF (2018a) précisent que les viandes sont denses en énergie avec pour certaines viandes une teneur élevée en graisse et peuvent ainsi agir sur le risque de surpoids et d'obésité en augmentant l'apport énergétique total. Toutefois, ces auteurs précisent aussi que la consommation de viandes peut être uniquement un marqueur d'un modèle alimentaire qui contribue à la prise de poids, plutôt que constituer un facteur de risque en soi.

Concernant l'impact des produits laitiers sur le risque d'obésité et surpoids, si les données n'ont pas permis au WCRF de conclure quant au risque, la richesse en calcium est plutôt rapprochée à une diminution du risque : le rôle du calcium a été en effet proposé (WCRF *et al.*, 2018a) de par sa capacité à moduler le métabolisme lipidique des adipocytes et de modifier l'absorption intestinale des acides gras alimentaires, un apport élevé en calcium alimentaire pouvant ainsi réduire la lipogenèse et augmenter la lipolyse. Toutefois, d'autres constituants des produits laitiers peuvent être impliqués : les protéines de lactosérum, l'acide linoléique qui impactent aussi le métabolisme des lipides. Concernant l'effet spécifique des yaourts rapporté par Schwingshakl *et al.* (2016b), cet effet peut être expliqué par une biodisponibilité des nutriments plus élevée dans les yaourts par rapport aux autres formes de produits laitiers. Enfin, le microbiote intestinal jouant un rôle

important dans le contrôle du poids, les bactéries à activité probiotique des yaourts pourraient favoriser la croissance d'un microbiote intestinal bénéfique (WCRF *et al.*, 2018a).

3.5.9 Sarcopénie

La sarcopénie est définie comme la perte de masse et de fonctionnalité musculaire au cours du vieillissement (Muscaritoli *et al.*, 2010). Elle est ainsi diagnostiquée par un faible pourcentage corporel de masse musculaire (inférieur à plus de 2 fois l'écart type de la moyenne observée pour un jeune adulte du même sexe), et par une faible vitesse de déplacement (< 0,8 m/s sur 4 m). Selon les études (en fonction des mesures réalisées et de la région considérée), la prévalence de la sarcopénie au-delà de 60 ans est de l'ordre de 1-29% chez les personnes vivant à domicile et de 14-33% chez les personnes vivant dans des unités de soins de longue durée (Cruz-Jentoft *et al.*, 2014). Ses conséquences sur la santé ont fait l'objet d'une revue systématique de la littérature, couplée à une méta-analyse lorsque les données étaient suffisantes (Beaudart *et al.*, 2017). Les résultats montrent que chez les personnes sarcopéniques le risque de mortalité est plus élevé (OR=3,60 ; IC 95%=2,96-4,37), ainsi que le risque d'incapacité fonctionnelle (OR=3,03 ; IC 95%=1,80-5,12). Ce qui se traduit par une augmentation du taux de chutes et de l'incidence des hospitalisations, accélérant l'entrée en dépendance des personnes âgées. Une étude portugaise montre de plus que les coûts d'hospitalisation sont 30 à 60% plus élevés pour les personnes sarcopéniques (Sousa *et al.*, 2016).

Le récent rapport d'un groupe d'expert (ESCEO working group) met clairement en évidence le lien entre la nutrition et la force et la masse musculaire, soulignant le rôle important qu'elle peut jouer dans la prévention et le traitement de la sarcopénie (Robinson *et al.*, 2018). Un consensus semble se dégager sur le fait que le besoin en protéines est accru chez la personne âgée non seulement pour maintenir la masse musculaire (Traylor *et al.*, 2018), mais aussi pour maintenir la fonctionnalité musculaire (Coelho *et al.*, 2018). Une récente étude sur la cohorte anglaise 'Newcastle 85+' montre que des apports protéiques les plus faibles (< 1 gKg/j) chez les personnes de plus de 85 ans sont associés aux plus fortes augmentations des scores traduisant l'incapacité physique et la dépendance (Mendonca *et al.*, 2019).

L'atténuation de la réponse anabolique musculaire lors de la prise alimentaire pourrait en partie expliquer l'érosion de la masse musculaire au cours du vieillissement (Dardevet *et al.*, 2012). Cet effet semble davantage marqué avec les protéines végétales qu'avec les protéines animales (van Vliet *et al.*, 2015). Outre la quantité totale de protéines ingérées, la qualité de ces protéines pourrait donc également jouer un rôle.

A ce jour il n'existe pas de méta-analyse reliant les groupes d'aliments ou les régimes alimentaires à l'apparition ou à la correction de la sarcopénie. Nous avons identifié 2 études longitudinales, 5 études transversales et 2 études cliniques randomisées (RCT) abordant la question de la relation entre sources de protéines et masse et fonctionnalité musculaire. Ces études portent principalement sur la viande.

<u>Les études de suivi longitudinal :</u>

- L'étude sur la cohorte 'Framingham' (USA, 40-50 ans, 5 124 sujets, suivi sur 8 ans) montre que la consommation d'aliment protéique d'origine animale, seule et plus particulièrement en association avec l'exercice physique, est positivement corrélée à la masse et la fonctionnalité musculaire (Bradlee *et al.*, 2018).
- L'étude sur la cohorte 'Seniors-ENRICA' (Espagne, > 60 ans, 2 982 sujets, suivi sur 5 ans) montre qu'une consommation importante de charcuterie (mais pas de viande rouge ou blanche) peut diminuer les capacités physiques des personnes âgées (Nutrition Impact Model Study GroupStruijk *et al.*, 2018).

<u>Les études transversales :</u>

- Une étude transversale comparant des omnivores (n=21) à des végétariens (n=19) a mis en évidence un indice de masse musculaire plus faible chez les végétariens (Aubertin-Leheudre et Adlercreutz, 2009). La consommation de protéines animales étant un prédicteur indépendant de cet indice.

- Une étude réalisée sur la cohorte NHNES (USA, >50 ans, 2 425 sujets) montre que l'indice de masse musculaire augmente linéairement avec la consommation de viande de bœuf (de 100 à 400 g/semaine) chez des sujets pratiquant une activité physique (Morris et Jacques, 2013). L'augmentation de la quantité de viande consommée n'a cependant pas d'effet sur la masse musculaire chez les personnes ayant peu d'activité physique.
- Une étude réalisée à Pékin (Chine, > 60 ans, 830 sujets) rapporte une plus forte prévalence de la sarcopénie chez les petits consommateurs de viande et d'œufs (Xia *et al.*, 2016) : pour des consommations de viande inférieures à 35 g/j, entre 35 et 70 g/j et supérieure à 70 g/j la prévalence était respectivement de 24,5%, 19,9%, et 15,3% ; pour des consommations d'œufs inférieures à 35 g/j, entre 35 et 60 g/j, et supérieure à 60 g/j la prévalence était respectivement de 25,8%, 18,7%, et 11,3%.
- Une étude réalisée à Milan (Italie, 18-98 ans, 1 853 sujets) montre que la consommation de protéines animales est associée à une masse et une force musculaire supérieure (Landi *et al.*, 2017).
- L'étude sur la cohorte Lifelines (Pays Bas, 18-91 ans, 76 000 sujets) suggère une aptitude supérieure des protéines animales (poisson, viandes et œufs) à préserver la masse musculaire chez les sujets âgés (> 75 ans) (Alexandrov *et al.*, 2018).

<u>Les études cliniques randomisées :</u>

- Haub *et al*. (2002) (USA, 65 ans, 40 sujets ; 3 mois) : par rapport à un régime végétarien, la consommation de viande ne permet pas d'augmenter la prise de masse musculaire lors d'un programme d'exercice en résistance.
- Daly *et al*. (2014) (Australie, 60-90 ans ; 100 sujets ; 4 mois) : la supplémentation avec 160 g de viande rouge maigre par jour (6 jours/7) lors d'un programme d'exercice en endurance augmente la masse maigre et la fonctionnalité musculaire chez les personnes âgées.

L'ensemble de ces études suggère un effet plutôt protecteur de la consommation de viande vis-à-vis du développement de la sarcopénie. Cet effet pourrait s'expliquer par la forte qualité nutritionnelle des protéines carnées (supérieure à celle des végétaux en raison d'un meilleur équilibre en acides aminés biodisponibles) et par une teneur très élevée en protéines (c'est, avec avec le poisson, l'aliment qui en contient le plus) qui permet d'assurer un apport protéique de bonne qualité chez des personnes âgées dont les besoins protéiques augmentent alors que la consommation énergétique globale diminue.

Il n'y a pas d'étude sur l'effet des modes d'élevage sur cet effet bénéfique de la viande dans la préservation de la masse musculaire au cours du vieillissement. Peu d'études se sont intéressées à l'impact des procédés de transformation sur l'intérêt des viandes dans la prévention de la sarcopénie. On peut cependant noter des études qui montrent une amélioration de l'assimilation des protéines de la viande par les personnes âgées lorsque la viande est hachée (Pennings *et al.*, 2013) ou bien cuite (Buffiere *et al.*, 2017).

Globalement, même si le régime méditerranéen ne semble pas protéger de la sarcopénie (Silva *et al.*, 2018), les régimes 'sains' recommandés par les nutritionnistes assurant des apports importants en fruits et légumes, graines et poissons, avec une consommation de viande raisonnable (5-6 portions /semaine en alternant viande blanche et viande rouge) semblent associés à un plus faible risque de sarcopénie (Bloom *et al.*, 2018).

3.5.10 Ostéoporose

L'ostéoporose est la principale pathologie touchant le squelette osseux. Elle est caractérisée par une diminution de la masse de l'os et une détérioration de sa structure interne. Elle rend les os plus fragiles et accroît donc considérablement le risque de fractures.

L'os est en permanence soumis à un processus de renouvellement et de réparation : le remodelage osseux. Son efficacité diminue au cours du vieillissement, entraînant une perte osseuse liée à l'âge, chez la femme comme chez l'homme. Chez les femmes non ménopausées, les œstrogènes contrôlent le remodelage osseux : ils freinent la dégradation du tissu osseux et favorisent la formation d'os jeune. Or, au moment de la ménopause, un déficit en œstrogènes s'installe : avec lui, la perte osseuse va s'accélérer et le risque d'ostéoporose s'élever. Ainsi, l'ostéoporose est 2 à 3 fois plus fréquente chez la femme que chez l'homme. En France, autour de l'âge de 65 ans, on estime que 39% des femmes souffrent d'ostéoporose. Chez celles âgées de 80 ans et plus, cette proportion monte à 70%.

L'ostéoporose augmentant considérablement le risque de fractures, pas moins de 377 000 nouvelles fractures dues à l'ostéoporose sont à déplorer chaque année en France. Les os les plus touchés sont : le col du fémur, les vertèbres et les poignets. Une étude réalisée en Angleterre montre que le risque de décès est 3 fois plus important dans l'année suivant une fracture du col du fémur que pour la population générale (> 50 ans) (Klop *et al.*, 2017).

Plusieurs facteurs peuvent être impliqués dans le développement de l'ostéoporose : la génétique de l'individu, les facteurs endocriniens, et le style de vie : tabac, alcool, activité physique, médicaments (glucocoticoïdes) et alimentation.

Les facteurs alimentaires

Le calcium est le principal constituant minéral de l'os. La calcémie est finement régulée par la 1,25 dihydroxycholécalciférol (métabolite actif de la vitamine D), et la calcitonine qui interviennent dans l'absorption intestinale et l'excrétion urinaire du calcium ainsi que dans le renouvellement du tissu osseux. En lien avec la croissance osseuse, les besoins en calcium sont supérieurs chez les moins de 25 ans. Il n'y a pas de recommandation particulière pour la femme ménopausée et les personnes âgées.

Les méta-analyses montrent qu'au-delà de 50 ans les interventions pour augmenter l'apport calcique (alimentaires ou compléments) ont un effet très modeste sur la densité minérale osseuse (Tai *et al.*, 2015) et ne sont pas associées à une diminution du risque de fracture (Bolland *et al.*, 2015). Une récente méta-analyse ne montre également pas d'effet bénéfique d'une supplémentation en vitamine D sur le risque de fracture osseuse (Bolland *et al.*, 2018). Celui-ci n'est également pas diminué par l'association de suppléments en calcium et vitamine D (Zhao *et al.*, 2017a).

Les protéines représentent environ 35% de la masse osseuse (essentiellement du collagène). Elles constituent la trame du tissu osseux. Le rôle des protéines alimentaires dans la santé osseuse a été source de controverse. Les excès d'ingestion de protéines ayant été suspectés d'accroitre les pertes calciques par excrétion urinaire pour lutter contre la charge acide provoquée par les acides aminés soufrés. Deux revues de littératures et méta-analyse ont été conduites récemment par de groupes d'experts internationaux sur le lien entre la consommation de protéines et la santé osseuse (Rizzoli *et al.*, 2018; Shams-White *et al.*, 2017). Elles concluent que des apports en protéines supérieurs aux recommandations n'ont pas d'effet négatif sur la santé osseuse, mais au contraire tendent à accroitre la densité minérale osseuse et réduire le risque de fracture (à condition que les apports calciques soient adéquats).

Outre le calcium, il est connu que d'autres minéraux peuvent impacter le métabolisme osseux, notamment le bore, le fer, le zinc, le cuivre, et le sélénium (Gaffney-Stomberg, 2019).

Relation avec l'alimentation.

Les protéines animales ayant été suspectées d'accroître la charge acide pour l'organisme, un lien entre leur consommation et l'ostéoporose a été envisagé. Une récente méta-analyse (7 études cliniques randomisées, RCT) ne supporte pas cette hypothèse, aucune différence de densité minérale osseuse n'ayant été observée entre consommation de protéines laitières et protéines végétales (soja) chez l'adulte (Shams-White *et al.*, 2018). De même, une récente revue systématique de la littérature (Perna *et al.*, 2017) suggère que la consommation de viande et de poisson n'est pas en soi dommageable pour la santé osseuse. Deux études montrent même un effet positif de la consommation de viande (Qing *et al.*, 2015) ou de poisson (Li *et al.*, 2017) sur la prévention de l'ostéoporose dans des populations asiatiques. Elle interroge cependant sur la consommation élevée de produits carnés dans le cadre des régimes de type occidental (riches en sucre et en graisse). Une étude sur une cohorte chinoise souligne un risque accru de fracture chez les individus consommant un régime moderne riche en viandes par rapport à un régime traditionnel riche en protéines végétales (Melaku *et al.*, 2017) et une méta-analyse met en évidence un effet positif des régimes de type 'Sain /prudent' par rapport aux régimes de type occidental sur la densité minérale osseuse et une diminution du risque de fractures (Denova-Gutierrez *et al.*, 2018).

La consommation de produits laitiers est généralement associée à une meilleure densité minérale osseuse et une diminution du risque de fracture. Les résultats ne sont pas toujours concordants sur l'effet des différentes catégories de produits laitiers. Certaines mettent en avant le rôle du lait (Feskanich *et al.*, 2018), d'autres mettent plutôt en avant le rôle des produits laitiers fermentés, yogourts et fromages (Bian *et al.*, 2018; Laird *et al.*, 2017). Même si certains produits végétaux sont de très bonnes sources de calcium, en raison de leur richesse en calcium, la présence de produits laitiers dans l'alimentation permet de couvrir plus facilement les besoins avec une alimentation courante (sans supplément). Leur éviction complète du régime alimentaire augmente largement le risque de déficience d'apport en calcium. Ainsi, comparées aux omnivores ou aux végétariens, les personnes végétaliennes ont généralement un moins bon statut calcique (lié à des apports faibles), associé à un moins bon statut en vitamine D, ce qui se traduit par un risque accru de fracture osseuse (Appleby *et al.*, 2007 ; Crowe *et al.*, 2011 ; Hansen *et al.*, 2018). La méta-analyse la plus récente dans le domaine (PROSPERO database) confirme une plus faible densité minérale osseuse chez les végétariens et les végétaliens par rapport aux omnivores, et un risque de fracture accru chez les végétaliens (Iguacel *et al.*, 2019).

3.5.11 Déficience en fer et anémie

Les deux principales formes de fer présentes dans les aliments sont le fer non-héminique et le fer héminique. Les produits animaux contiennent à la fois du fer héminique et du fer non-héminique, alors que les végétaux ne contiennent que du fer non-héminique. Les deux formes de fer sont absorbées dans la partie proximale de l'intestin grêle (duodénum). Le fer non-héminique est réduit en ion ferreux au moment de l'absorption, alors que le fer héminique est absorbé intact. Le fer est exporté dans la circulation sanguine par l'intermédiaire de la ferroportine, transporteur sous le contrôle négatif d'une hormone hépatique : l'hepcidine. Dans la circulation le fer est transporté par la transferrine. Le récepteur de la transferrine permet aux cellules de l'organisme d'internaliser le fer. A l'intérieur de la cellule le fer est stocké sous forme de ferritine. La ferritine sérique est la forme circulante de la ferritine.

La biodisponibilité du fer alimentaire dépend de sa solubilité (faible pour le fer non-héminique) et de sa libération de la matrice alimentaire. En fonction des réserves corporelles en fer, elle varie de 15 à 35% pour le fer héminique et de 2 à 20% pour le fer non-héminique (Carpenter et Mahoney, 1992). De plus, l'absorption de fer peut être favorisée par la présence d'acide ascorbique ou la présence de protéines carnées, ou inhibée par la présence d'acide phytique, de polyphénols ou de calcium (Moretti, 2017). Etant naturellement sous forme chélatée, l'absorption du fer héminique est moins sensibles aux autres constituants du repas et présente généralement une moindre variabilité que celle du fer non-héminique. Ainsi, bien que le fer héminique contribue seulement à 10-15% du fer ingéré, en raison de sa forte biodisponibilité sa contribution au fer disponible a été estimée à plus de 40% dans un régime omnivore (Hurrell et Egli, 2010).

Les déficiences en fer sont observées lorsque les besoins de l'organisme ne peuvent pas être couverts par l'absorption de fer alimentaire. L'anémie est le stade ultime de la déficience en fer.

L'anémie est caractérisée par une diminution du nombre et une modification de la taille de globules rouges (GR). Son étiologie est multifactorielle mais peut avoir des origines nutritionnelles, par déficience en fer (anémie microcytaire, diminution de la taille des GR), mais aussi en vitamines B12 et B9 (anémie macrocytaire, augmentation de la taille des GR). Le diagnostic de l'anémie repose sur le dosage de l'hémoglobine dans le sang (hémoglobine ≤ 13 g/dl chez l'homme, et ≤ 12 g/dl chez la femme). Selon l'OMS, la prévalence mondiale de l'anémie dans la population générale est de 24,8%, avec les plus fortes prévalences observées chez les très jeunes enfants (47%) et les femmes enceintes (42%), avec des taux particulièrement élevés en Afrique et en Asie du Sud-Est (McLean *et al.*, 2009). Il faut également noter une prévalence élevée de l'anémie chez les personnes de plus de 60 ans : 24% au niveau mondial, 12% dans les pays développés. En Europe, elle augmente progressivement de 15 à 37% entre 65 et plus de 90 ans (Bach *et al.*, 2014).

Anémie par carence en fer

L'anémie par carence en fer est associée à une ferritine basse, une transferrine augmentée, un coefficient de saturation de la transferrine abaissé, des récepteurs solubles de la transferrine augmentés et une hepcidine abaissée. L'anémie par déficience en fer, ou anémie ferriprive, représente au niveau mondial 42% des cas d'anémie chez les enfants et 50% chez les femmes en âge de procréer (Stevens *et al.*, 2013). En Europe, l'anémie ferriprive touche 2-5% des femmes non ménopausées (Milman *et al.*, 2017). L'anémie ferriprive représente également environ 15% des cas d'anémie observés chez les personnes âgées (Bach *et al.*, 2014).

L'anémie est associée à une augmentation de la morbidité et de la mortalité, et peut conduire à des dysfonctionnements cardiovasculaires et neurologiques. Ainsi, des corrélations ont été établies entre l'anémie et la diminution de capacité physique, la fatigue, les chutes, la fréquence et la durée des hospitalisations, déficience cognitive, dépression et démence. De plus, une méta-analyse récente (Figueiredo *et al.*, 2018) montre que l'anémie chez la femme enceinte est positivement associée à la mise au monde de bébé de petit poids (<2 500 g) présentant un risque accru de troubles de la santé, du développement et du comportement.

Sans atteindre le stade de l'anémie (taux d'hémoglobine normal), une déficience en fer peut avoir des conséquences négatives sur la santé : c'est la carence en fer sans anémie. Celle-ci est diagnostiquée par une ferritine abaissée (< 30 µg/l), un volume globulaire moyen et une concentration corpusculaire en hémoglobine réduits, une augmentation du pourcentage d'érythrocytes hypochromes (<2%), et une augmentation des récepteurs solubles à la transferrine (Figure 3-3). Une carence en fer sans anémie peut se traduire par une fatigue non expliquée, une fonction cognitive altérée, des capacités physiques diminuées (Soppi, 2018).

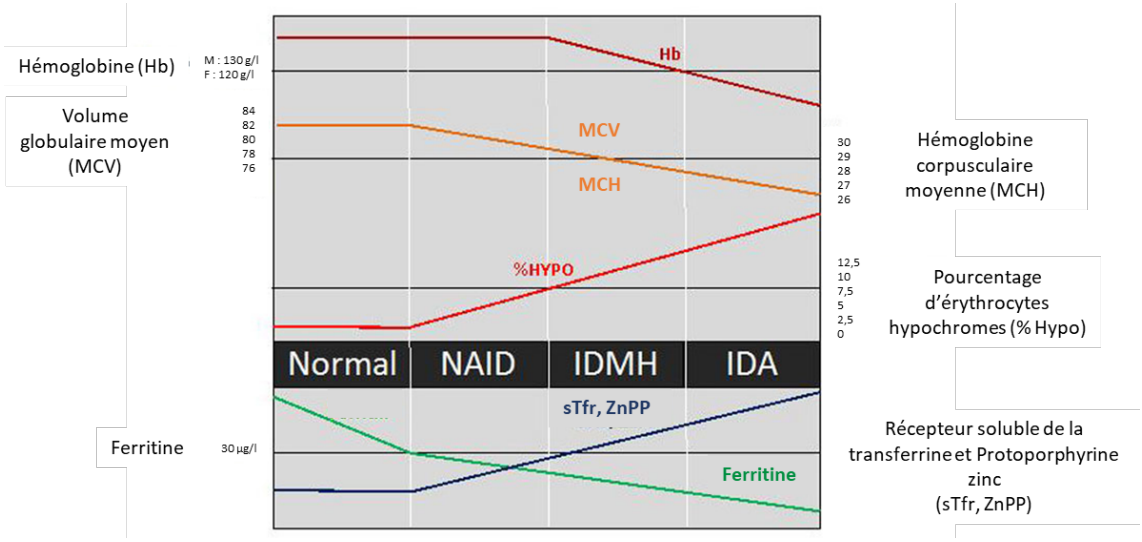


Figure 3-3. Stades de la carence en fer (adaptée de Clénin (2017)).

IDA=anémie ferriprive ; IDMH=carence en fer avec microcytose et/ou hypochromie ; NAID=carence en fer non-anémique

Relation entre alimentation et carence en fer

Bien que les régions du monde ou l'anémie ferriprive est la plus élevée correspondent aux régions où la consommation de viande est la plus faible, il n'existe pas d'étude épidémiologique d'envergure reliant la consommation/non consommation de produits animaux à l'anémie.

Par contre, de nombreuses études épidémiologiques se sont intéressées au lien entre le régime alimentaire et le statut en fer, celui-ci étant généralement évalué sur le critère de la concentration en ferritine sérique. Une méta-analyse récente de ces études (Haider *et al.*, 2018) met en évidence de plus faibles concentrations en ferritine sérique, et donc un moins bon statut en fer, chez les végétariens que chez les omnivores (en moyenne 29,7 µg/L de ferritine sérique en moins). Le fait d'inclure les semi-végétariens (consommation de viande au plus une fois par semaine) modifie peu ce résultat (en moyenne 23,27 µg/L de ferritine sérique en moins). L'étude confirme de plus que le risque de carence en fer sans anémie (ferritine < 30 µg/l) est plus élevé chez les végétariens que chez les omnivores. Une revue de littérature spécifique met également en évidence des concentrations en ferritine sérique plus faible chez les enfants végétariens que chez les non végétariens (Pawlak et Bell, 2017).

Des études épidémiologiques se sont également intéressées au lien entre la consommation de fer héminique et le statut en fer. Une revue systématique de la littérature montre que dans les pays développés il existe une association positive entre la consommation de chair animale (85 à 300 g/j) et le statut en fer (Jackson *et al.*, 2016). De plus, une étude longitudinale sur une cohorte australienne (Reeves *et al.*, 2017) montre que chez des jeunes femmes (25-30 ans, n=9 076) une ingestion de fer héminique élevée est associée à un plus faible risque de carence en fer (avec ou sans anémie) 3 ans plus tard (Odd ratio (OR)=0,91, IC 95%=0,84-0,99) et 6 ans plus tard (OR=0,89, IC 95%=0,82-0,99).

Anémie et carence en vitamine B12

L'anémie peut également être due à une carence en vitamine B12 (anémie mégaloblastique). La vitamine B12 n'étant pas présente dans les végétaux, la prévalence d'apport insuffisant est supérieure chez les végétaliens et dans une moindre mesure chez les végétariens par rapport aux omnivores (Alles *et al.*, 2017). Basée sur la vitamine B12 sérique, une méta-analyse met en évidence un meilleur statut en vitamine B12 chez les omnivores (303 ± 72 pmol/l) que chez les végétariens (209 ± 47 pmol/l) et les végétaliens (172 pmol/l) (Obersby *et al.*, 2013). Dans les populations végétariennes et végétaliennes la prise de suppléments ou la consommation d'aliments enrichis en vitamine B12 permet toutefois d'améliorer le statut en vitamine B12 (Schupbach *et al.*, 2017). Une déficience en vitamine B12 est également souvent observée chez les personnes âgées soit par défaut d'apport, ces personnes ayant tendance à consommer moins de viande, soit par défaut d'absorption (Remond *et al.*, 2015). Il n'existe cependant pas de donnée spécifique sur la prévalence de l'anémie mégaloblastique chez les végétariens ou les personnes âgées.

Le maintien d'un bon statut en vitamine B12 est particulièrement critique chez la femme enceinte et allaitante, une déficience en vitamine B12 pendant cette période pouvant avoir des répercussions graves sur le développement du fœtus, et le développement des fonctions cognitives (Black, 2008). Outre les troubles hématologiques, les déficiences en vitamine B12 semblent également impliquées dans les complications neurologiques de type Alzheimer (Politis *et al.*, 2010), ou dans le développement de syndrome dépressif (Hibbeln *et al.*, 2018).

La consommation de produits animaux, notamment de viande, demeure la meilleure solution pour la prévention des déficiences en fer et vitamines B12.

3.5.12 MAMA

Les maladies neurodégénératives englobent les démences de type Alzheimer ou non, la maladie de Parkinson et les troubles de la cognition liés à l'âge. On parle de santé mentale si on y ajoute les troubles dépressifs. Toutefois, les données portant sur les relations entre les consommations de groupes alimentaires et le risque de dépression sont relativement éparses et ce sujet ne sera pas traité ici. Les études portant sur l'identification des facteurs de risque du vieillissement cognitif normal ou pathologique présentent des limites. On peut citer des tailles d'échantillon souvent réduites comparé à d'autres champs thématiques, des populations âgées, limitant la caractérisation des expositions à plus long terme.

Les maladies neurovégétatives et le déclin cognitif se caractérisent par une détérioration du fonctionnement cognitif qui regroupe un ensemble de processus tels que la mémoire, l'attention, le langage, le raisonnement, la reconnaissance ou gnosie ainsi que la coordination des mouvements. On distingue un déclin cognitif normal ou usuel qui est lié à l'avancée en âge et un déclin pathologique précurseur de l'apparition d'une démence et élément diagnostic de celle-ci. Avant l'apparition de démence, certains troubles apparaissent parfois des années auparavant. Ainsi, on distingue le MCI (« mild cognitive impairment ») ou trouble cognitif léger qui fait référence à un trouble d'un domaine cognitif particulier ou à plusieurs domaines cognitifs. Il traduit un changement cognitif au cours de l'avancée en âge et serait un stade intermédiaire entre le vieillissement cognitif dit « normal » et la « démence » La conversion du déclin cognitif à la démence est caractérisée par une perturbation de la vie quotidienne qui handicape le patient. L'augmentation de la démence en lien avec le vieillissement de la population constitue un enjeu de santé publique et 70% des démences sont des maladies d'Alzheimer caractérisées par deux types de lésions 1) dépôts extraneuronaux de protéine β-amyloïde constituant les plaques séniles et 2) dégénérescences neuro-fibrillaire intra-neuronales (DNF). Ces lésions conduisent à une perte synaptique, une perte axonale et une mort neuronale. Toutefois, la démence est rarement uniquement neurodégénérative et associe une composante vasculaire d'autant plus que l'âge est avancé. La forme précoce (avant 60 ans) est parfois d'origine génétique. Dans la majorité des cas, les causes de démence sont multifactorielles.

Parmi les facteurs de risque connus, on peut citer les facteurs vasculaires : hypertension artérielle, diabète, hypercholestérolémie ou obésité ou l'athérosclérose eux-mêmes largement déterminés par des facteurs nutritionnels. Un niveau d'éducation élevé permettant la constitution au cours de la vie d'une « réserve cognitive » (Stern, 2009) ainsi que l'activité physique ou les activités sociales constituent des facteurs protecteurs.

Concernant les facteurs d'origine alimentaire, une conférence de consensus organisée par le National Institute of Health en 2010 avait conduit à la publication d'une revue systématique des facteurs associés à la démence (Daviglus *et al.*, 2011). Ainsi, les facteurs prépondérants étaient le diabète, l'hyperlipidémie et le tabac. Concernant les facteurs nutritionnels, l'adhérence à un régime méditerranéen, des adéquats en acide folique, de faibles quantités d'alcool et la pratique d'une activité physique constituaient des facteurs protecteurs potentiels mais les niveaux de preuve étaient faibles. Les apports en acides gras de la série n-3 à longues chaînes et le poisson présentant les niveaux de preuve les plus convaincants.

Depuis ce rapport, des travaux ont été publiés permettant ainsi de réviser ce premier état des lieux des connaissances. Les résultats disponibles concernent les consommations de poissons, de produits laitiers et l'adhésion à un régime méditerranéen. En effet, aucune méta-analyse portant sur les relations entre la consommation d'œufs, de viande, de charcuterie et la santé mentale (hors dépression) n'a été pu être identifiée.

***Poisson**

Trois méta-analyses ont été publiées depuis le rapport de 2010.

En 2016, Zhang *et al*. ont réalisé une méta-analyse portant sur le lien entre consommation de poisson et désordres cognitifs (troubles cognitifs légers ou MCI, démence, maladie d'Alzheimer et maladie de Parkinson) (Zhang *et al.*, 2016). Un total de 21 études (représentant plus de 180 000 personnes) ont été incluses, elles présentaient des durées de suivi variant de 2 à 21 ans. Une augmentation de consommation de 1 portion par semaine de poisson était associé à une réduction du risque de démence (RR=0,95 ; 95% CI: 0,90-0,99; ,=0,042, I^2=63,4%) et de maladie d'Alzheimer (RR : 0,93; 95% CI : 0.90-0,95; P=0,003, I^2=74,8%). Concernant la maladie de parkinson, le nombre d'études était insuffisant pour réaliser une méta-analyse.

En 2017, Zeng *et al*. (2017) ont publié une méta-analyse à partir de 9 études de cohorte. Les auteurs ont évalué la qualité des études incluses au moyen de l'échelle de Newcastle et Ottawa. Une réduction de 20% du risque de développer une maladie d'Alzheimer (RR=0,80 ; IC 95%=0,65–0,97) était observée chez les participants gros consommateurs de poisson comparés aux petits consommateurs. L'analyse dose réponse documentait. Une réduction du risque de 12% pour un incrément de 100 g/par semaine 12% (RR=0,88 ; IC 95%=0,79–0,99). L'analyse du Funnel-plot révélait l'absence de biais de publication. Les analyses portant sur la démence toute cause et les MCI étaient non significatives.

Une autre méta-analyse publiée en 2018 (Bakre *et al.*, 2018) a été effectuée dans le cadre d'un article original portant sur le risque de démence chez des adultes chinois. En considérant les nouveaux résultats de cette étude, une diminution du risque de démence était observée en comparant des consommateurs et des non consommateurs (RR=0,80 ; IC 95%=0,74–0,87).

***Produits Laitiers**

Une méta-analyse portant sur le lait et les désordres cognitifs a pu être identifiée. Toutefois aucune analyse dose-réponse n'a pu être réalisée (Wu et Sun, 2016). Celle-ci est basée sur les résultats de 7 articles représentant près de 11 000 sujets. Une consommation élevée de lait était associée avec une réduction de risque « d'évènements cognitifs » (incluant démences, Alzheimer ou non, déclin cognitif et désordres) avec un Odd Ratio poolé de 0,72 (IC 95%=0,56-0,93) avec une hétérogénéité marquée (I^2=64%, P=0,001). Une analyse par sous-groupe a permis de montrer que cette relation est circonscrite aux populations asiatiques.

*** Profils alimentaires**

Comparé à la littérature scientifique relative aux associations entre les facteurs alimentaires ou nutritionnels individuels et la santé mentale, les données portant sur les régimes alimentaires globaux sont relativement plus riches. S'il n'y a pas de définition unique, le régime méditerranéen caractérisé par des consommations élevées de produits végétaux (fruits, légumes, légumes secs, céréales non raffinées, oléagineux), d'huile d'olive et de poisson et des consommations relatives basses de viande et de produits laitiers a été particulièrement étudié. Une consommation modérée de vin est aussi caractéristique du régime méditerranéen. La plupart des études portant sur le régime méditerranéen utilise un score d'adéquation allouant 0 ou 1 point à chaque composante selon que la consommation est au-dessus ou au-dessous de la moyenne pour les groupes d'aliments considérés bénéfiques ou non respectivement.

Plusieurs méta-analyses ont été publiées ces dernières années et portent sur les liens entre indicateurs du vieillissement cognitif ou risque de démence et le régime méditerranéen.

Une première méta-analyse a été conduite en 2013 par Psaltopoulou *et al*. (2013) Les auteurs ont inclus 8 études portant sur le déficit cognitif. Une association négative avec l'adéquation au régime méditerranéen a été observée avec une réduction du risque de 50% (RR=50,60 ; IC 95%=50.43–50.83).

Une autre méta-analyse incluant les 3 études de cohorte (5 articles originaux) ayant collecté des informations sur le développement de MCI et de démence a été conduite en 2016 par Cao *et al*. (2016). Une adhérence élevée au régime méditerranéen était associée à une réduction du risque de MCI ou de démence de 31% (RR=0,69 ; IC 95%=0,57–0,84, P<0,001) avec une hétérogénéité faible.

Ces études étant de nature observationnelle, la causalité ne peut être démontrée formellement. Dans le champ de la nutrition, les essais d'intervention portant sur la modification du régime alimentaire global sur le long terme sont difficiles à mettre en place et donc le caractère causal de ces associations n'est pas démontré. Aussi, même si de nombreux biais sont présents dans toutes les études observationnelles, elles n'en demeurent pas moins souvent la seule source d'information.

Toutefois, une autre méta-analyse a porté sur des essais d'interventions en lien avec des indicateurs de vieillissement cognitif (Lehert *et al.*, 2015). Une amélioration du fonctionnement cognitif global et de la mémoire en particulier était observée chez les sujets suivant un régime méditerranéen enrichi en oléagineux ou en huile d'olive. Toutefois, les tests cognitifs étant variés, les indicateurs d'effet sont difficilement interprétables.

Une revue récente de la littérature, bien qu'elle n'ait pas abouti à une méta-analyse, peut être mentionnée étant donnée son ampleur (Petersson et Philippou, 2016). Les auteurs ont compilé les informations de 27 études observationnelles (issues de 25 cohortes) et 5 essais randomisés. L'hétérogénéité était importante entre les études mais la majorité de celles-ci rapportait une relation bénéfique avec une augmentation de la performance cognitive et une diminution du risque de troubles cognitifs ou de démences (total ou de type Alzheimer) quand il y a adhésion au régime méditerranéen. Les hypothèses mécanistiques sous tendant les relations entre la nutrition et le vieillissement cognitif (léger ou pathologique tel que les démences) sont d'ordre métabolique et structural. En premier lieu, le cerveau de par sa richesse en acides gras polyinsaturés à longues chaînes est très sensible à l'oxydation. Ainsi les facteurs tels que les apports en acides gras ou en antioxydants ont probablement un rôle majeur dans la détérioration cérébrale liée à l'âge. Par ailleurs, les facteurs nutritionnels impliqués dans la santé cardiométabolique constituent également des facteurs d'intérêt. En effet de nombreuses études ont permis de documenter le rôle négatif de l'obésité et des facteurs de risque cardiométaboliques sur le vieillissement cognitif.

Conclusions

L'homme est par nature omnivore et mange des produits animaux et végétaux. L'équilibre entre ces deux composantes alimentaires s'explique en premier lieu par une question de disponibilité des aliments, ou par des raisons culturelles. L'apport de produits animaux dans l'alimentation des populations dénutries a bien souvent permis d'améliorer leur statut nutritionnel. Aussi, bénéficiant d'une image très positive, l'augmentation de leur disponibilité dans les pays développés associée à un essor considérable des productions animales, a participé au développement de déséquilibres alimentaires à l'origine de pathologies, induites directement ou indirectement par une consommation excessive d'aliments d'origine animale. Depuis plus de 50 ans, les études épidémiologiques ont ainsi attiré l'attention sur un certain nombre de pathologies chroniques potentiellement associées à cette sur-consommation de produits animaux, ce qui a commencé à ternir leur image. Image qui s'est ensuite progressivement dégradée au gré des différentes crises sanitaires qui ont secouées les productions animales (ESB, dioxine, grippe aviaire …), de l'émergence de pollution des sols et de l'eau par une agriculture devenue très intensive, et plus récemment avec une remise en cause éthique des systèmes de production.

Ce chapitre avait pour objectif de faire le point sur les liens existant entre la consommation de produits animaux et la santé : leur place dans la couverture des besoins nutritionnels, leur implication dans les toxi-infections alimentaires et leur possible implication dans le développement des maladies chroniques non-transmissibles.

Bien que la présence de produits animaux dans notre alimentation ne soit strictement indispensable que pour la couverture des besoins en vitamines B12 et acides gras polyinsaturés à longue chaine (EPA, DHA) (hors prise de compléments alimentaires), ceux-ci permettent de couvrir plus facilement les besoins en de nombreux minéraux (fer pour la viande, calcium pour le lait, iode pour les produits de la mer…) et permettent d'assurer un apport protéique de qualité. Ainsi comparés aux omnivores, les végétariens et les végétaliens ont généralement un moins bon statut en DHA, en fer, en zinc et en iode. Les végétaliens se distinguent des omnivores et végétariens par un moins bon statut en vitamine B12 et calcium. Il faut toutefois noter que les études de cohorte comparant ces différentes populations sont encore peu nombreuses et avec des effectifs souvent limités, et qu'il n'existe pas pour ces comparaisons d'essai contrôlé randomisé.

Pour l'ensemble des flilières, s'il n'affecte que marginalement la qualité des protéines, le mode d'élevage influence significativement la qualité des lipides dans les denrées alimentaires produites. Ruminants au pâturage ou monogastriques

complémentés avec du lin produiront ainsi des denrées plus riches en AGPI n-3, plus favorables pour la santé. Pour le lait et les œufs, le mode d'alimentation des animaux peut également significativement impacter la teneur en vitamines et minéraux. Les procédés technologiques appliqués aux produits animaux affectent globalement peu leur qualité nutritionnelle. Les traitements thermiques peuvent cependant moduler la digestibilité des protéines, accroître l'oxydation des AGPI et entraîner des pertes en vitamines.

Ainsi, la consommation de produits animaux permet de couvrir plus facilement les besoins en fer, calcium, zinc iode et vitamines du groupe B, Elle semble de plus pouvoir limiter les altérations de l'appareil locomoteur au cours du vieillissement (sarcopénie, ostéoporose). Néanmoins, les données épidémiologiques issues des méta-analyses montrent que la consommation de produits animaux peut avoir des effets négatifs s'ils sont consommés en excès par rapport aux recommandations actuelles (PNNS, 2019). Dans le contexte de l'ESCo, les associations avec des niveaux de preuves établis par les agences (WCRF pour cancer et Anses pour MCV, diabète et MAMA) sont présentées ci-dessous et résumées dans le tableau 3-5 :

	Cancer	MCV	MAMA
Charcuteries			
Viandes de boucherie hors volailles			
Poisson			
Produits laitiers			

Niveau de preuve :

Augmentation du risque			Diminution du risque			Peu probable	Sans conclusion
Convaincant	Probable	Suggéré	Convaincant	Probable	Suggéré		

Tableau 3-5 : Niveau de preuve des associations entre la consommation de produits animaux et la santé

<u>*Charcuteries</u>

Chaque augmentation de consommation de viandes transformées ou charcuterie de 50 g/j est associée à une augmentation du risque de cancer du côlon avec un niveau de preuve 'convaincant'. Avec un niveau de preuve plus faible (dit 'suggéré'), la consommation de viandes transformées est associée à une augmentation du risque des cancers du nasopharynx, de l'œsophage (carcinome des cellules squameuses), du poumon, de l'estomac (non-cardia) et du pancréas. De plus les méta-analyses ont permis de mettre en évidence une augmentation du risque de maladies cardio-vasculaires (MCV), accidents vasculaires cérébraux (AVC), de diabète et les maladies coronariennes (MCo) associée à la consommation de charcuteries.

***Viandes de boucherie hors volailles**

Chaque augmentation de consommation de viandes de boucherie hors volailles de 100 g/j augmente le risque de cancer du côlon avec un niveau de preuve 'probable'. Avec un niveau de preuve 'suggéré', la consommation de viandes de boucherie hors volailles est associée à une augmentation du risque des cancers du nasopharynx, du poumon et du pancréas. Enfin, la consommation de viandes grillées a été associée à une augmentation du risque de cancer de l'estomac avec un niveau de preuve 'suggéré'. De plus, la consommation de viandes de boucherie hors volailles a été associée à une augmentation du risque d'AVC avec un niveau de preuve 'probable'.

***Poissons**

Avec un niveau de preuve 'suggéré', la consommation de poisson est associée à une baisse du risque des cancers du foie et du cancer colorectal. Enfin, la consommation de poisson est associée à une diminution du risque d'AVC et une diminution du risque de déclin cognitif avec un niveau de preuve 'probable'.

***Produits laitiers**

La consommation de produits laitiers est associée à une diminution du risque de cancer colorectal avec un niveau de preuve probable, ainsi qu'à une diminution du risque de cancer du sein en post-ménopause avec un niveau de preuve 'suggéré', mais une augmentation du risque de cancer de la prostate avec un niveau de preuve 'suggéré'. Enfin, les méta-analyses ont mis en évidence une diminution du risque d'AVC associée à la consommation de produits laitiers en particulier maigres, avec un niveau de preuve 'suggéré'.

***Cas particulier de l'obésité**

Les données ne permettent pas de conclure spécifiquement quant à l'impact des groupes alimentaires pertinents pour l'ESCo sur le risque d'obésité, toutefois certains de ces groupes sont des composantes principales des régimes « de type méditerranéen » ou « de type occidental » associés respectivement à une diminution et augmentation du risque de surpoids et obésité. Globalement, une alimentation riche en fruits et légumes, avec des quantités modestes de viandes, charcuteries et de produits laitiers, mais avec du poisson, du vin et de l'huile d'olive est associé à une diminution du risque alors qu'à l'inverse des apports élevés en sucres libres, en viandes et charcuteries et en graisses alimentaires est associée à une augmentation du risque.

Concernant l'incidence réelle des toxi-infections alimentaires, elle reste encore difficile à estimer, et est probablement encore sous-estimée. De plus, si la part attribuable aux produits d'origine animale dans les maladies d'origine alimentaire reste importante. Il est encore difficile d'estimer la part relative de produit d'origine animale du fait du manque de connaissances sur l'origine des souches observées chez les patients*. Elevage, transformation et surtout pratiques de consommation sont les principaux leviers pour limiter l'impact de ces toxi-infections sur la santé et ses répercussions socio-économiques*. En effet, l'amélioration de ces pratiques de consommation (cuisson adaptée des viandes, application de meilleures pratiques d'hygiène dans la cuisine, respect de la chaîne du chaud et du froid) est susceptible de réduire de 70% le fardeau sanitaire (sans changement de la qualité microbiologique des produits délivrés aux consommateurs).

Les niveaux de consommation en France face aux recommandations nutritionnelles

Les données de consommation peuvent être estimées à partir de 3 approches : les données d'achat, les données issues d'enquête alimentaires et les données calculées à partir des abattages (en tenant compte de l'import/export). Les données

d'achat sont peu utilisées pour les études en nutrition/santé, car elles ne prennent pas en compte la consommation hors domicile, et ne tiennent pas compte des variations du nombre de convives. Les données issues des enquêtes d'alimentation son très normalisées et, bien que souffrant du biais d'être déclaratives, permettent d'obtenir des données en gramme (ou kg) consommé par unité de temps de chaque classe d'aliment. En France, on peut trouver des relevées de consommation des produits animaux dans 2 sources différentes : l'étude individuelle nationale des consommations alimentaires (INCA) réalisée par l'Anses et l'enquête Comportement et consommations alimentaires en France (CCAF) réalisée par le Credoc). Enfin pour les produits carnés, on peut se référer aux statistiques mondiales de la FAO, basées sur la viande produite et destinée à être consommée en France, exprimées en kilos équivalents-carcasse. Pour se rapprocher de la quantité réellement consommée il faut ensuite appliquer un coefficient de rendement carcasse (67%), pour enlever les parties de la carcasse non consommées. A la différence des enquêtes alimentaires la donnée obtenue ne tient pas compte de ce qui est gaspillé sur le lieu de vente, chez le consommateur ou les lieux de restauration (20%, FAO (2011)), ni des pertes de masse (surtout des pertes en eau qui peuvent aller jusqu'à -30%) générés par les procédés de transformation/cuisson (les enquêtes alimentaires sont basées sur les produits prêts à consommer). Pour la catégorie viande de boucherie, les choses sont en plus compliquées par le fait que le porc est utilisé à la fois pour la consommation à la découpe et pour la production de charcuterie (2 classes différentes dans les enquêtes alimentaires, viande rouge d'une part et charcuteries d'autre part). Au final, si on applique le coefficient de rendement carcasse aux équivalents-carcasse, et qu'on retire les pertes et gaspillage, on trouve une bonne concordance entre les estimations de consommation obtenues à partir des enquêtes alimentaires et celles obtenues à partir des données de production : 88 g/j à partir des données FAO-STAT pour 2013 (167 g équivalents-carcasse/j x 0,67 x 0,80), contre 53 g/j de viande de boucherie + 35 g/j de charcuterie pour les données CCAF (2013). On peut donc raisonnablement s'appuyer sur les données de consommation par enquête alimentaire pour évaluer la consommation de la population française par rapport aux recommandations nutritionnelles.

Objectifs du PNNS 4 pour les produits animaux

Produits laitiers

Faire évoluer la consommation des produits laitiers chez les adultes de sorte que :

- 100% de la population consomme au moins un produit laitier par jour ;
- 100% de la population consomme moins de 4 produits laitiers par jour.

Viande hors volaille

Diminuer la consommation de viande « rouge » (bœuf, porc, veau, mouton, chèvre cheval, sanglier, biche) dans la population de sorte que :

- 100% de la population consomme en dessous du seuil de 500g de viande par semaine.

Poisson

Augmenter la consommation de poisson dans la population de sorte que :

- 100% de la population consomme au moins une portion de poisson par semaine.

Charcuterie

Diminuer la consommation de charcuterie dans la population de sorte que :

- 100% de la population consomme en dessous du seuil de 150g de charcuterie par semaine.

Etant donné le lien probable entre la consommation de viande de boucherie et le cancer colorectal (WCRF *et al.*, 2018b), le diabète (Anses, 2016b), et les maladies cardiovasculaires (Anses, 2016b), même si le « niveau de confiance » de ce lien demeure un sujet de débat (Johnston *et al.*, 2019), par principe de précaution et dans un souci d'équilibre alimentaire, une

consommation inférieure à **500 g/semaine** pour l'ensemble de la population demeure l'objectif à atteindre pour le PNNS 4. Les gros consommateurs de viande de boucherie (28% de la population consomment plus de 490 g/semaine, (CREDOC, 2013), sont donc incités à en réduire la consommation. Pour le reste de la population, en l'état actuel des connaissances, une réduction de consommation ne semble pas apporter un bénéfice santé significatif.

D'un point de vue pratique, la recommandation revient à ne pas dépasser 4 portions (100-120 g cuit, donc environ 120-150 g cru) de viande de porc, bœuf et agneau par semaines, privilégier la consommation de viande de volaille dont l'effet semble neutre pour la santé, et manger 1 à 2 portions de poisson par semaine.

Le lien entre la consommation de charcuterie et le cancer colorectal étant jugé 'convaincant', une limite de consommation à 150 g par semaine a été proposée par le PNNS 4. En moyenne les consommations françaises sont supérieures à cette recommandation (190 g/semaine pour INCA 3, et 200 g/semaine pour le CREDOC (CREDOC, 2016). L'effort de réduction touche ainsi une grosse partie de la population. La charcuterie représente une très large gamme de produits (jambon 'cru' ou cuit, saucisses et saucissons 'cru' ou à cuire, pâtés, rillettes …) et les études épidémiologiques ne permettent pas encore de différencier l'effet de chaque catégorie de charcuterie sur la santé. Les procédés d'élaboration ainsi que les compositions nutritionnelles étant très différentes selon le type de charcuterie, on peut imaginer qu'ils ont des effets différents sur la santé. Des enquêtes alimentaires dissociant les grands types de charcuterie seraient nécessaires pour étudier leurs effets spécifiques sur la santé et clarifier le message nutritionnel sur les charcuteries.

Si les limites supérieures de consommation de viande de boucherie et de charcuterie pour limiter le risque de développer cancers, diabète et maladies cardiovasculaires font globalement consensus, les limites inférieures de leur consommation pour assurer un bon état de santé sont quant à elles beaucoup moins certaines. La comparaison des omnivores 'prudent' (qui respecte les recommandations alimentaires) avec les végétariens permet d'avoir une idée de l'intérêt des produits carnés dans l'alimentation en mettant en évidence une diminution du risque de sarcopénie et de déficience en fer chez les omnivores. De même la comparaison entre végétariens et végétaliens met clairement en évidence l'intérêt des produits laitiers pour la santé osseuse. Des études épidémiologiques se concentrant sur une population s'étendant des normaux consommateurs de produits animaux (ceux qui respectent les recommandations actuelles), aux très faibles consommateurs de produits animaux seraient nécessaires pour clarifier le risque/bénéfice d'une réduction de consommation de ces produits en dessous des recommandations actuelles. Si cette réduction ne semble pas s'imposer aujourd'hui pour des raisons de santé, elles pourraient demain s'imposer pour des raisons d'environnement ou de disponibilité alimentaire.

Périmètre, lacunes, perspectives

L'expertise scientifique collective porte sur la qualité des produits animaux. Sur le plan épidémiologique, le périmètre est cependant plus circonscrit en raison d'un certain nombre de limites. En effet, les attributs de la qualité (*cf*. chapitre 1) ne sont pour la plupart pas disponibles au niveau épidémiologique. Ainsi des limites liées aux méthodes et à la disponibilité des résultats sont à souligner.

Tout d'abord, la plupart des résultats épidémiologiques portent même sur des catégories d'aliments relativement larges limitant l'identification précise des effets. Par exemple, si les catégories viandes transformées (charcuterie) ou viandes de boucherie sont souvent distinguées, les différents types de viandes (porc, bœuf, etc.) le sont rarement. Il en est de même pour les catégories des produits laitiers ou des poissons souvent considérés comme des catégories uniques.

Ainsi une amélioration de la précision lors de la collecte des données et une exploration plus fine des associations permettraient d'explorer les relations à un niveau plus précis en termes de produits. Cela nécessite en particulier le recours à des méthodes de collecte de données alimentaires plus précises telles que les enregistrements de 24 heures comparés aux questionnaires de fréquence comportant des listes fermées et donc parfois des items globaux (volaille par exemple).

Concernant la composition nutritionnelle des aliments, l'épidémiologie a recours à des compositions qui la plupart du temps sont des moyennes pour un item donné. Cela a pour conséquence d'éliminer les différences de compositions nutritionnelles et donc de qualité. Il est théoriquement possible pour des aliments industriels d'avoir accès à des compositions plus

spécifiques (à partir des données d'étiquetage au moins) si les marques sont enregistrées lors de la collecte. Si cela est possible pour certaines méthodes de recueil telles que les enregistrements de 24 h cela est plus complexe lors de l'utilisation de questionnaires de fréquences portant généralement sur l'année écoulée.

Ce niveau de précision n'est toutefois pas atteignable pour des aliments « bruts » ou artisanaux. C'est en effet le cas pour la viande fraîche et la charcuterie non-industrielle.

Aussi, la collecte de données relatives à la qualité des produits à l'échelle épidémiologique est relativement restreinte dès lors que les consommations sont auto-rapportées et que le consommateur ne connaît pas ces attributs pour les aliments consommés. Il est donc nécessaire pour approcher ces dimensions d'avoir recours à un « langage commun » entre l'enquêteur et l'enquêté. Les labels peuvent permettre au mieux partiellement de pallier cette contrainte. Toutefois, s'il est probable que certains critères de qualité, en particulier la composition nutritionnelle, pour un aliment donné sont différentes selon certains labels (bleu-blanc-cœur, bio par exemple), les tables de composition actuelles ne permettent pas toujours de les considérer *a posteriori*. Par exemple, concernant le label bio, les données sont trop parcellaires pour permettre d'introduire le mode de production comme un déterminant des valeurs nutritionnelles à l'échelle du régime.

Enfin, la conclusion du chapitre 3 se réfère à l'analyse bibliographique conduite jusqu'à fin juin 2019. Toutefois, une série d'articles publiés dans le réputé journal *Annal Internal Medicine* est parue le 1er octobre 2019 en ligne[5]. Ces articles soulèvent des controverses quant aux recommandations de consommation et sont sujets à débat. Néanmoins en l'état actuel des connaissances, il est important de souligner que les recommandations nutritionnelles actuelles établies au niveau national par l'INCa et l'Anses **ne sont pas d'éviter toute consommation de viandes rouges et charcuteries, mais de la limiter : limiter la consommation de viandes rouges hors volailles à 500 g par semaine et la consommation de charcuteries à 150 g/semaine en favorisant le jambon blanc. Les recommandations actuelles sont donc des messages de réduction et non d'exclusion** avec comme cible principale les forts consommateurs, qui représentent toutefois une partie non négligeable de la population française : plus de 30% des français(es) pour la consommation de viandes rouges hors volailles et charcuteries.

Plus que les valeurs de risque estimées, ces différents articles publiés dans *Annal Internal Medicine* remettent en cause les niveaux de preuve des associations entre la consommation de viandes rouges, charcuteries et les effets santé et proposent sur cette base des recommandations opposées aux recommandations actuelles.

En effet, lors de l'étude des associations entre profils alimentaires (comparaison de régimes riches vs peu riches en viandes rouges et charcuteries (Vernooij *et al.*, 2019), les auteurs mettent en évidence que les profils peu riches en viandes rouges et charcuteries sont associés à une réduction de risque de mortalité toutes causes de 13% (18-8%), de mortalité cardiovasculaire de 14% (21-6%), de diabète de 24% (32-14%), d'AVC de 14% (19-8%). Si l'on considère le seul risque de mortalité, un risque relatif de 0,87 (IC95%=0,82-0,92) a été mis en évidence soit une baisse du risque de 13% ; mais ce résultat pourtant significatif est interprété comme suit par les auteurs « Nous ne sommes pas certains des effets d'un régime alimentaire riche en viande rouge et en viande transformée, vis-à-vis de la mortalité toutes causes ». Donc malgré des données assez cohérentes avec les méta-analyses présentées dans le chapitre 3, les auteurs de ces articles proposent des niveaux de preuve faibles en remettant en cause l'établissement d'un niveau de preuve à partir des études épidémiologiques d'observation, ceci alors que ce système fait référence au niveau international.

Les auteurs de l'article portant sur le risque de cancer (Han *et al.*, 2019) rapportent une réduction du risque de la mortalité par cancer de 7% (9-6%) associée à une faible consommation de viande rouge et aucune association avec l'incidence de cancer colorectal. En ce qui concerne ces données sur l'incidence de cancer et en particulier le risque de cancer du côlon, pour comparer les méta-analyses du WCRF et celles de ces articles publiés dans le journal *Annal internal medicine*, il faut garder à l'esprit que les analyses du WCRF portent sur des risques relatifs par **50 g consommés/jour (soit 350 g par semaine)** alors

[5] Annals of Internal Medicine 19 November 2019 Vol: 171, Issue 10 https://annals.org/aim/issue/938274

que l'analyse publiée dans *Annal Internal Medicine* a rapporté un RR pour une consommation de **150 g (3 portions)/semaine)**. Or si l'on rapporte les données du WCRF à 150 g/semaine, les données sont très similaires.

Références bibliographiques

Abdelaal, M.; Le Roux, C.W.; Docherty, N.G., 2017. Morbidity and mortality associated with obesity. *Annals of Translational Medicine*, 5 (7). http://dx.doi.org/10.21037/atm.2017.03.107

Abel, M.H.; Caspersen, I.H.; Meltzer, H.M.; Haugen, M.; Brandlistuen, R.E.; Aase, H.; Alexander, J.; Torheim, L.E.; Brantsaeter, A.L., 2017. Suboptimal Maternal Iodine Intake Is Associated with Impaired Child Neurodevelopment at 3 Years of Age in the Norwegian Mother and Child Cohort Study. *Journal of Nutrition*, 147 (7): 1314-1324. http://dx.doi.org/10.3945/jn.117.250456

Abete, I.; Romaguera, D.; Vieira, A.R.; Lopez de Munain, A.; Norat, T., 2014. Association between total, processed, red and white meat consumption and all-cause, CVD and IHD mortality: a meta-analysis of cohort studies. *British Journal of Nutrition*, 112 (5): 762-775. http://dx.doi.org/10.1017/s000711451400124x

Abo-El-Sooud, K.; Hashem, M.M.; Badr, Y.A.; Eleiwa, M.M.E.; Gab-Allaha, A.Q.; Abd-Elhakim, Y.M.; Bahy-El-Dien, A., 2018. Assessment of hepato-renal damage and genotoxicity induced by long-term exposure to five permitted food additives in rats. *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (26): 26341-26350. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-2665-z

Ackley, S.; Barrettconnor, E.; Suarez, L., 1983. Dairy-products, calcium, and blood-pressure. *American Journal of Clinical Nutrition*, 38 (3): 457-461.

Afssa, 2007. *Apport en protéines: consommation, qualité, besoins et recommandations*. Paris: Afssa, 461 p.

Aguilar, F.; Crebelli, R.; Di Domenico, A.; Dusemund, B.; Frutos, M.J.; Galtier, P.; Gott, D.; Gundert-Remy, U.; Lambre, C.; Leblanc, J.C.; Lindtner, O.; Moldeus, P.; Mortensen, A.; Mosesso, P.; Parent-Massin, D.; Oskarsson, A.; Stankovic, I.; Waalkens-Berendsen, I.; Woutersen, R.A.; Wright, M.; Younes, M., 2015. Scientific Opinion on the re-evaluation of ascorbic acid (E 300), sodium ascorbate (E 301) and calcium ascorbate (E 302) as food additives. *Efsa Journal*, 13 (5). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4087

Aguilar, F.; Crebelli, R.; Di Domenico, A.; Dusemund, B.; Frutos, M.J.; Galtier, P.; Gott, D.; Gundert-Remy, U.; Lambre, C.; Leblanc, J.C.; Lindtner, O.; Moldeus, P.; Mortensen, A.; Mosesso, P.; Parent-Massin, D.; Oskarsson, A.; Stankovic, I.; Waalkens-Berendsen, I.; Woutersen, R.A.; Wright, M.; Younes, M., 2016. Scientific Opinion on the re-evaluation of benzoic acid (E 210), sodium benzoate (E 211), potassium benzoate (E 212) and calcium benzoate (E 213) as food additives. *Efsa Journal*, 14 (3). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4433

Ahluwalia, A.; Gladwin, M.; Coleman, G.D.; Hord, N.; Howard, G.; Kim-Shapiro, D.B.; Lajous, M.; Larsen, F.J.; Lefer, D.J.; McClure, L.A.; Nolan, B.T.; Pluta, R.; Schechter, A.; Wang, C.Y.; Ward, M.H.; Harman, J.L., 2016. Dietary Nitrate and the Epidemiology of Cardiovascular Disease: Report From a National Heart, Lung, and Blood Institute Workshop. *Journal of the American Heart Association*, 5 (7). http://dx.doi.org/10.1161/jaha.116.003402

Alexander, D.D.; Bylsma, L.C.; Vargas, A.J.; Cohen, S.S.; Doucette, A.; Mohamed, M.; Irvin, S.R.; Miller, P.E.; Watson, H.; Fryzek, J.P., 2016a. Dairy consumption and CVD: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition*, 115 (4): 737-750. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114515005000

Alexander, D.D.; Miller, P.E.; Vargas, A.J.; Weed, D.L.; Cohen, S.S., 2016b. Meta-analysis of Egg Consumption and Risk of Coronary Heart Disease and Stroke. *Journal of the American College of Nutrition*, 35 (8): 704-716. http://dx.doi.org/10.1080/07315724.2016.1152928

Alexandrov, N.V.; Eelderink, C.; Singh-Povel, C.M.; Navis, G.J.; Bakker, S.J.L.; Corpeleijn, E., 2018. Dietary Protein Sources and Muscle Mass over the Life Course: The Lifelines Cohort Study. *Nutrients*, 10 (10). http://dx.doi.org/10.3390/nu10101471

Alles, B.; Baudry, J.; Mejean, C.; Touvier, M.; Peneau, S.; Hercberg, S.; Kesse-Guyot, E., 2017. Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Sante Study. *Nutrients*, 9 (9). http://dx.doi.org/10.3390/nu9091023

Anses, 2011. *Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. Rapport d'expertise collective*. Paris: Anses, (Saisine n°2006-SA-0359), 323 p.

Anses, 2014. *Information des consommateurs en matière de prévention des risques biologiques liés aux aliments. Tome 1 – Hiérarchisation des couples danger/aliment et état des lieux des mesures d'information*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 110 p.

Anses, 2015. *Information des consommateurs en matière de prévention des risques biologiques liés aux aliments. Tome 2 : Évaluation de l'efficacité des stratégies de communication*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 170 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2012sa0118Ra-02.pdf

Anses, 2016a. *Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles. Rapport d'expertise collective*. Paris: Anses, (Saisine « n°2012-SA-0103 – Révision des repères de consommations alimentaires»), 180 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf

Anses, 2016b. *Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles. Rapport d'expertise collective. Paris: Anses, (Saisine « n°2012-SA-0103 – Révision des repères de consommations alimentaires»),* . Paris: Anses, 180 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf

Anses, 2017. *Avis et rapport de l'Anses relatif à l'attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 1 : Revue des méthodes et inventaire des données*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 189 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra.pdf

Anses, 2018. *Attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 2 : Analyse des données épidémiologiques*. Paris: Anses, (Saisine n°2015-SA-0162), 112 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra-2.pdf

Anses; Groupe de travail "Méthodologie des risques", 2017. *Illustrations et actualisation des recommandations pour l'évaluation du poids des preuves et l'analyse d'incertitude à l'Anses. Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective*. Paris: Agence française de sécurité sanitaire des aliments, (Saisines n°2015-SA-0089 et 2015-SA-0090), 80 p.

Appleby, P.; Roddam, A.; Allen, N.; Key, T., 2007. Comparative fracture risk in vegetarians and nonvegetarians in EPIC-Oxford. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61 (12): 1400-1406. http://dx.doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602659

Aubertin-Leheudre, M.; Adlercreutz, H., 2009. Relationship between animal protein intake and muscle mass index in healthy women. *British Journal of Nutrition*, 102 (12): 1803-1810. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114509991310

Augustin, J.C.; Kooh, P.; Bayeux, T.; Guillier, L., Meyer, T.; Jourdan-Da-Silva, N.; Villena, I. Sanaa, M.; Cerf O. on behalf of the Anses Working Group on Consumer information on foodborne biological risks. 2020. Contribution of foods and improper food handling practices to the burden of foodborne infectious diseases in France. Foods. In revision.

Aune, D.; Keum, N.; Giovannucci, E.; Fadnes, L.T.; Boffetta, P.; Greenwood, D.C.; Tonstad, S.; Vatten, L.J.; Riboli, E.; Norat, T., 2016. Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause and cause specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. *Bmj-British Medical Journal*, 353. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.i2716

Aune, D.; Norat, T.; Romundstad, P.; Vatten, L.J., 2013. Dairy products and the risk of type 2 diabetes: a systematic review and dose-response meta-analysis of cohort studies. *The American journal of clinical nutrition*, 98 (4): 1066-83. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.113.059030

Azad, M.B.; Abou-Setta, A.M.; Chauhan, B.F.; Rabbani, R.; Lys, J.; Copstein, L.; Mann, A.; Jeyaraman, M.M.; Reid, A.E.; Fiander, M.; MacKay, D.S.; McGavock, J.; Wicklow, B.; Zarychanski, R., 2017. Nonnutritive sweeteners and cardiometabolic health: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials and prospective cohort studies. *Canadian Medical Association Journal*, 189 (28): E929-E939. http://dx.doi.org/10.1503/cmaj.161390

Bach, V.; Schruckmayer, G.; Sam, I.; Kemmler, G.; Stauder, R., 2014. Prevalence and possible causes of anemia in the elderly: a cross-sectional analysis of a large European university hospital cohort. *Clinical Interventions in Aging*, 9: 1187-1196. http://dx.doi.org/10.2147/cia.s61125

Baeza, E.; Berri, C., 2018. Qualité nutritionnelle, sensorielle et technologique de la viande de volailles. In: (coord.), B.V., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui).

Bakre, A.T.; Chen, R.L.; Khutan, R.; Wei, L.; Smith, T.; Qin, G.; Danat, I.M.; Zhou, W.J.; Schofield, P.; Clifford, A.; Wang, J.J.; Verma, A.; Zhang, C.L.; Ni, J.D., 2018. Association between fish consumption and risk of dementia: a new study from China and a systematic literature review and meta-analysis. *Public Health Nutrition*, 21 (10): 1921-1932. http://dx.doi.org/10.1017/s136898001800037x

Bandyopadhyay, A.; Ghoshal, S.; Mukherjee, A., 2008. Genotoxicity Testing of Low-Calorie Sweeteners: Aspartame, Acesulfame-K, and Saccharin. *Drug and Chemical Toxicology*, 31 (4): 447-457. http://dx.doi.org/10.1080/01480540802390270

Baradat, M.; Jouanin, I.; Dalleau, S.; Tache, S.; Gieules, M.; Debrauwer, L.; Canlet, C.; Huc, L.; Dupuy, J.; Pierre, F.H.F.; Gueraud, F., 2011. 4-Hydroxy-2(E)-nonenal Metabolism Differs in Apc(+/+) Cells and in Apc(Min/+) Cells: It May Explain Colon Cancer Promotion by Heme Iron. *Chemical Research in Toxicology*, 24 (11): 1984-1993. http://dx.doi.org/10.1021/tx2003036

Barbe, F.; Menard, O.; Le Gouar, Y.; Buffiere, C.; Famelart, M.H.; Laroche, B.; Le Feunteun, S.; Dupont, D.; Remond, D., 2013. The heat treatment and the gelation are strong determinants of the kinetics of milk proteins digestion and of the peripheral availability of amino acids. *Food Chemistry*, 136 (3-4): 1203-1212. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.022

Basak, K.; Basak, P.Y.; Doguc, D.K.; Aylak, F.; Oguztuzun, S.; Bozer, B.M.; Gultekin, F., 2017. Does maternal exposure to artificial food coloring additives increase oxidative stress in the skin of rats? *Human & Experimental Toxicology*, 36 (10): 1023-1030. http://dx.doi.org/10.1177/0960327116678297

Bastide, N.M.; Chenni, F.; Audebert, M.; Santarelli, R.L.; Tache, S.; Naud, N.; Baradat, M.; Jouanin, I.; Surya, R.; Hobbs, D.A.; Kuhnle, G.G.; Raymond-Letron, I.; Gueraud, F.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2015. A Central Role for Heme Iron in Colon Carcinogenesis Associated with Red Meat Intake. *Cancer Research*, 75 (5): 870-879. http://dx.doi.org/10.1158/0008-5472.can-14-2554

Bastide, N.M.; Pierre, F.H.; Corpet, D.E., 2011. Heme iron from meat and risk of colorectal cancer: a meta-analysis and a review of the mechanisms involved. *Cancer prevention research (Philadelphia, Pa.)*, 4 (2): 177-184. http://dx.doi.org/10.1158/1940-6207.capr-10-0113

Bath, S.C.; Steer, C.D.; Golding, J.; Emmett, P.; Rayman, M.P., 2013. Effect of inadequate iodine status in UK pregnant women on cognitive outcomes in their children: results from the Avon Longitudinal Study of Parents and Children (ALSPAC). *Lancet*, 382 (9889): 331-337. http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736(13)60436-5

Bauchart, C.; Savary-Auzeloux, I.; Mirand, P.P.; Thomas, E.; Morzel, M.; Remond, D., 2007. Carnosine concentration of ingested meat affects carnosine net release into the portal vein of minipigs. *Journal of Nutrition*, 137 (3): 589-593.

Bauchart, D.; Chantelot, F.; Gandemer, G., 2008. Qualités nutritionnelles de la viande et des abats chez le bovin : données récentes sur les principaux constituants d'intérêt nutritionnel. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 43: 29-39.

Bax, M.L.; Aubry, L.; Ferreira, C.; Daudin, J.D.; Gatellier, P.; Remond, D.; Sante-Lhoutellier, V., 2012. Cooking Temperature Is a Key Determinant of in Vitro Meat Protein Digestion Rate: Investigation of Underlying Mechanisms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (10): 2569-2576. http://dx.doi.org/10.1021/jf205280y

Bax, M.L.; Buffiere, C.; Hafnaoui, N.; Gaudichon, C.; Savary-Auzeloux, I.; Dardevet, D.; Sante-Lhoutellier, V.; Remond, D., 2013. Effects of Meat Cooking, and of Ingested Amount, on Protein Digestion Speed and Entry of Residual Proteins into the Colon: A Study in Minipigs. *Plos One*, 8 (4). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0061252

Beaudart, C.; Zaaria, M.; Pasleau, F.E.O.; Reginster, J.Y.; Bruyere, O., 2017. Health Outcomes of Sarcopenia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Plos One*, 12 (1). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0169548

Bechthold, A.; Boeing, H.; Schwedhelm, C.; Hoffmann, G.; Knuppel, S.; Iqbal, K.; De Henauw, S.; Michels, N.; Devleesschauwer, B.; Schlesinger, S.; Schwingshackl, L., 2019. Food groups and risk of coronary heart disease, stroke and heart failure: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. *Critical reviews in food science and nutrition*, 59 (7): 1071-1090. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2017.1392288

Benatar, J.R.; Sidhu, K.; Stewart, R.A.H., 2013. Effects of High and Low Fat Dairy Food on Cardio-Metabolic Risk Factors: A Meta-Analysis of Randomized Studies. *Plos One*, 8 (10). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0076480

Bhattacharyya, S.; Feferman, L.; Unterman, T.; Tobacman, J.K., 2015. Exposure to Common Food Additive Carrageenan Alone Leads to Fasting Hyperglycemia and in Combination with High Fat Diet Exacerbates Glucose Intolerance and Hyperlipidemia without Effect on Weight. *Journal of Diabetes Research*. http://dx.doi.org/10.1155/2015/513429

Bhattacharyya, S.; O-Sullivan, I.; Katyal, S.; Unterman, T.; Tobacman, J.K., 2012. Exposure to the common food additive carrageenan leads to glucose intolerance, insulin resistance and inhibition of insulin signalling in HepG2 cells and C57BL/6J mice. *Diabetologia*, 55 (1): 194-203. http://dx.doi.org/10.1007/s00125-011-2333-z

Bian, S.S.; Hu, J.M.; Zhang, K.; Wang, Y.G.; Yu, M.H.; Ma, J., 2018. Dairy product consumption and risk of hip fracture: a systematic review and meta-analysis. *Bmc Public Health*, 18. http://dx.doi.org/10.1186/s12889-018-5041-5

Bian, X.M.; Chi, L.; Gao, B.; Tu, P.C.; Ru, H.Y.; Lu, K., 2017. The artificial sweetener acesulfame potassium affects the gut microbiome and body weight gain in CD-1 mice. *Plos One*, 12 (6). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0178426

Bingham, S.A.; Hughes, R.; Cross, A.J., 2002. Effect of white versus red meat on endogenous N-nitrosation in the human colon and further evidence of a dose response. *Journal of Nutrition*, 132 (11): 3522S-3525S.

Black, M.M., 2008. Effects of B-12 and folate deficiency on brain development in children. *Food and Nutrition Bulletin*, 29 (2): S126-S131. http://dx.doi.org/10.1177/15648265080292s117

Block, G.A.; Ix, J.H.; Ketteler, M.; Martin, K.J.; Thadhani, R.I.; Tonelli, M.; Wolf, M.; Juppner, H.; Hruska, K.; Wheeler, D.C., 2013. Phosphate Homeostasis in CKD: Report of a Scientific Symposium Sponsored by the National Kidney Foundation. *American Journal of Kidney Diseases*, 62 (3): 457-473. http://dx.doi.org/10.1053/j.ajkd.2013.03.042

Bloom, I.; Shand, C.; Cooper, C.; Robinson, S.; Baird, J., 2018. Diet Quality and Sarcopenia in Older Adults: A Systematic Review. *Nutrients*, 10 (3). http://dx.doi.org/10.3390/nu10030308

Bolland, M.J.; Grey, A.; Avenell, A., 2018. Effects of vitamin D supplementation on musculoskeletal health: a systematic review, meta-analysis, and trial sequential analysis. *Lancet Diabetes & Endocrinology*, 6 (11): 847-858. http://dx.doi.org/10.1016/s2213-8587(18)30265-1

Bolland, M.J.; Leung, W.; Tai, V.; Bastin, S.; Gamble, G.D.; Grey, A.; Reid, I.R., 2015. Calcium intake and risk of fracture: systematic review. *Bmj-British Medical Journal*, 351. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.h4580

Bradlee, M.L.; Mustafa, J.; Singer, M.R.; Moore, L.L., 2018. High-Protein Foods and Physical Activity Protect Against Age-Related Muscle Loss and Functional Decline. *Journals of Gerontology Series a-Biological Sciences and Medical Sciences*, 73 (1): 88-94. http://dx.doi.org/10.1093/gerona/glx070

Brantsaeter, A.L.; Knutsen, H.K.; Johansen, N.C.; Nyheim, K.A.; Erlund, I.; Meltzer, H.M.; Henjum, S., 2018. Inadequate Iodine Intake in Population Groups Defined by Age, Life Stage and Vegetarian Dietary Practice in a Norwegian Convenience Sample. *Nutrients*, 10 (2). http://dx.doi.org/10.3390/nu10020230

Buffiere, C.; Gaudichon, C.; Hafnaoui, N.; Migne, C.; Scislowsky, V.; Khodorova, N.; Mosoni, L.; Blot, A.; Boirie, Y.; Dardevet, D.; Sante-Lhoutellier, V.; Remond, D., 2017. In the elderly, meat protein assimilation from rare meat is lower than that from meat that is well done. *American Journal of Clinical Nutrition*, 106 (5): 1257-1266. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.117.158113

Burdge, G.C.; Tan, S.Y.; Henry, C.J., 2017. Long-chain n-3 PUFA in vegetarian women: a metabolic perspective. *Journal of Nutritional Science*, 6. http://dx.doi.org/10.1017/jns.2017.62

Cao, L.; Tan, L.; Wang, H.F.; Jiang, T.; Zhu, X.C.; Lu, H.; Tan, M.S.; Yu, J.T., 2016. Dietary Patterns and Risk of Dementia: a Systematic Review and Meta-Analysis of Cohort Studies. *Molecular Neurobiology*, 53 (9): 6144-6154. http://dx.doi.org/10.1007/s12035-015-9516-4

Carpenter, C.E.; Mahoney, A.W., 1992. Contributions of heme and nonheme iron to human-nutrition. *Critical reviews in food science and nutrition*, 31 (4): 333-367. http://dx.doi.org/10.1080/10408399209527576

Cervantes-Pahm, S.K.; Liu, Y.H.; Stein, H.H., 2014. Digestible indispensable amino acid score and digestible amino acids in eight cereal grains. *British Journal of Nutrition*, 111 (9): 1663-1672. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114513004273

Chassaing, B.; Koren, O.; Goodrich, J.K.; Poole, A.C.; Srinivasan, S.; Ley, R.E.; Gewirtz, A.T., 2015. Dietary emulsifiers impact the mouse gut microbiota promoting colitis and metabolic syndrome. *Nature*, 519 (7541): 92-U192. http://dx.doi.org/10.1038/nature14232

Chassaing, B.; Van de Wiele, T.; De Bodt, J.; Marzorati, M.; Gewirtz, A.T., 2017. Dietary emulsifiers directly alter human microbiota composition and gene expression ex vivo potentiating intestinal inflammation. *Gut*, 66 (8): 1414-1427. http://dx.doi.org/10.1136/gutjnl-2016-313099

Chen, G.C.; Lv, D.B.; Pang, Z.; Liu, Q.F., 2013. Red and processed meat consumption and risk of stroke: a meta-analysis of prospective cohort studies. *European Journal of Clinical Nutrition*, 67 (1): 91-95. http://dx.doi.org/10.1038/ejcn.2012.180

CIRC, 2018. *Les cancers attribuables au mode de vie et à l'environnement en France métropolitaine*. Lyon: Centre international de recherche sur le cancer, OMS, Institut national du cancer, 271 p.

Clenin, G.E., 2017. The treatment of iron deficiency without anaemia (in otherwise healthy persons). *Swiss medical weekly*, 147. http://dx.doi.org/10.4414/smw.2017.14434

Coelho, H.J.; Milano-Teixeira, L.; Rodrigues, B.; Bacurau, R.; Marzetti, E.; Uchida, M., 2018. Relative Protein Intake and Physical Function in Older Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Nutrients*, 10 (9). http://dx.doi.org/10.3390/nu10091330

CREDOC, 2013. *Comportements et consommations alimentaires en France*. Paris: CREDOC.

CREDOC, 2016. *Comportements et consommations alimentaires en France*. Paris: CREDOC.

Cross, A.J.; Ferrucci, L.M.; Risch, A.; Graubard, B.I.; Ward, M.H.; Park, Y.; Hollenbeck, A.R.; Schatzkin, A.; Sinha, R., 2010. A Large Prospective Study of Meat Consumption and Colorectal Cancer Risk: An Investigation of Potential Mechanisms Underlying this Association. *Cancer Research*, 70 (6): 2406-2414. http://dx.doi.org/10.1158/0008-5472.can-09-3929

Cross, A.J.; Pollock, J.R.A.; Bingham, S.A., 2003. Haem, not protein or inorganic iron, is responsible for endogenous intestinal N-nitrosation arising from red meat. *Cancer Research*, 63 (10): 2358-2360.

Crowe, F.L.; Steur, M.; Allen, N.E.; Appleby, P.N.; Travis, R.C.; Key, T.J., 2011. Plasma concentrations of 25-hydroxyvitamin D in meat eaters, fish eaters, vegetarians and vegans: results from the EPIC-Oxford study. *Public Health Nutrition*, 14 (2): 340-346. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980010002454

Cruz-Jentoft, A.J.; Landi, F.; Schneider, S.M.; Zuniga, C.; Arai, H.; Boirie, Y.; Chen, L.K.; Fielding, R.A.; Martin, F.C.; Michel, J.P.; Sieber, C.; Stout, J.R.; Studenski, S.A.; Vellas, B.; Woo, J.; Zamboni, M.; Cederholm, T., 2014. Prevalence of and interventions for sarcopenia in ageing adults: a systematic review. Report of the International Sarcopenia Initiative (EWGSOP and IWGS). *Age and Ageing*, 43 (6): 748-759. http://dx.doi.org/10.1093/ageing/afu115

Daly, R.M.; O'Connell, S.L.; Mundell, N.L.; Grimes, C.A.; Dunstan, D.W.; Nowson, C.A., 2014. Protein-enriched diet, with the use of lean red meat, combined with progressive resistance training enhances lean tissue mass and muscle strength and reduces circulating IL-6 concentrations in elderly women: a cluster randomized controlled trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, 99 (4): 899-910. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.113.064154

Dardevet, D.; Remond, D.; Peyron, M.A.; Papet, I.; Savary-Auzeloux, I.; Mosoni, L., 2012. Muscle Wasting and Resistance of Muscle Anabolism: The "Anabolic Threshold Concept" for Adapted Nutritional Strategies during Sarcopenia. *Scientific World Journal*. http://dx.doi.org/10.1100/2012/269531

David, S.; Levi, C.S.; Fahoum, L.; Ungar, Y.; Meyron-Holtz, E.G.; Shpigelman, A.; Lesmes, U., 2018. Revisiting the carrageenan controversy: do we really understand the digestive fate and safety of carrageenan in our foods? *Food & Function*, 9 (3): 1344-1352. http://dx.doi.org/10.1039/c7fo01721a

Daviglus, M.L.; Plassman, B.L.; Pirzada, A.; Bell, C.C.; Bowen, P.E.; Burke, J.R.; Connolly, E.S.; Dunbar-Jacob, J.M.; Granieri, E.C.; McCarty, K.; Patel, D.; Trevisan, M.; Williams, J.W., 2011. Risk Factors and Preventive Interventions for Alzheimer Disease State of the Science. *Archives of Neurology*, 68 (9): 1185-1190. http://dx.doi.org/10.1001/archneurol.2011.100

de Gavelle, E.; Huneau, J.F.; Bianchi, C.M.; Verger, E.O.; Mariotti, F., 2017. Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients*, 9 (12). http://dx.doi.org/10.3390/nu9121333

Dehghan, M.; Mente, A.; Rangarajan, S.; Sheridan, P.; Mohan, V.; Iqbal, R.; Gupta, R.; Lear, S.; Wentzel-Viljoen, E.; Avezum, A.; Lopez-Jaramillo, P.; Mony, P.; Varma, R.P.; Kumar, R.; Chifamba, J.; Alhabib, K.F.; Mohammadifard, N.; Oguz, A.; Lanas, F.; Rozanska, D.; Bostrom, K.B.; Yusoff, K.; Tsolkile, L.P.; Dans, A.; Yusufali, A.; Orlandini, A.; Poirier, P.; Khatib, R.; Hu, B.; Wei, L.; Yin, L.; Deeraili, A.; Yeates, K.; Yusuf, R.; Ismail, N.; Mozaffarian, D.; Teo, K.; Anand, S.S.; Yusuf, S.; Prospective Urban Rural, E., 2018. Association of dairy intake with cardiovascular disease and mortality in 21 countries from five continents (PURE): a prospective cohort study. *Lancet*, 392 (10161): 2288-2297. http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31812-9

del Olmo, A.; Calzada, J.; Nunez, M., 2017. Benzoic acid and its derivatives as naturally occurring compounds in foods and as additives: Uses, exposure, and controversy. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57 (14): 3084-3103. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2015.1087964

Denova-Gutierrez, E.; Mendez-Sanchez, L.; Munoz-Aguirre, P.; Tucker, K.L.; Clark, P., 2018. Dietary Patterns, Bone Mineral Density, and Risk of Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*, 10 (12). http://dx.doi.org/10.3390/nu10121922

Dervilly-Pinel, G.; Guerin, T.; Minvielle, B.; Travel, A.; Normand, J.; Bourin, M.; Royer, E.; Dubreil, E.; Mompelat, S.; Hommet, F.; Nicolas, M.; Hort, V.; Inthavong, C.; Saint-Hilaire, M.; Chafey, C.; Parinet, J.; Cariou, R.; Marchand, P.; Le Bizec, B.; Verdon, E.; Engel, E., 2017. Micropollutants and chemical residues in organic and conventional meat. *Food Chemistry*, 232: 218-228. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.013

Dhingra, R.; Sullivan, L.M.; Fox, C.S.; Wang, T.J.; D'Agostino, R.B.; Gaziano, J.M.; Vasan, R.S., 2007. Relations of serum phosphorus and calcium levels to the incidence of cardiovascular disease in the community. *Archives of Internal Medicine*, 167 (9): 879-885. http://dx.doi.org/10.1001/archinte.167.9.879

Doaei, S.; Hajiesmaeil, M.; Aminifard, A.; Mosavi-Jarrahi, S.A.; Akbari, M.E.; Gholamalizadeh, M., 2018. Effects of gene polymorphisms of metabolic enzymes on the association between red and processed meat consumption and the development of colon cancer; a literature review. *Journal of Nutritional Science*, 7: e26. http://dx.doi.org/10.1017/jns.2018.17

Duchene, C.; Gandemer, G., 2016. Valeurs nutritionnelles des viandes : Effets de la cuisson sur la composition des viandes. *Viandes & Produits carnés*, 32 (3-5): 1-7.

Endo, H.; Iijima, K.; Asanuma, K.; Ara, N.; Ito, H.; Asano, N.; Uno, K.; Koike, T.; Imatani, A.; Shimosegawa, T., 2010. Exogenous luminal nitric oxide exposure accelerates columnar transformation of rat esophagus. *International Journal of Cancer*, 127 (9): 2009-2019. http://dx.doi.org/10.1002/ijc.25227

Engberink, M.F.; Hendriksen, M.A.H.; Schouten, E.G.; van Rooij, F.J.A.; Hofman, A.; Witteman, J.C.M.; Geleijnse, J.M., 2009. Inverse association between dairy intake and hypertension: the Rotterdam Study. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89 (6): 1877-1883. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.2008.27064

Esposito, K.; Chiodini, P.; Maiorino, M.I.; Bellastella, G.; Panagiotakos, D.; Giugliano, D., 2014. Which diet for prevention of type 2 diabetes? A meta-analysis of prospective studies. *Endocrine*, 47 (1): 107-116. http://dx.doi.org/10.1007/s12020-014-0264-4

Etemadi, A.; Sinha, R.; Ward, M.H.; Graubard, B.I.; Inoue-Choi, M.; Dawsey, S.M.; Abnet, C.C., 2017. Mortality from different causes associated with meat, heme iron, nitrates, and nitrites in the NIH-AARP Diet and Health Study: population based cohort study. *Bmj-British Medical Journal*, 357. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.j1957

European Food Safety Authority, 2016. Report for 2014 on the results from the monitoring of veterinary medicinal product residues and other substances in live animals and animal products. *EFSA Supporting Publications*, 13 (5): 923E. http://dx.doi.org/10.2903/sp.efsa.2016.EN-923

Evenepoel, P.; Geypens, B.; Luypaerts, A.; Hiele, M.; Ghoos, Y.; Rutgeerts, P., 1998. Digestibility of cooked and raw egg protein in humans as assessed by stable isotope techniques. *Journal of Nutrition*, 128 (10): 1716-1722. http://dx.doi.org/10.1093/jn/128.10.1716

FAO, 2011. *Global food losses and food waste–Extent, causes and prevention*. Roma: FAO, SAVE FOOD: An initiative on Food Loss and Waste Reduction, 29 p. http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf

FAO, 2013. *Dietary protein quality evaluation in human nutrition*. Rome: Food and Agriculture Organisation, FAO Food and Nutrition Paper, 92, 66 p. http://www.fao.org/3/a-i3124e.pdf

FAO; WHO, 2011. *Codex Alimentarius: general standard for food additives : Codex Stan 192-1995*. (*Codex Alimentarius: general standard for food additives.*). http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/gsfa/en/

Fattore, E.; Massa, E., 2018. Dietary fats and cardiovascular health: a summary of the scientific evidence and current debate. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 69 (8): 916-927. http://dx.doi.org/10.1080/09637486.2018.1455813

Feskanich, D.; Meyer, H.E.; Fung, T.T.; Bischoff-Ferrari, H.A.; Willett, W.C., 2018. Milk and other dairy foods and risk of hip fracture in men and women. *Osteoporosis International*, 29 (2): 385-396. http://dx.doi.org/10.1007/s00198-017-4285-8

Figueiredo, A.; Gomes, I.S.; Silva, R.B.; Pereira, P.P.S.; Da Mata, F.A.F.; Lyrio, A.O.; Souza, E.S.; Cruz, S.S.; Pereira, M.G., 2018. Maternal Anemia and Low Birth Weight: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*, 10 (5). http://dx.doi.org/10.3390/nu10050601

Fogelholm, M.; Anderssen, S.; Gunnarsdottir, I.; Lahti-Koski, M., 2012. Dietary macronutrients and food consumption as determinants of long-term weight change in adult populations: a systematic literature review. *Food & Nutrition Research*, 56. http://dx.doi.org/10.3402/fnr.v56i0.19103

Foster, M.; Chu, A.; Petocz, P.; Samman, S., 2013. Effect of vegetarian diets on zinc status: a systematic review and meta-analysis of studies in humans. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (10): 2362-2371. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6179

Fournet, I.; Roudaut, B., 2015. Brève. Les plans de contrôles et de surveillance nationaux en filière bovine pour la recherche de résidus d'antibiotiques. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation*, 68 (n° spécial "Vigilance sur la chaïne alimentaire"): 35-36. https://be.anses.fr/sites/default/files/BEP-mg-BE68-art11.pdf

Gaffney-Stomberg, E., 2019. The Impact of Trace Minerals on Bone Metabolism. *Biological Trace Element Research*, 188 (1): 26-34. http://dx.doi.org/10.1007/s12011-018-1583-8

Gamage, S.M.K.; Dissabandara, L.; Lam, A.K.Y.; Gopalan, V., 2018. The role of heme iron molecules derived from red and processed meat in the pathogenesis of colorectal carcinoma. *Critical Reviews in Oncology Hematology*, 126: 121-128. http://dx.doi.org/10.1016/j.critrevonc.2018.03.025

Geiker, N.R.W.; Larsen, M.L.; Dyerberg, J.; Stender, S.; Astrup, A., 2018. Egg consumption, cardiovascular diseases and type 2 diabetes. *European Journal of Clinical Nutrition*, 72 (1): 44-56. http://dx.doi.org/10.1038/ejcn.2017.153

Gershuni, V.M., 2018. Saturated Fat: Part of a Healthy Diet. *Current Nutrition Reports*, 7 (3): 85–96. http://dx.doi.org/10.1007/s13668-018-0238-x

Gholami, F.; Khoramdad, M.; Esmailnasab, N.; Moradi, G.; Nouri, B.; Safiri, S.; Alimohamadi, Y., 2017. The effect of dairy consumption on the prevention of cardiovascular diseases: A meta-analysis of prospective studies. *Journal of Cardiovascular and Thoracic Research*, 9 (1): 1-11. http://dx.doi.org/10.15171/jcvtr.2017.01

Gholami, M.; Faraji, Z.; Zamiri, M.J., 2012. Effect of egg yolk of four avian species on the cryopreserved ram spermatozoa. *Iranian Journal of Veterinary Research*, 13 (1): 23-27.

Gijsbers, L.; Ding, E.L.; Malik, V.S.; de Goede, J.; Geleijnse, J.M.; Soedamah-Muthu, S.S., 2016. Consumption of dairy foods and diabetes incidence: a dose-response meta-analysis of observational studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 103 (4): 1111-1124. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.115.123216

Gilsing, A.M.J.; Berndt, S.I.; Ruder, E.H.; Graubard, B.I.; Ferrucci, L.M.; Burdett, L.; Weissfeld, J.L.; Cross, A.J.; Sinha, R., 2012. Meat-related mutagen exposure, xenobiotic metabolizing gene polymorphisms and the risk of advanced colorectal adenoma and cancer. *Carcinogenesis*, 33 (7): 1332-1339. http://dx.doi.org/10.1093/carcin/bgs158

Good, I.J., 1979. Studies in the history of probability and statistics .37. Turing,A.M. statistical work in world-war-2. *Biometrika*, 66 (2): 393-396. http://dx.doi.org/10.1093/biomet/66.2.393

Greig, J.D.; Ravel, A., 2009. Analysis of foodborne outbreak data reported internationally for source attribution. *International Journal of Food Microbiology*, 130 (2): 77-87. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.12.031

Griffith, L.E.; Guyatt, G.H.; Cook, R.J.; Bucher, H.C.; Cook, D.J., 1999. The influence of dietary and nondietary calcium supplementation on blood pressure - An updated metaanalysis of randomized controlled trials. *American journal of hypertension*, 12 (1): 84-92. http://dx.doi.org/10.1016/s0895-7061(98)00224-6

Guo, J.; Astrup, A.; Lovegrove, J.A.; Gijsbers, L.; Givens, D.I.; Soedamah-Muthu, S.S., 2017. Milk and dairy consumption and risk of cardiovascular diseases and all-cause mortality: dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *European Journal of Epidemiology*, 32 (4): 269-287. http://dx.doi.org/10.1007/s10654-017-0243-1

Haider, L.M.; Schwingshackl, L.; Hoffmann, G.; Ekmekcioglu, C., 2018. The effect of vegetarian diets on iron status in adults: A systematic review and meta-analysis. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58 (8): 1359-1374. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2016.1259210

Hamley, S., 2017. The effect of replacing saturated fat with mostly n-6 polyunsaturated fat on coronary heart disease: a meta-analysis of randomised controlled trials. *Nutrition Journal*, 16. http://dx.doi.org/10.1186/s12937-017-0254-5

Han, M.A.; Zeraatkar, D.; Guyatt, G.H.; Vernooij, R.W.M.; El Dib, R.; Zhang, Y.; Algarni, A.; Leung, G.H.; Storman, D.; Valli, C.; Rabassa, M.; Rehman, N.; Parvizian, M.K.; Zworth, M.; Bartoszko, J.J.; Lopes, L.C.; Sit, D.; Bala, M.M.; Alonso-Coello, P.; Johnston, B.C., 2019. Reduction of Red and Processed Meat Intake and Cancer Mortality and Incidence: A Systematic Review and Meta-analysis of Cohort Studies. *Annals of Internal Medicine*, 171 (10): 711-720. http://dx.doi.org/10.7326/M19-0699

Hansen, T.H.; Madsen, M.T.B.; Jorgensen, N.R.; Cohen, A.S.; Hansen, T.; Vestergaard, H.; Pedersen, O.; Allin, K.H., 2018. Bone turnover, calcium homeostasis, and vitamin D status in Danish vegans. *European Journal of Clinical Nutrition*, 72 (7): 1046-1054. http://dx.doi.org/10.1038/s41430-017-0081-y

Haub, M.D.; Wells, A.M.; Tarnopolsky, M.A.; Campbell, W.W., 2002. Effect of protein source on resistive-training-induced changes in body composition and muscle size in older men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76 (3): 511-517. http://dx.doi.org/10.1093/ajcn/76.3.511

Haut conseil de la santé publique, 2017. *Avis relatif à la révision des repères alimentaires pour les adultes du futur : programme national nutrition santé 2017-2021*. Paris: HCSP, 7 p.

Hercberg, S.; Castetbon, K.; Czernichow, S.; Malon, A.; Mejean, C.; Kesse-Guyot, E.; Touvier, M.; Galan, P., 2010. The Nutrinet-Sante Study: a web-based prospective study on the relationship between nutrition and health and determinants of dietary patterns and nutritional status. *Bmc Public Health*, 10. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2458-10-242

Hibbeln, J.R.; Northstone, K.; Evans, J.; Golding, J., 2018. Vegetarian diets and depressive symptoms among men. *J Affect Disord*, 225: 13-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.jad.2017.07.051

Hodgkinson, S.M.; Montoya, C.A.; Scholten, P.T.; Rutherfurd, S.M.; Moughan, P.J., 2018. Cooking Conditions Affect the True Ileal Digestible Amino Acid Content and Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) of Bovine Meat as Determined in Pigs. *Journal of Nutrition*, 148 (10): 1564-1569. http://dx.doi.org/10.1093/jn/nxy153

Hodgson, J.M.; Burke, V.; Beilin, L.J.; Puddey, I.B., 2006. Partial substitution of carbohydrate intake with protein intake from lean red meat lowers blood pressure in hypertensive persons. *American Journal of Clinical Nutrition*, 83 (4): 780-787.

Hoffmann, S.; Batz, M.B.; Morris, J.G., Jr., 2012. Annual cost of illness and quality-adjusted life year losses in the United States due to 14 foodborne pathogens. *Journal of Food Protection*, 75 (7): 1292-302. http://dx.doi.org/10.4315/0362-028x.Jfp-11-417

Hoffmann, S.; Devleesschauwer, B.; Aspinall, W.; Cooke, R.; Corrigan, T.; Havelaar, A.; Angulo, F.J.; Gibb, H.; Kirk, M.; Lake, R.; Speybroeck, N.; Torgerson, P.; Hald, T., 2017. Attribution of global foodborne disease to specific foods: Findings from a World Health Organization structured expert elicitation. *Plos One*, 12 (9): e0183641. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0183641

Holder, M.K.; Chassaing, B., 2018. Impact of food additives on the gut-brain axis. *Physiology & Behavior*, 192: 173-176. http://dx.doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.02.025

Hong, S.H.; Park, S.J.; Lee, S.; Kim, S.; Cho, M.H., 2015. Biological effects of inorganic phosphate: potential signal of toxicity. *Journal of Toxicological Sciences*, 40 (1): 55-69. http://dx.doi.org/10.2131/jts.40.55

Hruby, A.; Hu, F.B., 2015. The Epidemiology of Obesity: A Big Picture. *Pharmacoeconomics*, 33 (7): 673-689. http://dx.doi.org/10.1007/s40273-014-0243-x

Hurrell, R.; Egli, I., 2010. Iron bioavailability and dietary reference values. *American Journal of Clinical Nutrition*, 91 (5): 1461S-1467S. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.2010.28674F

IFSAC, 2015. *Foodborne Illness Source Attribution Estimates for Salmonella, Escherichia coli O157 (E. coli O157), Listeria monocytogenes (Lm), and Campylobacter using Outbreak Surveillance Data*, 12 p. http://www.fsis.usda.gov/wps/wcm/connect/df7eebf6-911c-47c4-aee6-36b60ea04663/IFSAC-Project-Report-022415.pdf?MOD=AJPERES

Iguacel, I.; Miguel-Berges, M.L.; Gomez-Bruton, A.; Moreno, L.A.; Julian, C., 2019. Veganism, vegetarianism, bone mineral density, and fracture risk: a systematic review and meta-analysis. *Nutrition Reviews*, 77 (1): 1-18. http://dx.doi.org/10.1093/nutrit/nuy045

International Diabetes Federation, 2015. *IDF Diabetes Atlas. Seventh Edition*: International Diabetes Federation, 142 p.

InVS, 2015. *Données épidémiologiques des infections à Campylobacter en France. InVS. Données épidémiologiques des infections à Campylobacter en France*.

Irwin, S.V.; Fisher, P.; Graham, E.; Malek, A.; Robidoux, A., 2017. Sulfites inhibit the growth of four species of beneficial gut bacteria at concentrations regarded as safe for food. *Plos One*, 12 (10). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0186629

Jackson, J.; Williams, R.; McEvoy, M.; MacDonald-Wicks, L.; Patterson, A., 2016. Is Higher Consumption of Animal Flesh Foods Associated with Better Iron Status among Adults in Developed Countries? A Systematic Review. *Nutrients*, 8 (2): 89. http://dx.doi.org/10.3390/nu8020089

Johnston, B.C.; Zeraatkar, D.; Han, M.A.; Vernooij, R.W.M.; Valli, C.; El Dib, R.; Marshall, C.; Stover, P.J.; Fairweather-Taitt, S.; Wójcik, G.; Bhatia, F.; de Souza, R.J.; Brotons, C.; Meerpohl, J.J.; Patel, C.J.; Djulbegovic, B.; Alonso-Coello, P.; Bala, M.M.; Guyatt, G.H., 2019. Unprocessed Red Meat and Processed Meat Consumption: Dietary Guideline Recommendations From the Nutritional Recommendations (NutriRECS) Consortium. *Annals of Internal Medicine*. http://dx.doi.org/10.7326/m19-1621

Kaluza, J.; Wolk, A.; Larsson, S.C., 2012. Red Meat Consumption and Risk of Stroke A Meta-Analysis of Prospective Studies. *Stroke*, 43 (10): 2556-2560. http://dx.doi.org/10.1161/strokeaha.112.663286

Kaluza, J.; Wolk, A.; Larsson, S.C., 2013. Heme Iron Intake and Risk of Stroke A Prospective Study of Men. *Stroke*, 44 (2): 334-+. http://dx.doi.org/10.1161/strokeaha.112.679662

Kemi, V.E.; Rita, H.J.; Karkkainen, M.U.M.; Viljakainen, H.T.; Laaksonen, M.M.; Outila, T.A.; Lamberg-Allardt, C.J.E., 2009. Habitual high phosphorus intakes and foods with phosphate additives negatively affect serum parathyroid hormone concentration: a cross-sectional study on healthy premenopausal women. *Public Health Nutrition*, 12 (10): 1885-1892. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980009004819

Kim, K.; Hyeon, J.; Lee, S.A.; Kwon, S.O.; Lee, H.; Keum, N.; Lee, J.K.; Park, S.M., 2017. Role of Total, Red, Processed, and White Meat Consumption in Stroke Incidence and Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies. *Journal of the American Heart Association*, 6 (9): e005983. http://dx.doi.org/10.1161/jaha.117.005983

Kirk, M.D.; Pires, S.M.; Black, R.E.; Caipo, M.; Crump, J.A.; Devleesschauwer, B.; Döpfer, D.; Fazil, A.; Fischer-Walker, C.L.; Hald, T.; Hall, A.J.; Keddy, K.H.; Lake, R.J.; Lanata, C.F.; Torgerson, P.R.; Havelaar, A.; Angulo, F.J., 2015. World Health

Organization Estimates of the Global and Regional Disease Burden of 22 Foodborne Bacterial, Protozoal, and Viral Diseases, 2010: A Data Synthesis. *PLOS Medicine*, 12 (12): e1001921. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pmed.1001921

Klop, C.; van Staa, T.P.; Cooper, C.; Harvey, N.C.; de Vries, F., 2017. The epidemiology of mortality after fracture in England: variation by age, sex, time, geographic location, and ethnicity. *Osteoporosis International*, 28 (1): 161-168. http://dx.doi.org/10.1007/s00198-016-3787-0

Kocamaz, E.; Adiguzel, E.; Buket, E.R.; Gundogdu, G.; Kucukatay, V., 2012. Sulfite leads to neuron loss in the hippocampus of both normal and SOX-deficient rats. *Neurochemistry International*, 61 (3): 341-346. http://dx.doi.org/10.1016/j.neuint.2012.06.010

Krajcovicova-Kudlackova, M.; Buckova, K.; Klimes, I.; Sebokova, E., 2003. Iodine deficiency in vegetarians and vegans. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 47 (5): 183-185. http://dx.doi.org/10.1159/000070483

Kris-Etherton, P.M.; Harris, W.S.; Appel, L.J.; Nutrition, C., 2002. Fish consumption, fish oil, omega-3 fatty acids, and cardiovascular disease. *Circulation*, 106 (21): 2747-2757. http://dx.doi.org/10.1161/01.cir.0000038493.65177.94

Kuang, H.Q.; Yang, F.; Zhang, Y.; Wang, T.N.; Chen, G.X., 2018. The Impact of Egg Nutrient Composition and Its Consumption on Cholesterol Homeostasis. *Cholesterol*: 6303810. http://dx.doi.org/10.1155/2018/6303810

Kuhnle, G.G.C.; Bingham, S.A., 2007. Dietary meat, endogenous nitrosation and colorectal cancer. *Biochemical Society Transactions*, 35: 1355-1357. http://dx.doi.org/10.1042/bst0351355

Kuhnle, G.G.C.; Story, G.W.; Reda, T.; Mani, A.R.; Moore, K.P.; Lunn, J.C.; Bingham, S.A., 2007. Diet-induced endogenous formation of nitroso compounds in the GI tract. *Free Radical Biology and Medicine*, 43 (7): 1040-1047. http://dx.doi.org/10.1016/j.freeadbiomed.2007.03.011

Kuroiwa, Y.; Okamura, T.; Ishii, Y.; Umemura, T.; Tasaki, M.; Kanki, K.; Mitsumori, K.; Hirose, M.; Nishikawa, A., 2008. Enhancement of esophageal carcinogenesis in acid reflux model rats treated with ascorbic acid and sodium nitrite in combination with or without initiation. *Cancer Science*, 99 (1): 7-13. http://dx.doi.org/10.1111/j.1349-7006.2007.00649.x

Lacroix, M.; Bon, C.; Bos, C.; Leonil, J.; Benamouzig, R.; Luengo, C.; Fauquant, J.; Tome, D.; Gaudichon, C., 2008. Ultra High Temperature Treatment, but Not Pasteurization, Affects the Postprandial Kinetics of Milk Proteins in Humans. *Journal of Nutrition*, 138 (12): 2342-2347. http://dx.doi.org/10.3945/jn.108.096990

Lacroix, M.; Leonil, J.; Bos, C.; Henry, G.; Airinei, G.; Fauquant, J.; Tome, D.; Gaudichon, C., 2006. Heat markers and quality indexes of industrially heat-treated N-15 milk protein measured in rats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (4): 1508-1517. http://dx.doi.org/10.1021/jf051304d

Laird, E.; Molloy, A.M.; McNulty, H.; Ward, M.; McCarroll, K.; Hoey, L.; Hughes, C.F.; Cunningham, C.; Strain, J.J.; Casey, M.C., 2017. Greater yogurt consumption is associated with increased bone mineral density and physical function in older adults. *Osteoporosis International*, 28 (8): 2409-2419. http://dx.doi.org/10.1007/s00198-017-4049-5

Landi, F.; Calvani, R.; Tosato, M.; Martone, A.M.; Picca, A.; Ortolani, E.; Savera, G.; Salini, S.; Ramaschi, M.; Bernabei, R.; Marzetti, E., 2017. Animal-derived protein consumption is associated with muscle mass and strength in community-dwellers: Results from the Milan Expo survey. *Journal of Nutrition Health & Aging*, 21 (9): 1050-1056. http://dx.doi.org/10.1007/s12603-017-0974-4

Larsson, S.C.; Orsini, N., 2011. Fish consumption and the risk of stroke: a dose-response meta-analysis. *Stroke*, 42 (12): 3621-3623. http://dx.doi.org/10.1161/strokeaha.111.630319

Lau, K.; McLean, W.G.; Williams, D.P.; Howard, C.V., 2006. Synergistic interactions between commonly used food additives in a developmental neurotoxicity test. *Toxicological Sciences*, 90 (1): 178-187. http://dx.doi.org/10.1093/toxsci/kfj073

Lee, J.Y.; Sim, T.B.; Lee, J.E.; Na, H.K., 2017. Chemopreventive and Chemotherapeutic Effects of Fish Oil derived Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids on Colon Carcinogenesis. *Clinical nutrition research*, 6 (3): 147-160. http://dx.doi.org/10.7762/cnr.2017.6.3.147

Lehert, P.; Villaseca, P.; Hogervorst, E.; Maki, P.M.; Henderson, V.W., 2015. Individually modifiable risk factors to ameliorate cognitive aging: a systematic review and meta-analysis. *Climacteric*, 18 (5): 678-689. http://dx.doi.org/10.3109/13697137.2015.1078106

Leung, A.M.; LaMar, A.; He, X.M.; Braverman, L.E.; Pearce, E.N., 2011. Iodine Status and Thyroid Function of Boston-Area Vegetarians and Vegans. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 96 (8): E1303-E1307. http://dx.doi.org/10.1210/jc.2011-0256

Leung Yinko, S.S.; Stark, K.D.; Thanassoulis, G.; Pilote, L., 2014. Fish consumption and acute coronary syndrome: a meta-analysis. *American Journal of Medicine*, 127 (9): 848-57 e2. http://dx.doi.org/10.1016/j.amjmed.2014.04.016

Li, X.; Lei, T.; Tang, Z.H.; Dong, J.C., 2017. Analyzing the association between fish consumption and osteoporosis in a sample of Chinese men. *Journal of Health Population and Nutrition*, 36. http://dx.doi.org/10.1186/s41043-017-0088-y

Li, Y.; Zhou, C.; Zhou, X.; Li, L., 2013a. Egg consumption and risk of cardiovascular diseases and diabetes: a meta-analysis. *Atherosclerosis*, 229 (2): 524-530. http://dx.doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2013.04.003

Li, Y.H.; Zhou, C.H.; Pei, H.J.; Zhou, X.L.; Li, L.H.; Wu, Y.J.; Hui, R.T., 2013b. Fish consumption and incidence of heart failure: a meta-analysis of prospective cohort studies. *Chinese medical journal*, 126 (5): 942-948.

Lilla, C.; Verla-Tebit, E.; Risch, A.; Jager, B.; Hoffmeister, M.; Brenner, H.; Chang-Claude, J., 2006. Effect of NAT1 and NAT2 genetic polymorphisms on colorectal cancer risk associated with exposure to tobacco smoke and meat consumption. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, 15 (1): 99-107. http://dx.doi.org/10.1158/1055-9965.epi-05-0618

Machha, A.; Schechter, A.N., 2011. Dietary nitrite and nitrate: a review of potential mechanisms of cardiovascular benefits. *European Journal of Nutrition*, 50 (5): 293-303. http://dx.doi.org/10.1007/s00394-011-0192-5

Mangen, M.J.; Batz, M.B.; Käsbohrer, A.; Hald, T.; Morris, J.G.; Taylor, M.; Havelaar, A., 2010. Integrated approaches for the public health prioritization of foodborne and zoonotic pathogens. *Risk Analysis*, 30 (5): 782-797. http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01291.x

Mann, C.J., 2003. Observational research methods. Research design II: cohort, cross sectional, and case-control studies. *Emergency Medicine Journal*, 20 (1): 54-60. http://dx.doi.org/10.1136/emj.20.1.54

Martin, B.; Graulet, B.; Uijttewaal, A.; Ferlay, A.; Coppa, M.; Remond, D., 2019. Contribution of dairy products to dietary intakes and the influence of dairy cow forage. *Fourrages*, (239): 193-202.

Martin, P.; Bladier, C.; Meek, B.; Bruyere, O.; Feinblatt, E.; Touvier, M.; Watier, L.; Makowski, D., 2018. Weight of Evidence for Hazard Identification: A Critical Review of the Literature. *Environmental Health Perspectives*, 126 (7). http://dx.doi.org/10.1289/ehp3067

Martino, J.V.; Van Limbergen, J.; Cahill, L.E., 2017. The Role of Carrageenan and Carboxymethylcellulose in the Development of intestinal inflammation. *Frontiers in Pediatrics*, 5. http://dx.doi.org/10.3389/fped.2017.00096

Mast, C.; Dardevet, D.; Papet, I., 2018. Impact of medication on protein and amino acid metabolism in the elderly: the sulfur amino acid and paracetamol case. *Nutrition Research Reviews*, 31 (2): 179-192. http://dx.doi.org/10.1017/s0954422418000021

Mayhew, A.J.; de Souza, R.J.; Meyre, D.; Anand, S.S.; Mente, A., 2016. A systematic review and meta-analysis of nut consumption and incident risk of CVD and all-cause mortality. *British Journal of Nutrition*, 115 (2): 212-225. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114515004316

McCann, D.; Barrett, A.; Cooper, A.; Crumpler, D.; Dalen, L.; Grimshaw, K.; Kitchin, E.; Lok, K.; Porteous, L.; Prince, E.; Sonuga-Barke, E.J.S.; Warner, J.O.; Stevenson, J., 2007. Food additives and hyperactive behaviour in 3-year-old and 8/9-year-old children in the community: a randomised, double-blinded, placebo-controlled trial. *Lancet*, 370 (9598): 1560-1567. http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736(07)61306-3

McCarty, M.F.; DiNicolantonio, J.J., 2014. Bioavailable dietary phosphate, a mediator of cardiovascular disease, may be decreased with plant-based diets, phosphate binders, niacin, and avoidance of phosphate additives. *Nutrition*, 30 (7-8): 739-747. http://dx.doi.org/10.1016/j.nut.2013.12.010

McLean, E.; Cogswell, M.; Egli, I.; Woidyla, D.; de Benoist, B., 2009. Worldwide prevalence of anaemia, WHO Vitamin and Mineral Nutrition Information System, 1993-2005. *Public Health Nutrition*, 12 (4): 444-454. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980008002401

Melaku, Y.A.; Gill, T.K.; Appleton, S.L.; Taylor, A.W.; Adams, R.; Shi, Z.M., 2017. Prospective Associations of Dietary and Nutrient Patterns with Fracture Risk: A 20-Year Follow-Up Study. *Nutrients*, 9 (11). http://dx.doi.org/10.3390/nu9111198

Menard, C.; Heraud, F.; Volatier, J.L.; Leblanc, J.C., 2008. Assessment of dietary exposure of nitrate and nitrite in France. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 25 (8): 971-988. http://dx.doi.org/10.1080/02652030801946561

Mendonca, N.; Granic, A.; Hill, T.R.; Siervo, M.; Mathers, J.C.; Kingston, A.; Jagger, C., 2019. Protein Intake and Disability Trajectories in Very Old Adults: The Newcastle 85+Study. *Journal of the American Geriatrics Society*, 67 (1): 50-56. http://dx.doi.org/10.1111/jgs.15592

Meneton, P.; Jeunemaitre, X.; De Wardener, H.E.; Macgregor, G.A., 2005. Links between dietary salt intake, renal salt handling, blood pressure, and cardiovascular diseases. *Physiological Reviews*, 85 (2): 679-715. http://dx.doi.org/10.1152/physrev.00056.2003

Micha, R.; Wallace, S.K.; Mozaffarian, D., 2010. Red and Processed Meat Consumption and Risk of Incident Coronary Heart Disease, Stroke, and Diabetes Mellitus A Systematic Review and Meta-Analysis. *Circulation*, 121 (21): 2271-U52. http://dx.doi.org/10.1161/circulationaha.109.924977

Milard, M.; Laugerette, F.; Bugeat, S.; Plaisancie, P.; Letisse, M.; Meugnier, E.; Loizon, E.; Durand, A.; Buisson, C.; Geloen, A.; Serieye, S.; Michalski, M.C., 2018. Metabolic effects in mice of cream formulation: Addition of both thickener and emulsifier does not alter lipid metabolism but modulates mucus cells and intestinal endoplasmic reticulum stress. *Journal of Dairy Science*, 101 (12): 10649-10663. http://dx.doi.org/10.3168/jds.2018-14783

Milman, N.; Taylor, C.L.; Merkel, J.; Brannon, P.M., 2017. Iron status in pregnant women and women of reproductive age in Europe. *American Journal of Clinical Nutrition*, 106 (6): 1655S-1662S. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.117.156000

Moretti, D., 2017. *Plant-Based Diets and Iron Status*. London: Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd (*Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*). http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803968-7.00039-3

Morris, M.S.; Jacques, P.F., 2013. Total protein, animal protein and physical activity in relation to muscle mass in middle-aged and older Americans. *British Journal of Nutrition*, 109 (7): 1294-1303. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114512003133

Mortensen, A.; Aguilar, F.; Crebelli, R.; Di Domenico, A.; Dusemund, B.; Frutos, M.J.; Galtier, P.; Gott, D.; Gundert-Remy, U.; Lambre, C.; Leblanc, J.C.; Lindtner, O.; Moldeus, P.; Mosesso, P.; Oskarsson, A.; Parent-Massin, D.; Stankovic, I.; Waalkens-Berendsen, I.; Woutersen, R.A.; Wright, M.; van den Brandt, P.; Fortes, C.; Merino, L.; Toldra, F.; Arcella, D.; Christodoulidou, A.; Abrahantes, J.C.; Barrucci, F.; Garcia, A.; Pizzo, F.; Battacchi, D.; Younes, M., 2017. Re-evaluation of potassium nitrite (E 249) and sodium nitrite (E 250) as food additives. *Efsa Journal*, 15 (6). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4786

Mourot, J.; de Tonnac, A.; Minvielle, B., 2018. Qualité de la viande de porc. In: (coord.), B.V., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui).

Mugnai, C.; Sossidou, E.N.; Dal Bosco, A.; Ruggeri, S.; Mattioli, S.; Castellini, C., 2014. The effects of husbandry system on the grass intake and egg nutritive characteristics of laying hens. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94 (3): 459-467. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.6269

Muscaritoli, M.; Anker, S.D.; Argiles, J.; Aversa, Z.; Bauer, J.M.; Biolo, G.; Boirie, Y.; Bosaeus, I.; Cederholm, T.; Costelli, P.; Fearon, K.C.; Laviano, A.; Maggio, M.; Fanelli, F.R.; Schneider, S.M.; Schols, A.; Sieber, C.C., 2010. Consensus definition of sarcopenia, cachexia and pre-cachexia: Joint document elaborated by Special Interest Groups (SIG) "cachexia-anorexia in chronic wasting diseases" and "nutrition in geriatrics". *Clinical Nutrition*, 29 (2): 154-159. http://dx.doi.org/10.1016/j.clnu.2009.12.004

Nair, B., 2001. Final report on the safety assessment of Benzyl Alcohol, Benzoic Acid, and Sodium Benzoate. *International journal of toxicology*, 20 (Suppl 3): 23-50. http://europepmc.org/abstract/MED/11766131

Nutrition Impact Model Study GroupStruijk, E.A.; Banegas, J.R.; Rodriguez-Artalejo, F.; Lopez-Garcia, E., 2018. Consumption of meat in relation to physical functioning in the Seniors-ENRICA cohort. *BMC medicine*, 16. http://dx.doi.org/10.1186/s12916-018-1036-4

Nys, Y.; Jondreville, C.; Chemaly, M.; Roudaut, B., 2018. Qualités des œufs de consommation. In: Berthelot Valérie (coord.), ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui) Partie 2 - Déterminants alimentaires et non alimentaires en élevage de la qualité des produits (Chapitre 9), 316-333.

O'Connor, L.E.; Kim, J.E.; Campbell, W.W., 2017. Total red meat intake of >/=0.5 servings/d does not negatively influence cardiovascular disease risk factors: a systemically searched meta-analysis of randomized controlled trials. *American Journal of Clinical Nutrition*, 105 (1): 57-69. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.116.142521

O'Doherty, M.G.; Cairns, K.; O'Neill, V.; Lamrock, F.; Jorgensen, T.; Brenner, H.; Schottker, B.; Wilsgaard, T.; Siganos, G.; Kuulasmaa, K.; Boffetta, P.; Trichopoulou, A.; Kee, F., 2016. Effect of major lifestyle risk factors, independent and jointly, on life expectancy with and without cardiovascular disease: results from the Consortium on Health and Ageing Network of Cohorts in Europe and the United States (CHANCES). *European Journal of Epidemiology*, 31 (5): 455-468. http://dx.doi.org/10.1007/s10654-015-0112-8

O'Sullivan, T.A.; Hafekost, K.; Mitrou, F.; Lawrence, D., 2013. Food sources of saturated fat and the association with mortality: a meta-analysis. *American journal of public health*, 103 (9): e31-42. http://dx.doi.org/10.2105/ajph.2013.301492

Oberli, M.; Marsset-Baglieri, A.; Airinei, G.; Sante-Lhoutellier, V.; Khodorova, N.; Remond, D.; Foucault-Simonin, A.; Piedcoq, J.; Tome, D.; Fromentin, G.; Benamouzig, R.; Gaudichon, C., 2015. High True Ileal Digestibility but Not Postprandial Utilization of Nitrogen from Bovine Meat Protein in Humans Is Moderately Decreased by High-Temperature, Long-Duration Cooking. *Journal of Nutrition*, 145 (10): 2221-2228. http://dx.doi.org/10.3945/jn.115.216838

Obersby, D.; Chappell, D.C.; Dunnett, A.; Tsiami, A.A., 2013. Plasma total homocysteine status of vegetarians compared with omnivores: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition*, 109 (5): 785-794. http://dx.doi.org/10.1017/s000711451200520x

Ollberding, N.J.; Wilkens, L.R.; Henderson, B.E.; Kolonel, L.N.; Le Marchand, L., 2012. Meat consumption, heterocyclic amines and colorectal cancer risk: The Multiethnic Cohort Study. *International Journal of Cancer*, 131 (7): E1125-E1133. http://dx.doi.org/10.1002/ijc.27546

Pawlak, R.; Bell, K., 2017. Iron Status of Vegetarian Children: A Review of Literature. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 70 (2): 88-99. http://dx.doi.org/10.1159/000466706

Pawlak, R.; Lester, S.E.; Babatunde, T., 2014. The prevalence of cobalamin deficiency among vegetarians assessed by serum vitamin B12: a review of literature. *European Journal of Clinical Nutrition*, 68 (5): 541-548. http://dx.doi.org/10.1038/ejcn.2014.46

Pennings, B.; Groen, B.B.L.; van Dijk, J.W.; de Lange, A.; Kiskini, A.; Kuklinski, M.; Senden, J.M.G.; van Loon, L.J.C., 2013. Minced beef is more rapidly digested and absorbed than beef steak, resulting in greater postprandial protein retention in older Men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 98 (1): 121-128. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.112.051201

Perignon, M.; Barre, T.; Gazan, R.; Amiot, M.J.; Darmon, N., 2018. The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin A is highly variable in French individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets. *Food Chemistry*, 238: 73-81. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.070

Perna, S.; Avanzato, I.; Nichetti, M.; D'Antona, G.; Negro, M.; Rondanelli, M., 2017. Association between Dietary Patterns of Meat and Fish Consumption with Bone Mineral Density or Fracture Risk: A Systematic Literature. *Nutrients*, 9 (9). http://dx.doi.org/10.3390/nu9091029

Petersson, S.D.; Philippou, E., 2016. Mediterranean Diet, Cognitive Function, and Dementia: A Systematic Review of the Evidence. *Advances in Nutrition*, 7 (5): 889-904. http://dx.doi.org/10.3945/an.116.012138

Pihlanto, A.; Mattila, P.; Makinen, S.; Pajari, A.M., 2017. Bioactivities of alternative protein sources and their potential health benefits. *Food & Function*, 8 (10): 3443-3458. http://dx.doi.org/10.1039/c7fo00302a

Pimpin, L.; Wu, J.H.; Haskelberg, H.; Del Gobbo, L.; Mozaffarian, D., 2016. Is Butter Back? A Systematic Review and Meta-Analysis of Butter Consumption and Risk of Cardiovascular Disease, Diabetes, and Total Mortality. *Plos One*, 11 (6): e0158118. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0158118

Pires, S.M., 2013. Assessing the Applicability of Currently Available Methods for Attributing Foodborne Disease to Sources, Including Food and Food Commodities. *Foodborne Pathogens and Disease*, 10 (3): 206-213. http://dx.doi.org/10.1089/fpd.2012.1134

Pires, S.M.; Evers, E.G.; van Pelt, W.; Ayers, T.; Scallan, E.; Angulo, F.J.; Havelaar, A.; Hald, T., 2009. Attributing the Human Disease Burden of Foodborne Infections to Specific Sources. *Foodborne Pathogens and Disease*, 6 (4): 417-424. http://dx.doi.org/10.1089/fpd.2008.0208

Politis, A.; Olgiati, P.; Malitas, P.; Albani, D.; Signorini, A.; Polito, L.; De Mauro, S.; Zisaki, A.; Piperi, C.; Stamouli, E.; Mailis, A.; Batelli, S.; Forloni, G.; De Ronchi, D.; Kalofoutis, A.; Liappas, I.; Serretti, A., 2010. Vitamin B12 Levels in Alzheimer's Disease: Association with Clinical Features and Cytokine Production. *Journal of Alzheimers Disease*, 19 (2): 481-488. http://dx.doi.org/10.3233/jad-2010-1252

Psaltopoulou, T.; Sergentanis, T.N.; Panagiotakos, D.B.; Sergentanis, I.N.; Kosti, R.; Scarmeas, N., 2013. Mediterranean Diet, Stroke, Cognitive Impairment, and Depression: A Meta-Analysis. *Annals of Neurology*, 74 (4): 580-591. http://dx.doi.org/10.1002/ana.23944

Pufulete, M., 2008. Intake of dairy products and risk of colorectal neoplasia. *Nutrition Research Reviews*, 21 (1): 56-67. http://dx.doi.org/10.1017/s0954422408035920

Qin, L.Q.; Xu, J.Y.; Han, S.F.; Zhang, Z.L.; Zhao, Y.Y.; Szeto, I.M., 2015. Dairy consumption and risk of cardiovascular disease: an updated meta-analysis of prospective cohort studies. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 24 (1): 90-100. http://dx.doi.org/10.6133/apjcn.2015.24.1.09

Qing, G.Z.; Lu, Y.; Yi, T.; Zhang, K.Q.; Tang, Z.H., 2015. The relationship of frequency of meat consumption and osteoporosis in Chinese postmenopausal women. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 8 (11): 21130-21137.

Quist, A.J.L.; Inoue-Choi, M.; Weyer, P.J.; Anderson, K.E.; Cantor, K.P.; Krasner, S.; Freeman, L.E.B.; Ward, M.H.; Jones, R.R., 2018. Ingested nitrate and nitrite, disinfection by-products, and pancreatic cancer risk in postmenopausal women. *International Journal of Cancer*, 142 (2): 251-261. http://dx.doi.org/10.1002/ijc.31055

Ralston, R.A.; Lee, J.H.; Truby, H.; Palermo, C.E.; Walker, K.Z., 2012. A systematic review and meta-analysis of elevated blood pressure and consumption of dairy foods. *Journal of human hypertension*, 26 (1): 3-13. http://dx.doi.org/10.1038/jhh.2011.3

Raposa, B.; Ponusz, R.; Gerencser, G.; Budan, F.; Gyongyi, Z.; Tibold, A.; Hegyi, D.; Kiss, I.; Koller, A.; Varjas, T., 2016. Food additives: Sodium benzoate, potassium sorbate, azorubine, and tartrazine modify the expression of NF kappa B, GADD45 alpha, and MAPK8 genes. *Physiology International*, 103 (3): 334-343. http://dx.doi.org/10.1556/2060.103.2016.3.6

Reeves, A.J.; McEvoy, M.A.; MacDonald-Wicks, L.K.; Barker, D.; Attia, J.; Hodge, A.M.; Patterson, A.J., 2017. Calculation of Haem Iron Intake and Its Role in the Development of Iron Deficiency in Young Women from the Australian Longitudinal Study on Women's Health. *Nutrients*, 9 (5). http://dx.doi.org/10.3390/nu9050515

Remond, D., 2018. Qualités nutritionnelles de la viande bovine : protéines alimentaires et qualité nutritionnelle des protéines. In: (coord.), B.V., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui).

Remond, D.; Machebeuf, M.; Yven, C.; Buffiere, C.; Mioche, L.; Mosoni, L.; Mirand, P.P., 2007. Postprandial whole-body protein metabolism after a meat meal is influenced by chewing efficiency in elderly subjects. *American Journal of Clinical Nutrition*, 85 (5): 1286-1292. http://dx.doi.org/10.1093/ajcn/85.5.1286

Remond, D.; Savary-Auzeloux, I.; Boutrou, R., 2016. *Bioactive Peptides Derived From Food Proteins*. London: Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd (*Molecular Nutrition of Amino Acids and Proteins*). http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-802167-5.00001-3

Remond, D.; Shahar, D.R.; Gille, D.; Pinto, P.; Kachal, J.; Peyron, M.A.; Dos Santos, C.N.; Walther, B.; Bordoni, A.; Dupont, D.; Tomas-Cobos, L.; Vergeres, G., 2015. Understanding the gastrointestinal tract of the elderly to develop dietary solutions that prevent malnutrition. *Oncotarget*, 6 (16): 13858-13898. http://dx.doi.org/10.18632/oncotarget.4030

République Française, 2006. Décret n° 2006-416 du 6 avril 2006 relatif aux additifs et traitements autorisés pour les appellations d'origine contrôlées laitières. *JORF n°84 du 8 avril 2006 page 5329* https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000455962&dateTexte=20190911

République Française, 2012. Décret n° 2012-445 du 2 avril 2012 relatif à l'appellation d'origine contrôlée « Jambon sec de Corse » ou « Jambon sec de Corse - Prisuttu ». *JORF n°0081 du 4 avril 2012 page 6096* https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=?cidTexte=JORFTEXT000025626797&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id

Rerat, A.; Calmes, R.; Vaissade, P.; Finot, P.A., 2002. Nutritional and metabolic consequences of the early Maillard reaction of heat treated milk in the pig. Significance for man. *European Journal of Nutrition*, 41 (1): 1-11. http://dx.doi.org/10.1007/s003940200000

Richard, C.; Cristall, L.; Fleming, E.; Lewis, E.D.; Ricupero, M.; Jacobs, R.L.; Field, C.J., 2017. Impact of Egg Consumption on Cardiovascular Risk Factors in Individuals with Type 2 Diabetes and at Risk for Developing Diabetes: A Systematic Review of Randomized Nutritional Intervention Studies. *Canadian journal of diabetes*, 41 (4): 453-463. http://dx.doi.org/10.1016/j.jcjd.2016.12.002

Ritz, E.; Hahn, K.; Ketteler, M.; Kuhlmann, M.K.; Mann, J., 2012. Phosphate Additives in Food-a Health Risk. *Deutsches Arzteblatt International*, 109 (4): 49-U29. http://dx.doi.org/10.3238/arztebl.2012.0049

Rizzoli, R.; Biver, E.; Bonjour, J.P.; Coxam, V.; Goltzman, D.; Kanis, J.A.; Lappe, J.; Rejnmark, L.; Sahni, S.; Weaver, C.; Weiler, H.; Reginster, J.Y., 2018. Benefits and safety of dietary protein for bone health-an expert consensus paper endorsed by the European Society for Clinical and Economical Aspects of Osteopororosis, Osteoarthritis, and Musculoskeletal Diseases and by the International Osteoporosis Foundation. *Osteoporosis International*, 29 (9): 1933-1948. http://dx.doi.org/10.1007/s00198-018-4534-5

Robinson, S.M.; Reginster, J.Y.; Rizzoli, R.; Shaw, S.C.; Kanis, J.A.; Bautmans, I.; Bischoff-Ferrari, H.; Bruyere, O.; Cesari, M.; Dawson-Hughes, B.; Fielding, R.A.; Kaufman, J.M.; Landi, F.; Malafarina, V.; Rolland, Y.; van Loon, L.J.; Vellas, B.; Visser, M.; Cooper, C., 2018. Does nutrition play a role in the prevention and management of sarcopenia? *Clinical Nutrition*, 37 (4): 1121-1132. http://dx.doi.org/10.1016/j.clnu.2017.08.016

Roca-Saavedra, P.; Mendez-Vilabrille, V.; Miranda, J.M.; Nebot, C.; Cardelle-Cobas, A.; Franco, C.M.; Cepeda, A., 2018. Food additives, contaminants and other minor components: effects on human gut microbiota-a review. *Journal of Physiology and Biochemistry*, 74 (1): 69-83. http://dx.doi.org/10.1007/s13105-017-0564-2

Rong, Y.; Chen, L.; Zhu, T.; Song, Y.; Yu, M.; Shan, Z.; Sands, A.; Hu, F.B.; Liu, L., 2013. Egg consumption and risk of coronary heart disease and stroke: dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Bmj-British Medical Journal*, 346: e8539. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.e8539

Rothman, K.J.; Greenland, S.; Lash, T.L., 2008. *Modern Epidemiology*. Philadelphie (US): Lippincott Williams & Wilkins, 758 p.

Roudaut, B.; Fournet, I., 2017. Le dispositif de surveillance des résidus de médicaments vétérinaires dans les volailles et les œufs. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation*, 77 (n° spécial "Surveillance sanitaire des aliment"): 37-41. https://be.anses.fr/sites/default/files/SSA09final.pdf

Rouhani, M.H.; Salehi-Abargouei, A.; Surkan, P.J.; Azadbakht, L., 2014. Is there a relationship between red or processed meat intake and obesity? A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Obesity Reviews*, 15 (9): 740-748. http://dx.doi.org/10.1111/obr.12172

Rust, P.; Ekmekcioglu, C., 2017. Impact of Salt Intake on the Pathogenesis and Treatment of Hypertension. In: Islam, M.S., ed. *Hypertension: From Basic Research to Clinical Practice, Vol 2*. Cham: Springer International Publishing Ag (Advances in Experimental Medicine and Biology), 61-84. http://dx.doi.org/10.1007/5584_2016_147

Rutherfurd, S.M.; Fanning, A.C.; Miller, B.J.; Moughan, P.J., 2015. Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Scores and Digestible Indispensable Amino Acid Scores Differentially Describe Protein Quality in Growing Male Rats. *Journal of Nutrition*, 145 (2): 372-379. http://dx.doi.org/10.3945/jn.114.195438

Salomon, J.A., 2010. New disability weights for the global burden of disease. *Bulletin of the World Health Organization*, 88 (2): 879-879. http://dx.doi.org/10.2471/BLT.10.084301

Sanders, T.A.B., 2009. DHA status of vegetarians. *Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 81 (2-3): 137-141. http://dx.doi.org/10.1016/j.plefa.2009.05.013

Sanna, A.; Firinu, D.; Zavattari, P.; Valera, P., 2018. Zinc Status and Autoimmunity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*, 10 (1). http://dx.doi.org/10.3390/nu10010068

Santarelli, R.L.; Pierre, F.; Corpet, D.E., 2008. Processed meat and colorectal cancer: A review of epidemiologic and experimental evidence. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 60 (2): 131-144. http://dx.doi.org/10.1080/01635580701684872

Santarelli, R.L.; Vendeuvre, J.L.; Naud, N.; Tache, S.; Gueraud, F.; Viau, M.; Genot, C.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2010. Meat Processing and Colon Carcinogenesis: Cooked, Nitrite-Treated, and Oxidized High-Heme Cured Meat Promotes Mucin-Depleted Foci in Rats. *Cancer Prevention Research*, 3 (7): 852-864. http://dx.doi.org/10.1158/1940-6207.capr-09-0160

Santé publique France, 2017. *L'état de santé de la population en France - Rapport 2017*. Paris: Ministère de la santé et des solidarités, Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques, 434 p.

Scalbert, A.; Brennan, L.; Manach, C.; Andres-Lacueva, C.; Dragsted, L.O.; Draper, J.; Rappaport, S.M.; van der Hooft, J.J.J.; Wishart, D.S., 2014. The food metabolome: a window over dietary exposure. *American Journal of Clinical Nutrition*, 99 (6): 1286-1308. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.113.076133

Schupbach, R.; Wegmuller, R.; Berguerand, C.; Bui, M.; Herter-Aeberli, I., 2017. Micronutrient status and intake in omnivores, vegetarians and vegans in Switzerland. *European Journal of Nutrition*, 56 (1): 283-293. http://dx.doi.org/10.1007/s00394-015-1079-7

Schwingshackl, L.; Chaimani, A.; Bechthold, A.; Iqbal, K.; Stelmach-Mardas, M.; Hoffmann, G.; Schwedhelm, C.; Schlesinger, S.; Boeing, H., 2016a. Food groups and risk of chronic disease: a protocol for a systematic review and network meta-analysis of cohort studies. *Systematic reviews*, 5 (1): 125. http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0302-9

Schwingshackl, L.; Hoffmann, G.; Lampousi, A.M.; Knuppel, S.; Iqbal, K.; Schwedhelm, C.; Bechthold, A.; Schlesinger, S.; Boeing, H., 2017a. Food groups and risk of type 2 diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *European Journal of Epidemiology*, 32 (5): 363-375. http://dx.doi.org/10.1007/s10654-017-0246-y

Schwingshackl, L.; Hoffmann, G.; Schwedhelm, C.; Kalle-Uhlmann, T.; Missbach, B.; Knuppel, S.; Boeing, H., 2016b. Consumption of Dairy Products in Relation to Changes in Anthropometric Variables in Adult Populations: A Systematic Review and Meta-Analysis of Cohort Studies. *Plos One*, 11 (6). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0157461

Schwingshackl, L.; Missbach, B.; Konig, J.; Hoffmann, G., 2015. Adherence to a Mediterranean diet and risk of diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Public Health Nutrition*, 18 (7): 1292-1299. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980014001542

Schwingshackl, L.; Schwedhelm, C.; Hoffmann, G.; Knuppel, S.; Iqbal, K.; Andriolo, V.; Bechthold, A.; Schlesinger, S.; Boeing, H., 2017b. Food Groups and Risk of Hypertension: A Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis of Prospective Studies. *Advances in Nutrition*, 8 (6): 793-803. http://dx.doi.org/10.3945/an.117.017178

Schwingshackl, L.; Schwedhelm, C.; Hoffmann, G.; Knuppel, S.; Preterre, A.L.; Iqbal, K.; Bechthold, A.; De Henauw, S.; Michels, N.; Devleesschauwer, B.; Boeing, H.; Schlesinger, S., 2018. Food groups and risk of colorectal cancer. *International Journal of Cancer*, 142 (9): 1748-1758. http://dx.doi.org/10.1002/ijc.31198

Schwingshackl, L.; Schwedhelm, C.; Hoffmann, G.; Lampousi, A.M.; Knuppel, S.; Iqbal, K.; Bechthold, A.; Schlesinger, S.; Boeing, H., 2017c. Food groups and risk of all-cause mortality: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 105 (6): 1462-1473. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.117.153148

Seppo, L.; Jauhiainen, T.; Poussa, T.; Korpela, R., 2003. A fermented milk high in bioactive peptides has a blood pressure-lowering effect in hypertensive subjects. *American Journal of Clinical Nutrition*, 77 (2): 326-330.

Shahidi, F.; Ambigaipalan, P., 2018. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Their Health Benefits. In: Doyle, M.P.; Klaenhammer, T.R., eds. *Annual Review of Food Science and Technology, Vol 9*. Palo Alto: Annual Reviews (Annual Review of Food Science and Technology), 345-381. http://dx.doi.org/10.1146/annurev-food-111317-095850

Shams-White, M.M.; Chung, M.; Du, M.X.; Fu, Z.X.; Insogna, K.L.; Karlsen, M.C.; LeBoff, M.S.; Shapses, S.A.; Sackey, J.; Wallace, T.C.; Weaver, C.M., 2017. Dietary protein and bone health: a systematic review and meta-analysis from the National Osteoporosis Foundation. *American Journal of Clinical Nutrition*, 105 (6): 1528-1543. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.116.145110

Shams-White, M.M.; Chung, M.; Fu, Z.X.; Insogna, K.L.; Karlsen, M.C.; LeBoff, M.S.; Shapses, S.A.; Sackey, J.; Shi, J.; Wallace, T.C.; Weaver, C.M., 2018. Animal versus plant protein and adult bone health: A systematic review and meta-

analysis from the National Osteoporosis Foundation. *Plos One*, 13 (2). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0192459

Shin, J.Y.; Xun, P.; Nakamura, Y.; He, K., 2013. Egg consumption in relation to risk of cardiovascular disease and diabetes: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*, 98 (1): 146-159. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.112.051318

Silva, R.; Pizato, N.; Da Mata, F.; Figueiredo, A.; Ito, M.; Pereira, M.G., 2018. Mediterranean Diet and Musculoskeletal-Functional Outcomes in Community-Dwelling Older People: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Nutrition Health & Aging*, 22 (6): 655-663. http://dx.doi.org/10.1007/s12603-017-0993-1

Sinha, R.; Peters, U.; Cross, A.J.; Kulldorff, M.; Weissfeld, J.L.; Pinsky, P.F.; Rothman, N.; Hayes, R.B.; Lung Ovarian Cancer Project, T., 2005. Meat, meat cooking methods and preservation, and risk for colorectal adenoma. *Cancer Research*, 65 (17): 8034-8041. http://dx.doi.org/10.1158/0008-5472.can-04-3429

Soedamah-Muthu, S.S.; Ding, E.L.; Al-Delaimy, W.K.; Hu, F.B.; Engberink, M.F.; Willett, W.C.; Geleijnse, J.M., 2011. Milk and dairy consumption and incidence of cardiovascular diseases and all-cause mortality: dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 93 (1): 158-171. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.2010.29866

Soedamah-Muthu, S.S.; Verberne, L.D.; Ding, E.L.; Engberink, M.F.; Geleijnse, J.M., 2012. Dairy consumption and incidence of hypertension: a dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Hypertension (Dallas, Tex. : 1979)*, 60 (5): 1131-1137. http://dx.doi.org/10.1161/hypertensionaha.112.195206

Soliman, G.A., 2018. Dietary Cholesterol and the Lack of Evidence in Cardiovascular Disease. *Nutrients*, 10 (6). http://dx.doi.org/10.3390/nu10060780

Song, P.; Wu, L.; Guan, W., 2015. Dietary Nitrates, Nitrites, and Nitrosamines Intake and the Risk of Gastric Cancer: A Meta-Analysis. *Nutrients*, 7 (12): 9872-9895. http://dx.doi.org/10.3390/nu7125505

Soppi, E.T., 2018. Iron deficiency without anemia - a clinical challenge. *Clinical Case Reports*, 6 (6): 1082-1086. http://dx.doi.org/10.1002/ccr3.1529

Sousa, A.S.; Guerra, R.S.; Fonseca, I.; Pichel, F.; Ferreira, S.; Amaral, T.F., 2016. Financial impact of sarcopenia on hospitalization costs. *European Journal of Clinical Nutrition*, 70 (9): 1046-1051. http://dx.doi.org/10.1038/ejcn.2016.73

Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Seal, C.; Sanderson, R.; Benbrook, C.; Steinshamn, H.; Gromadzka-Ostrowska, J.; Rembialkowska, E.; Skwarlo-Sonta, K.; Eyre, M.; Cozzi, G.; Larsen, M.K.; Jordon, T.; Niggli, U.; Sakowski, T.; Calder, P.C.; Burdge, G.C.; Sotiraki, S.; Stefanakis, A.; Yolcu, H.; Stergiadis, S.; Chatzidimitriou, E.; Butler, G.; Stewart, G.; Leifert, C., 2016a. Composition differences between organic and conventional meat: a systematic literature review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition*, 115 (6): 994-1011. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114515005073

Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Seal, C.J.; Sanderson, R.; Benbrook, C.; Steinshamn, H.; Gromadzka-Ostrowska, J.; Rembialkowska, E.; Skwarlo-Sonta, K.; Eyre, M.; Cozzi, G.; Larsen, M.K.; Jordon, T.; Niggli, U.; Sakowski, T.; Calder, P.C.; Burdge, G.C.; Sotiraki, S.; Stefanakis, A.; Stergiadis, S.; Yolcu, H.; Chatzidimitriou, E.; Butler, G.; Stewart, G.; Leifert, C., 2016b. Higher PUFA and n-3 PUFA, conjugated linoleic acid, alpha-tocopherol and iron, but lower iodine and selenium concentrations in organic milk: a systematic literature review and meta- and redundancy analyses. *British Journal of Nutrition*, 115 (6): 1043-1060. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114516000349

Stern, Y., 2009. Cognitive reserve. *Neuropsychologia*, 47 (10): 2015-2028. http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.004

Stevens, G.A.; Finucane, M.M.; De-Regil, L.M.; Paciorek, C.J.; Flaxman, S.R.; Branca, F.; Pena-Rosas, J.P.; Bhutta, Z.A.; Ezzati, M.; Nutr Impact Model Study, G., 2013. Global, regional, and national trends in haemoglobin concentration and

prevalence of total and severe anaemia in children and pregnant and non-pregnant women for 1995-2011: a systematic analysis of population-representative data. *Lancet Global Health*, 1 (1): E16-E25. http://dx.doi.org/10.1016/s2214-109x(13)70001-9

Suez, J.; Korem, T.; Zeevi, D.; Zilberman-Schapira, G.; Thaiss, C.A.; Maza, O.; Israeli, D.; Zmora, N.; Gilad, S.; Weinberger, A.; Kuperman, Y.; Harmelin, A.; Kolodkin-Gal, I.; Shapiro, H.; Halpern, Z.; Segal, E.; Elinav, E., 2014. Artificial sweeteners induce glucose intolerance by altering the gut microbiota. *Nature*, 514 (7521): 181-+. http://dx.doi.org/10.1038/nature13793

Summerbell, C.D.; Douthwaite, W.; Whittaker, V.; Ells, L.J.; Hillier, F.; Smith, S.; Kelly, S.; Edmunds, L.D.; Macdonald, I., 2009. The association between diet and physical activity and subsequent excess weight gain and obesity assessed at 5 years of age or older: a systematic review of the epidemiological evidence Introduction. *International Journal of Obesity*, 33: S1-S1. http://dx.doi.org/10.1038/ijo.2009.80

Swidsinski, A.; Ung, V.; Sydora, B.C.; Loening-Baucke, V.; Doerffel, Y.; Verstraelen, H.; Fedorok, R.N., 2009. Bacterial Overgrowth and Inflammation of Small Intestine After Carboxymethylcellulose Ingestion in Genetically Susceptible Mice. *Inflammatory Bowel Diseases*, 15 (3): 359-364. http://dx.doi.org/10.1002/ibd.20763

Tai, V.; Leung, W.; Grey, A.; Reid, I.R.; Bolland, M.J., 2015. Calcium intake and bone mineral density: systematic review and meta-analysis. *Bmj-British Medical Journal*, 351. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.h4183

Tamez, M.; Virtanen, J.K.; Lajous, M., 2016. Egg consumption and risk of incident type 2 diabetes: a dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *British Journal of Nutrition*, 115 (12): 2212-2218. http://dx.doi.org/10.1017/s000711451600146x

Thepault, A.; Meric, G.; Rivoal, K.; Pascoe, B.; Mageiros, L.; Touzain, F.; Rose, V.; Beven, V.; Chemaly, M.; Sheppard, S.K., 2017. Genome-Wide Identification of Host-Segregating Epidemiological Markers for Source Attribution in *Campylobacter jejuni*. *Applied and Environmental Microbiology*, 83 (7): UNSP e03085. http://dx.doi.org/10.1128/AEM.03085-16

Thomsen, S.T.; de Boer, W.; Pires, S.M.; Devleesschauwer, B.; Fagt, S.; Andersen, R.; Poulsen, M.; van der Voet, H., 2019. A probabilistic approach for risk-benefit assessment of food substitutions: A case study on substituting meat by fish. *Food and Chemical Toxicology*, 126: 79-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2019.02.018

Thomsen, S.T.; Pires, S.M.; Devleesschauwer, B.; Poulsen, M.; Fagt, S.; Ygil, K.H.; Andersen, R., 2018. Investigating the risk-benefit balance of substituting red and processed meat with fish in a Danish diet. *Food and Chemical Toxicology*, 120: 50-63. http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2018.06.063

Thorning, T.K.; Bertram, H.C.; Bonjour, J.P.; de Groot, L.; Dupont, D.; Feeney, E.; Ipsen, R.; Lecerf, J.M.; Mackie, A.; McKinley, M.C.; Michalski, M.C.; Remond, D.; Riserus, U.; Soedamah-Muthu, S.S.; Tholstrup, T.; Weaver, C.; Astrup, A.; Givens, I., 2017. Whole dairy matrix or single nutrients in assessment of health effects: current evidence and knowledge gaps. *American Journal of Clinical Nutrition*, 105 (5): 1033-1045. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.116.151548

Tobacman, J.K., 2001. Review of harmful gastrointestinal effects of carrageenan in animal experiments. *Environmental Health Perspectives*, 109 (10): 983-994. http://dx.doi.org/10.2307/3454951

Tonelli, M.; Sacks, F.; Pfeffer, M.; Gao, Z.; Curhan, G., 2005. Relation Between Serum Phosphate Level and Cardiovascular Event Rate in People With Coronary Disease. *Circulation*, 112 (17): 2627-2633. http://dx.doi.org/0.1161/CIRCULATIONAHA.105.553198

Tong, X.; Chen, G.C.; Zhang, Z.; Wei, Y.L.; Xu, J.Y.; Qin, L.Q., 2017. Cheese Consumption and Risk of All-Cause Mortality: A Meta-Analysis of Prospective Studies. *Nutrients*, 9 (1). http://dx.doi.org/10.3390/nu9010063

Torris, C.; Smastuen, M.C.; Molin, M., 2018. Nutrients in Fish and Possible Associations with Cardiovascular Disease Risk Factors in Metabolic Syndrome. *Nutrients*, 10 (7). http://dx.doi.org/10.3390/nu10070952

Traylor, D.A.; Gorissen, S.H.M.; Phillips, S.M., 2018. Perspective: Protein Requirements and Optimal Intakes in Aging: Are We Ready to Recommend More Than the Recommended Daily Allowance? *Advances in Nutrition*, 9 (3): 171-182. http://dx.doi.org/10.1093/advances/nmy003

Tse, G.; Eslick, G.D., 2014. Egg consumption and risk of GI neoplasms: dose-response meta-analysis and systematic review. *European Journal of Nutrition*, 53 (7): 1581-90. http://dx.doi.org/10.1007/s00394-014-0664-5

Turesky, R.J., 2007. Formation and biochemistry of carcinogenic heterocyclic aromatic amines in cooked meats. *Toxicology Letters*, 168 (3): 219-227. http://dx.doi.org/10.1016/j.toxlet.2006.10.018

Turkoglu, S., 2007. Genotoxicity of five food preservatives tested on root tips of Allium cepa L. *Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 626 (1-2): 4-14. http://dx.doi.org/10.1016/j.mrgentox.2006.07.006

Union Européenne, 1996. Directive 96/23/CE du Conseil, du 29 avril 1996, relative aux mesures de contrôle à mettre en oeuvre à l'égard de certaines substances et de leurs résidus dans les animaux vivants et leurs produits et abrogeant les directives 85/358/CEE et 86/469/CEE et les décisions 89/187/CEE et 91/664/CEE. *JOUE n°125 du 23.05.1996*. 10–32. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A31996L0023

Union Européenne, 2008. Règlement (CE) n°1333/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 sur les additifs alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 354 du 31.12.2008, p. 16–33* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32008R1333

Union Européenne, 2010. Règlement (UE) n°37/2010 de la Commission du 22 décembre 2009 relatif aux substances pharmacologiquement actives et à leur classification en ce qui concerne les limites maximales de résidus dans les aliments d'origine animale (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L n°15/1 du 20.01.2010*. 1–72. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32010R0037

Union Européenne, 2011. Règlement (UE) n°1129/2011 de la Commission du 11 novembre 2011 modifiant l'annexe II du règlement (CE) n o 1333/2008 du Parlement européen et du Conseil en vue d'y inclure une liste de l'Union des additifs alimentaires Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *JOUE L n°295 du 12.11.2011, p. 1–177*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32011R1129

Van Cauteren, D.; De Valk, H.; Sommen, C.; King, L.A.; Silva, N.J.D.; Weill, F.X.; Le Hello, S.; Megraud, F.; Vaillant, V.; Desenclos, J.C., 2015. Community Incidence of Campylobacteriosis and Nontyphoidal Salmonellosis, France, 2008-2013. *Foodborne Pathogens and Disease*, 12 (8): 664-669. http://dx.doi.org/10.1089/fpd.2015.1964

Van Cauteren, D.; Le Strat, Y.; Sommen, C.; Bruyand, M.; Tourdjman, M.; Jourdan-Da Silva, N.; Couturier, E.; Fournet, N.; de Valk, H.; Desenclos, J.C., 2017. Estimated Annual Numbers of Foodborne Pathogen-Associated Illnesses, Hospitalizations, and Deaths, France, 2008-2013. *Emerging Infectious Diseases*, 23 (9): 1486-1492. http://dx.doi.org/10.3201/eid2309.170081

Van Cauteren, D.; Le Strat, Y.; Sommen, C.; Bruyand, M.; Tourdjman, M.; Jourdan-Da Silva, N.; Couturier, E.; Fournet, N.; De Valk, H.; Desenclos, J.C., 2018. Estimation de la morbidité et de la mortalité liées aux infections d'origine alimentaire en France métropolitaine, 2008–2013. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 1: 2-10. http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2018/1/pdf/2018_1_1.pdf

van Mierlo, L.A.J.; Arends, L.R.; T Streppel, M.; Zeegers, M.P.A.; Kok, F.J.; Grobbee, D.E.; Geleijnse, J.M., 2006. Blood pressure response to calcium supplementation: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of human hypertension*, 20 (8): 571-580. http://dx.doi.org/10.1038/sj.jhh.1002038

van Vliet, S.; Burd, N.A.; van Loon, L.J.C., 2015. The Skeletal Muscle Anabolic Response to Plant- versus Animal-Based Protein Consumption. *Journal of Nutrition*, 145 (9): 1981-1991. http://dx.doi.org/10.3945/jn.114.204305

Veiga, P.; Pons, N.; Agrawal, A.; Oozeer, R.; Guyonnet, D.; Brazeilles, R.; Faurie, J.M.; Vlieg, J.; Houghton, L.A.; Whorwell, P.J.; Ehrlich, S.D.; Kennedy, S.P., 2014. Changes of the human gut microbiome induced by a fermented milk product. *Scientific Reports*, 4. http://dx.doi.org/10.1038/srep06328

Verdot, C.; Torres, M.; Salanave, B.; Deschamps, V., 2017. Corpulence des enfants et des adultes en France métropolitaine en 2015. Résultats de l'étude Esteban et évolution depuis 2006. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 13: 234-241. http://beh.santepubliquefrance.fr/beh/2017/13/pdf/2017_13_1.pdf

Vernooij, R.W.M.; Zeraatkar, D.; Han, M.A.; El Dib, R.; Zworth, M.; Milio, K.; Sit, D.; Lee, Y.; Gomaa, H.; Valli, C.; Swierz, M.J.; Chang, Y.; Hanna, S.E.; Brauer, P.M.; Sievenpiper, J.; de Souza, R.l.; Alonso-Coello, P.; Bala, M.M.; Guyatt, G.H.; Johnston, B.C., 2019. Patterns of Red and Processed Meat Consumption and Risk for Cardiometabolic and Cancer Outcomes: A Systematic Review and Meta-analysis of Cohort Studies. *Annals of Internal Medicine*, 171 (10): 732-741. http://dx.doi.org/10.7326/M19-1583

Viennois, E.; Chassaing, B., 2018. First victim, later aggressor: How the intestinal microbiota drives the pro-inflammatory effects of dietary emulsifiers? *Gut Microbes*, 9 (3): 288-291. http://dx.doi.org/10.1080/19490976.2017.1421885

Viennois, E.; Merlin, D.; Gewirtz, A.T.; Chassaing, B., 2017. Dietary Emulsifier-Induced Low-Grade Inflammation Promotes Colon Carcinogenesis. *Cancer Research*, 77 (1): 27-40. http://dx.doi.org/10.1158/0008-5472.can-16-1359

Vorland, C.J.; Stremke, E.R.; Moorthi, R.N.; Gallant, K.M.H., 2017. Effects of Excessive Dietary Phosphorus Intake on Bone Health. *Current osteoporosis reports*, 15 (5): 473-482. http://dx.doi.org/10.1007/s11914-017-0398-4

Wallin, A.; Forouhi, N.G.; Wolk, A.; Larsson, S.C., 2016. Egg consumption and risk of type 2 diabetes: a prospective study and dose-response meta-analysis. *Diabetologia*, 59 (6): 1204-1213. http://dx.doi.org/10.1007/s00125-016-3923-6

Wan, Y.; Zheng, J.S.; Wang, F.L.; Li, D., 2017. Fish, long chain omega-3 polyunsaturated fatty acids consumption, and risk of all-cause mortality: a systematic review and dose-response meta-analysis from 23 independent prospective cohort studies. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 26 (5): 939-956. http://dx.doi.org/10.6133/apjcn.072017.01

Wang, X.; Lin, X.; Ouyang, Y.Y.; Liu, J.; Zhao, G.; Pan, A.; Hu, F.B., 2016. Red and processed meat consumption and mortality: dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Public Health Nutrition*, 19 (5): 893-905. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980015002062

Wang, X.; Ouyang, Y.Y.; Liu, J.; Zhu, M.M.; Zhao, G.; Bao, W.; Hu, F.B., 2014. Fruit and vegetable consumption and mortality from all causes, cardiovascular disease, and cancer: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *Bmj-British Medical Journal*, 349. http://dx.doi.org/10.1136/bmj.g4490

WCRF; AICR; CUP Expert Report, 2018a. Diet, Nutrition, Physical Activity: Energy balance and body fatness. The determinants of weight gain, overweight and obesity. *Diet, Nutrition and Cancer: a Global Perspective*. London: WCRF International, 123 p. https://www.wcrf.org/sites/default/files/Energy-Balance-and-Body-Fatness.pdf

WCRF; AICR; CUP Expert Report, 2018b. Meat, fish and dairy products and the risk of cancer. *Diet, Nutrition, Physical Activity and Cancer: a Global Perspective*. London: WCRF International, 78 p. https://www.wcrf.org/sites/default/files/Meat-Fish-and-Dairy-products.pdf

Weggemans, R.M.; Zock, P.L.; Katan, M.B., 2001. Dietary cholesterol from eggs increases the ratio of total cholesterol to high-density lipoprotein cholesterol in humans: a meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*, 73 (5): 885-891.

Weiner, M.L., 2014. Food additive carrageenan: Part II: A critical review of carrageenan in vivo safety studies. *Critical Reviews in Toxicology*, 44 (3): 244-269. http://dx.doi.org/10.3109/10408444.2013.861798

Whiteman, D.; Muir, J.; Jones, L.; Murphy, M.; Key, T., 1999. Dietary questions as determinants of mortality: the OXCHECK experience. *Public Health Nutrition*, 2 (4): 477-487. http://dx.doi.org/10.1017/s136898009900066x

World Health Organization, 2002. *The world health report 2002: reducing risks, promoting healthy life*. World Health Organization, 248 p. https://www.who.int/whr/2002/en/whr02_en.pdf

World Health Organization, 2008. *Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure*. Geneva: WHO, 170 p. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11786/IdentifyingPopnatRiskExposuretoMercury_2008Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y

World Health Organization, 2011. *Global Atlas on cardiovascular disease prevention and control*. Geneva: WHO, 164 p. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44701/1/9789241564373_eng.pdf?ua=1

World Health Organization, 2014. *Global status report on noncommunicable diseases*: World Health Organization, 298 p. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/148114/1/9789241564854_eng.pdf?ua=1

Wu, L.; Sun, D., 2016. Meta-Analysis of Milk Consumption and the Risk of Cognitive Disorders. *Nutrients*, 8 (12). http://dx.doi.org/10.3390/nu8120824

Wu, L.; Sun, D., 2017. Consumption of Yogurt and the Incident Risk of Cardiovascular Disease: A Meta-Analysis of Nine Cohort Studies. *Nutrients*, 9 (3). http://dx.doi.org/10.3390/nu9030315

Xia, Z.; Meng, L.; Man, Q.; Li, L.; Song, P.; Li, Y.; Gao, Y.; Ja, S.; Zhang, J., 2016. [Analysis of the dietary factors on sarcopenia in elderly in Beijing]. *Wei Sheng Yan Jiu*, 45 (3): 388-393.

Xu, L.; Lam, T.H.; Jiang, C.Q.; Zhang, W.S.; Zhu, F.; Jin, Y.L.; Woo, J.; Cheng, K.K.; Thomas, G.N., 2019. Egg consumption and the risk of cardiovascular disease and all-cause mortality: Guangzhou Biobank Cohort Study and meta-analyses. *European Journal of Nutrition*, 58 (2): 785-796. http://dx.doi.org/10.1007/s00394-018-1692-3

Yang, B.; Shi, M.Q.; Li, Z.H.; Yang, J.J.; Li, D., 2016a. Fish, Long-Chain n-3 PUFA and Incidence of Elevated Blood Pressure: A Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies. *Nutrients*, 8 (1). http://dx.doi.org/10.3390/nu8010058

Yang, C.L.; Pan, L.; Sun, C.C.; Xi, Y.Y.; Wang, L.; Li, D.J., 2016b. Red Meat Consumption and the Risk of Stroke: A Dose-Response Meta-analysis of Prospective Cohort Studies. *Journal of Stroke & Cerebrovascular Diseases*, 25 (5): 1177-1186. http://dx.doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2016.01.040

Younes, M.; Aggett, P.; Aguilar, F.; Crebelli, R.; Di Domenico, A.; Dusemund, B.; Filipic, M.; Frutos, M.J.; Galtier, P.; Gott, D.; Gundert-Remy, U.; Kuhnle, G.G.; Lambre, C.; Leblanc, J.C.; Lillegaard, I.T.; Moldeus, P.; Mortensen, A.; Oskarsson, A.; Stankovic, I.; Tobback, P.; Waalkens-Berendsen, I.; Wright, M.; Tard, A.; Tasiopoulou, S.; Woutersen, R.A., 2018a. Re-evaluation of celluloses E 460(i), E 460(ii), E 461, E 462, E 463, E 464, E 465, E 466, E 468 and E 469 as food additives. *Efsa Journal*, 16 (1). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5047

Younes, M.; Aggett, P.; Aguilar, F.; Crebelli, R.; Filipic, M.; Frutos, M.J.; Galtier, P.; Gott, D.; Gundert-Remy, U.; Kuhnle, G.G.; Lambre, C.; Leblanc, J.C.; Lillegaard, I.T.; Moldeus, P.; Mortensen, A.; Oskarsson, A.; Stankovic, I.; Waalkens-Berendsen, I.; Woutersen, R.A.; Wright, M.; Brimer, L.; Lindtner, O.; Mosesso, P.; Christodoulidou, A.; Ioannidou, S.; Lodi, F.; Dusemund, B., 2018b. Re-evaluation of carrageenan (E 407) and processed Eucheuma seaweed (E 407a) as food additives. *Efsa Journal*, 16 (4). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5238

Younes, M.; Aquilina, G.; Castle, L.; Engel, K.H.; Fowler, P.; Fernandez, M.J.F.; Furst, P.; Gurtler, R.; Husoy, T.; Mennes, W.; Moldeus, P.; Oskarsson, A.; Shah, R.; Waalkens-Berendsen, I.; Wolfle, D.; Aggett, P.; Cupisti, A.; Fortes, C.; Kuhnle, G.; Lillegaard, I.T.; Scotter, M.; Giarola, A.; Rincon, A.; Tard, A.; Gundert-Remy, U., 2019. Re-evaluation of phosphoric acid-phosphates - di-, tri- and polyphosphates (E 338-341, E 343, E 450-452) as food additives and the safety of proposed extension of use. *Efsa Journal*, 17 (6). http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2019.5674

Zaragoza-Marti, A.; Cabanero-Martinez, M.J.; Hurtado-Sanchez, J.A.; Laguna-Perez, A.; Ferrer-Cascales, R., 2018. Evaluation of Mediterranean diet adherence scores: a systematic review. *BMJ Open*, 8 (2). http://dx.doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019033

Zeng, L.F.; Cao, Y.; Liang, W.X.; Bao, W.H.; Pan, J.K.; Wang, Q.; Liu, J.; Liang, H.D.; Xie, H.; Chai, Y.T.; Guan, Z.T.; Cao, Q.; Li, X.Y.; Yang, L.; Xu, W.H.; Mi, S.Q.; Wang, N.S., 2017. An exploration of the role of a fish-oriented diet in cognitive decline: a systematic review of the literature. *Oncotarget*, 8 (24): 39877-39895. http://dx.doi.org/10.18632/oncotarget.16347

Zengin, N.; Yuzbasioglu, D.; Unal, F.; Yilmaz, S.; Aksoy, H., 2011. The evaluation of the genotoxicity of two food preservatives: Sodium benzoate and potassium benzoate. *Food and Chemical Toxicology*, 49 (4): 763-769. http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2010.11.040

Zhang, Y.; Chen, J.; Qiu, J.; Li, Y.; Wang, J.; Jiao, J., 2016. Intakes of fish and polyunsaturated fatty acids and mild-to-severe cognitive impairment risks: a dose-response meta-analysis of 21 cohort studies. *American Journal of Clinical Nutrition*, 103 (2): 330-340. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.115.124081

Zhao, J.G.; Zeng, X.T.; Wang, J.; Liu, L., 2017a. Association Between Calcium or Vitamin D Supplementation and Fracture Incidence in Community-Dwelling Older Adults A Systematic Review and Meta-analysis. *Jama-Journal of the American Medical Association*, 318 (24): 2466-2482. http://dx.doi.org/10.1001/jama.2017.19344

Zhao, L.G.; Sun, J.W.; Yang, Y.; Ma, X.; Wang, Y.Y.; Xiang, Y.B., 2016. Fish consumption and all-cause mortality: a meta-analysis of cohort studies. *European Journal of Clinical Nutrition*, 70 (2): 155-61. http://dx.doi.org/10.1038/ejcn.2015.72

Zhao, Z.W.; Feng, Q.X.; Yin, Z.F.; Shuang, J.B.; Bai, B.; Yu, P.F.; Guo, M.; Zhao, Q.C., 2017b. Red and processed meat consumption and colorectal cancer risk: a systematic review and meta-analysis. *Oncotarget*, 8 (47): 83306-83314. http://dx.doi.org/10.18632/oncotarget.20667

Zheng, J.; Huang, T.; Yu, Y.; Hu, X.; Yang, B.; Li, D., 2012. Fish consumption and CHD mortality: an updated meta-analysis of seventeen cohort studies. *Public Health Nutrition*, 15 (4): 725-737. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980011002254

Zheng, Y.; Ley, S.H.; Hu, F.B., 2018. Global aetiology and epidemiology of type 2 diabetes mellitus and its complications. *Nature Reviews Endocrinology*, 14 (2): 88-98. http://dx.doi.org/10.1038/nrendo.2017.151

Zinocker, M.K.; Lindseth, I.A., 2018. The Western Diet-Microbiome-Host Interaction and Its Role in Metabolic Disease. *Nutrients*, 10 (3). http://dx.doi.org/10.3390/nu10030365

Chapitre 4 : Synergies, antagonismes et compromis dans la chaîne alimentaire entre acteurs et entre volets de la qualité

Auteurs : Laurent Guillier et Pierre-Sylvain Mirade (coordination), Bruno Martin, Isabelle Souchon

Sommaire

Chapitre 4 : Synergies, antagonismes et compromis dans la chaîne alimentaire entre acteurs et entre volets de la qualité825

4.1 Prise en compte des critères de durabilité dans les systèmes de production et de transformation des produits animaux 826

4.1.1 Indicateurs environnementaux 826

4.1.2 Indicateurs économiques 829

4.1.3 Indicateurs sociaux 829

4.1.4 Indicateurs nutritionnels 829

4.1.5 Indicateurs sanitaires 830

4.2 Description des outils d'analyse multicritère, d'optimisation multi-objectif et d'aide à la décision 831

4.2.1 Méthodes d'analyse multicritère et méthodes d'optimisation multi-objectif 831

4.2.2 Outils d'aide à la décision 833

4.3 Exemples d'applications dans la chaîne alimentaire en lien avec les produits animaux 835

4.3.1 Durabilité de la chaîne d'approvisionnement des produits 835

4.3.2 Exemples concernant la production de lait et sa transformation en produits laitiers 839

4.3.3 Exemples concernant la production de viande et la transformation en produits carnés 846

4.3.4 Cartographies multicritères : un outil d'aide à la conception de produits plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs – Exemple d'un aliment composite : la pizza 855

4.3.5 Approches multicritères : exemples allant jusqu'à la santé des consommateurs 857

4.4 Principales conclusions 859

4.5. Références bibliographiques 860

Les antagonismes, synergies et compromis dans la chaîne alimentaire entre les différents acteurs et entre les volets de la qualité peuvent être étudiés par des analyses multicritères, couplées ou non à des méthodes d'optimisation multi-objectif.

La première partie de ce chapitre répertorie les principaux indicateurs environnementaux, économiques, sociaux, mais aussi nutritionnels et sanitaires, qui permettent de prendre en compte, dans les analyses multicritères, la durabilité des systèmes de production et de transformation des produits animaux en lien avec leurs qualités. Dans la deuxième partie de ce chapitre, sont présentées les bases générales des principaux outils d'analyse multicritère, ainsi que les outils d'optimisation multi-objectifs souvent combinés à ces premiers outils, qui permettent d'aboutir à une prise de décision. Enfin, la dernière partie du chapitre illustre, au travers d'exemples, la mise en œuvre de démarches d'analyse multicritère, aussi bien dans les chaînes d'approvisionnement des produits que dans la production et la transformation de produits animaux, comme le lait et les produits laitiers, la viande et les produits carnés, et un produit composite, comme la pizza. Cette dernière partie relate également quelques exemples récents d'analyses multicritères visant à relier régime/choix alimentaire, impact environnemental et santé du consommateur.

Regard sur la bibliographie : Chapitre 4

L'écriture du Chapitre 4 repose sur l'analyse de 222 références dont une très grande majorité (80%) correspond à des articles publiés dans des revues scientifiques (78%) ou à des communications faites dans des congrès scientifiques (2%), et 20% à de la littérature grise (rapports 9%, livres et chapitres de livre 7%, thèses 3%, règlements juridiques 1%). Concernant les revues scientifiques citées qui sont au nombre de 92, 85% d'entre elles sont référencées dans le Web Of Science, 91% ont été publiées dans des revues internationales et le reste (9%) dans des revues françaises. Ces publications sont relativement récentes : en effet, 50% des articles cités dans ce chapitre ont été publiés entre 2012 et 2019 et 25% de ces articles ont moins de 5 ans. Les 2 revues les plus citées, correspondant à 16% du total, sont des revues internationales ayant trait à l'Analyse du Cycle de Vie et à la production durable. Concernant les auteurs (749 auteurs différents cités), aucun auteur n'a été cité plus de 6 fois, représentant donc moins de 3% du total des citations. Par contre, il est à noter une surreprésentation des agents INRAE dans les auteurs les plus cités ; en effet, 18 des 20 auteurs cités au moins 4 fois œuvrent ou ont œuvré au sein de notre Institut, ce qui peut peut-être s'expliquer par le fait qu'INRAE axe beaucoup ses travaux de recherche sur la durabilité des systèmes de production et de transformation en lien avec les différentes dimensions de la qualité des produits animaux.

4.1 Prise en compte des critères de durabilité dans les systèmes de production et de transformation des produits animaux

Le développement d'indicateurs quantitatifs pertinents est un prérequis pour mettre en place une démarche d'analyse multicritère de la durabilité des systèmes de production et de transformation des produits animaux en lien avec leurs qualités. Dans l'idéal, un indicateur de développement durable devrait satisfaire les trois composantes de la durabilité : composante environnementale, composante économique, et composante sociale, qu'il convient d'accompagner, selon Madoumier (2016), dans le cas des produits alimentaires, d'indicateurs nutritionnels, mais aussi sanitaires relatifs à la sécurité chimique et à l'hygiène des produits.

4.1.1 Indicateurs environnementaux

L'étude de Heijungs *et al.* (1992) a permis de regrouper les impacts environnementaux en huit catégories d'indicateurs : potentiel de réchauffement climatique, potentiel d'acidification, potentiel d'épuisement de la couche d'ozone, oxydation photochimique ou potentiel de formation de « smog », potentiels de toxicité humaine par ingestion et par inhalation, potentiels de toxicité aquatique et terrestre. Ces indicateurs peuvent être regroupés en trois domaines : atmosphérique global, atmosphérique régional et toxicologique local, avec l'impact sur l'Homme et l'impact écologique.

Le potentiel de réchauffement global, en anglais Global Warming Potential (GWP), est un indice qui compare la contribution d'un gaz à effet de serre au réchauffement climatique par rapport à celle du composé chimique de référence, le dioxyde de carbone (CO_2) dont le GWP est égal à 1, sur une période donnée, généralement 100 ans. Le potentiel d'acidification (en anglais, Acidification Potential – AP) d'un composé est lié au nombre de moles de H^+ créé par nombre de moles de composés, exprimé sur une base massique et par rapport à une molécule de référence, le SO_2. Le potentiel d'épuisement de la couche d'ozone (Ozone Depletion Potential, ODP) dans la stratosphère est basé sur le calcul de la variation spatio-temporelle de la

concentration en O_3 due à l'émission d'un gaz spécifique, par rapport à la même quantité relative au composé de référence, le trichorofluorométhane (CCl_3F). L'oxydation photochimique ou potentiel de formation de « smog » (PhotoChemical Oxidation Potential, PCOP) quantifie la contribution au phénomène de « smog » ; oxydation photochimique de certains gaz qui produit de l'ozone. Il s'exprime en équivalent éthylène C_2H_4.

Les quatre indicateurs précédents (GWP, AP, ODP, PCOP) relèvent du domaine atmosphérique global ou régional. Les quatre autres indicateurs, *i.e.* le potentiel de toxicité humaine par ingestion (Human Toxicity Potential by Ingestion, HTPI), le potentiel de toxicité humaine par inhalation ou exposition cutanée (Human Toxicity Potential by either inhalation or dermal Exposure, HTPE), le potentiel de toxicité aquatique (Aquatic Toxicity Potential, ATP) et le potentiel de toxicité terrestre (Terrestrial Toxicity Potential, TTP) sont relatifs au domaine toxicologique local.

En première approximation, la dose létale 50 ou DL50 (LD50 en anglais pour Lethal Dose 50) ou CL50 (concentration létale 50) est utilisée pour estimer le HTPI. Cet indicateur mesure la dose de substance causant la mort de 50% d'une population animale donnée, souvent des souris ou des rats, dans des conditions d'expérimentation précises. Le potentiel de toxicité terrestre (TTP) est estimé de la même manière que le HTPI en utilisant la même base de données du DL50 pour le rat. L'ATP est estimé à partir de l'étude des effets sur le poisson « tête de boule » (*Pimephales promelas*). Les données sont traduites sous la forme d'une concentration qui provoque la mort (CL50) pour 50% des organismes exposés à une substance pendant une durée limitée et déterminée. L'estimation du potentiel de toxicité humaine par inhalation ou exposition cutanée (HTPE) se fait à partir de moyennes pondérées dans le temps de valeurs limites d'exposition conseillées. Toutefois, cette méthode pour estimer l'indice HTPE doit être considérée comme une première approximation, des recherches étant actuellement menées pour obtenir une meilleure et plus pertinente méthode d'évaluation de ce potentiel de toxicité humaine. Toutefois, à l'heure actuelle, les valeurs de DL50 sont utilisées dans le but d'obtenir une comparaison entre les toxicités relatives humaines et terrestres (Ouattara, 2011).

L'impact environnemental en lien avec la production ou les procédés de transformation peut être évalué selon plusieurs méthodes, toutes visant à quantifier l'impact de la consommation de ressources et l'émission de substances polluantes et/ou dangereuses pour l'homme et l'environnement.

La méthode la plus connue et la plus utilisée est **l'analyse du cycle de vie (ACV)**. L'ACV est une méthode d'évaluation normalisée (ISO, 2006) qui permet de comparer entre eux des produits, des procédés et des services, sur la base d'une unité fonctionnelle (Organisation internationale de normalisation, 2006). Le principe de l'ACV repose sur un ou des scores d'impact relatifs à l'unité fonctionnelle, qui sont calculés à partir de l'inventaire des émissions et des ressources consommées tout au long du cycle de vie du produit ou du service étudié, appelé Inventaire du Cycle de Vie (ICV). Des bases de données (par exemple, EcoInvent – (Frischknecht *et al.*, 2007)) fournissent des ICV de produits ou étapes du cycle de vie généralement établis à partir de valeurs moyennes ou statistiques. Ensuite, une méthodologie d'analyse des ICV est utilisée pour transformer les émissions inventoriées de tout le système considéré en score d'impact environnemental, selon des facteurs de caractérisation propres à la méthode choisie (Madoumier, 2016). Ainsi, des scores d'impact environnemental sont calculés dans différentes catégories dites intermédiaires (indicateurs « midpoint ») et/ou de dommages (indicateurs « endpoint »), en fonction du niveau d'analyse entre la cause des émissions et leurs effets (Morales Mendoza, 2013 ; Ouattara, 2011). Par exemple, l'indicateur midpoint « Ozone layer depletion » quantifie le potentiel de destruction de la couche d'ozone, et l'indicateur endpoint « Human health » évalue les risques potentiels pour la santé humaine, auxquels la destruction de la couche d'ozone contribue. Les méthodes mettant en œuvre l'ACV dans l'industrie agroalimentaire se sont développées ces dernières années, avec des applications soit lors de phases de production au champ ou à la ferme (Gonzalez-Garcia *et al.*, 2013b ; Thoma *et al.*, 2013), soit sur le cycle de vie complet de produits alimentaires (Roy *et al.*, 2009). A l'inverse, relativement peu d'études concernent l'impact environnemental des procédés de transformation.

Outre l'ACV, d'autres méthodes peuvent être utilisées pour quantifier l'impact environnemental, parmi lesquelles, il convient principalement de citer :

Les *méthodes thermodynamiques* : basée sur la 2nde loi de la thermodynamique, ces méthodes identifient les changements d'état thermodynamique du système étudié, et plus précisément, les « dégradations » générées par la production ou/et la transformation des produits, et donc d'en quantifier l'impact. Madoumier (2016) indique qu'actuellement trois méthodes

thermodynamiques sont principalement mises en œuvre : (1) l'analyse exergétique[1], dont le principal objectif est de quantifier la destruction d'exergie correspondant à la perte de qualité de l'énergie qui rentre dans le système étudié ; un « rendement exergétique » peut alors être calculé et sert d'indicateur environnemental (Dewulf *et al.*, 2008) ; (2) l'analyse émergétique[2] qui mesure la quantité d'énergie nécessaire à la production ou à la transformation d'un produit, ou au fonctionnement d'un procédé, en considérant que le seul apport d'énergie provient du soleil (Sciubba et Ulgiati, 2005) ; (3) la méthode SEA, *i.e.* « Statistical Entropy Analysis », qui évalue le degré de dilution ou de concentration de composés chimiques, en supposant qu'une dilution est délétère pour l'environnement car générant un impact, et au contraire, qu'une concentration est bénéfique car signifiant que le composé chimique est rendu d'avantage disponible (Sobantka *et al.*, 2012). Madoumier (2016) conclut que l'analyse exergétique est sûrement la plus utilisée en industrie agroalimentaire, citant, notamment, une étude de ce type en lien avec la production de yaourts aromatisés (Sorguven et Ozilgen, 2012) et la quantification des pertes d'exergie, en tant qu'indicateur environnemental, dans un équipement de séchage de pommes de terre (Akpinar *et al.*, 2005).

L'indice de procédé durable (ou SPI, Sustainable Process Index) : cet indice proposé par Krotscheck et Narodoslawsky (1996), puis décrit par Steffens *et al.* (1999), est un indicateur qui mesure l'impact environnemental en termes de surface de la Planète Terre nécessaire pour fournir des biens ou des services. En supposant que le seul apport externe d'énergie à un système est l'énergie solaire, tout système de production ou procédé de transformation requiert une fraction plus ou moins importante de la surface de la Terre pour son fonctionnement du « berceau à la tombe » : matières premières, énergie, personnel, émissions dans l'environnement… Le SPI représente donc la surface totale requise par le système par unité de bien ou de service, divisée par la surface statistiquement disponible pour la fourniture annuelle de biens et de services par personne (Madoumier, 2016). En pratique, le SPI représente la fraction de la surface théoriquement disponible par personne pour garantir sa subsistance dans des conditions durables qui est utilisée pour la production du bien ou du service étudié (Ouattara, 2011). Plus le SPI sera faible, plus le système sera efficient pour produire le bien ou le service.

L'algorithme de réduction des rejets (ou WAR, Waste Reduction algorithm) : cet algorithme introduit par Hilaly et Sikdar (1994) consiste à établir un « bilan environnemental » et est utilisé pour calculer un indice d'impact environnemental potentiel, qui est la somme pondérée de 8 indicateurs d'impact adimensionnels, dont 4 indicateurs globaux ayant trait au réchauffement climatique, à la réduction de la couche d'ozone, au potentiel d'oxydation photochimique et à l'acidification, plus 4 indicateurs « toxicologiques » touchant à la toxicité pour l'homme (2 indicateurs), ainsi qu'à celle des milieux terrestre et aquatique (Young et Cabezas, 1999). Des facteurs d'impact permettent de déterminer la contribution d'une substance à chacun des 8 indicateurs en fonction de la quantité émise (Madoumier, 2016). L'objectif de l'algorithme WAR consiste à fournir un moyen de comparaison de potentiel d'impact environnemental entre des alternatives de production ou de conception d'un procédé : plus l'indice sera faible, plus le système sera respectueux de l'environnement (Ouattara, 2011). Un exemple concret de l'utilisation de cet algorithme est la comparaison des impacts environnementaux et économiques de deux schémas de bio-raffinerie utilisant l'huile de palme par (Rincón *et al.*, 2014).

Parmi ces méthodes, certaines sont basées sur des concepts similaires, rendant leur mise en œuvre très proche : c'est le cas, par exemple, de l'ACV et de l'algorithme WAR où la quantité de ressource utilisée ou de de substance polluante émise est multipliée par un facteur d'impact (certes, spécifique de la méthode) pour quantifier le ou les facteurs environnementaux. Cependant, l'ACV diffère des autres méthodes par la profondeur de son analyse ; en effet, l'ACV permet de balayer et de prendre en compte toutes les étapes du cycle de vie d'un produit, d'un procédé, d'un bien, ou d'un service, et de quantifier les dommages induits, en tenant compte de l'évolution des substances dans le milieu affecté sur la durée (Madoumier, 2016). Les méthodes thermodynamiques sont basées sur un principe très différent où une seule grandeur physique permet de quantifier l'impact du procédé : l'exergie, l'émergie ou la dilution/concentration de composés chimiques. En ce sens,

[1] En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de mesurer la qualité d'une énergie (Source : Wikipédia)

[2] L'émergie (ou mémoire de l'énergie) est l'énergie d'un type précis incorporée dans un bien ou un service ramenée à l'énergie fournie par le soleil (Source : Wikipédia)

l'indicateur SPI peut être rapproché des méthodes thermodynamiques, car il évalue également une seule grandeur physique, en la comparant, toutefois, à une grandeur physique de référence.

4.1.2 Indicateurs économiques

L'évaluation économique des systèmes de production et de transformation consiste à traduire « l'impact » économique de ces systèmes en termes de coûts/bénéfices et donc, de valeurs monétaires. Une analyse économique est nécessaire afin d'établir la rentabilité du système à concevoir, en déterminant, d'une part, les coûts et les recettes liés au fonctionnement du système en fonction de ses performances, et d'autre part, le coût d'investissement de l'unité de production ou de transformation (Madoumier, 2016).

Le coût opératoire d'une unité de production ou de transformation dépend de trois catégories de facteurs (Turton *et al.*, 2008) : (1) les coûts directs qui permettent d'assurer, ou qui sont engendrés par le fonctionnement du système - achat des matières premières, coût des utilités et du traitement des déchets, coût de la main-d'œuvre requise pour la conduite opérationnelle ou par les fonctions support, coûts de maintenance et de réparation, coûts d'analyses diverses, paiement de brevets… ; (2) les coûts fixes représentés par les coûts d'amortissement du système de production ou de transformation, par les taxes et assurances… et (3) les dépenses générales qui englobent les coûts liés à la production, à la distribution, au marketing, ainsi que l'investissement en recherche et développement.

A partir des données sur le coût opératoire, le coût d'investissement et les recettes potentielles, plusieurs indicateurs économiques peuvent être calculés : les plus connus sont le taux de rentabilité interne, le temps de retour sur investissement, le bénéfice actualisé, la valeur nette actuelle et l'encaisse nette cumulative (Chauvel *et al.*, 2001 ; Turton *et al.*, 2008). Ces critères, souvent évalués simultanément (démarche multicritère), apportent des éclairages complémentaires quant au système étudié. Enfin, leur analyse exige souvent de devoir gérer des compromis car ils peuvent être contradictoires entre eux : par exemple, un bénéfice actualisé élevé *vs.* un temps de retour sur investissement très long.

De nouvelles approches pour la détermination d'indicateurs économiques mieux adaptés à la durabilité des systèmes de production et de transformation se sont développés ces dernières années : citons la thermoéconomie qui, en associant un coût à l'exergie, évalue la faisabilité et la rentabilité économiques d'un système (Garcia-Rodriguez et Gomez-Camacho, 1999) ; le coût du cycle de vie (ou LCC, Life Cycle Costing) qui intègre l'ensemble des coûts financiers, environnementaux et sociaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie (Norris, 2001 ; Rebitzer et Seuring, 2003). Cependant, selon Madoumier (2016), ces approches restent peu utilisées car elles nécessitent la construction de bases de données très complètes pour que tous les systèmes puissent être évalués selon ces critères économiques.

4.1.3 Indicateurs sociaux

L'évaluation de l'impact social est peu développée par rapport aux impacts environnementaux et économiques. Le concept « d'ACV sociale » a, pourtant, bien été défini dans les années 2000, mais il reste difficile à utiliser faute de données suffisantes (Norris, 2014). Des critères comme la création d'emplois, la sécurité et la génération de nuisances ont été proposés (Azapagic *et al.*, 2011). En effet, l'emploi semble être un critère prometteur pour définir un indicateur social, à travers, par exemple, le nombre d'emplois locaux cumulés, qui peut être alimenté par la quantité de main d'œuvre requise par chaque équipement inclut dans le procédé de transformation (You *et al.*, 2012), ou par le nombre d'opérateurs nécessaires au bon fonctionnement des équipements de production/transformation (Maroulis et Saravacos, 2007). Cependant, la dimension sociale du développement durable en lien avec la production, la conception et/ou la mise en œuvre des procédés de transformation reste difficilement quantifiable au travers d'indicateurs spécifiques (Madoumier, 2016).

4.1.4 Indicateurs nutritionnels

Les industries de transformation des produits alimentaires doivent garantir l'ensemble des qualités, ainsi que l'hygiène des produits transformés lors des procédés. Des indicateurs, en lien avec la santé de l'Homme, doivent donc être définis. Potter et Hotchkiss (1995) ont proposé de définir la qualité des aliments comme « l'ensemble des critères selon lesquels les consommateurs choisissent d'acheter un produit ». Ces critères peuvent concerner :

- l'apparence : forme, couleur, consistance (viscosité) qui sont typiquement des critères dont l'évaluation est subjective et liée, notamment, au contexte socioculturel ;

- la texture : molle, pâteuse, collante, hachée, croquante… ;
- le goût et l'arôme, qui sont aussi difficiles à mesurer, leur perception étant subjective et individu-dépendante ;
- les qualités nutritionnelles : les teneurs en micronutriments (acides aminés, vitamines…) sont bien mesurables, mais l'impact du procédé appliqué sur la valeur de ces teneurs est souvent méconnu ;
- les propriétés techno-fonctionnelles du produit : pouvoir gélifiant, collant, moussant, émulsifiant…

A partir de plusieurs de ces critères, Darmon *et al.* (2007) ont proposé de construire les indicateurs de qualité « SAIN LIM », en quantifiant les effets favorables ou défavorables pour la santé humaine d'un produit alimentaire, à partir de sa composition. L'indicateur « SAIN - Score d'Adéquation Individuel aux recommandations Nutritionnelles » mesure le respect moyen des Apports Nutritionnels Conseillés de 23 nutriments qu'apporte l'aliment, au travers d'une densité nutritionnelle (ratio nutriments/énergie exprimé pour 100 kcal). Inversement, l'indicateur « LIM - Score de composés à LIMiter sur le plan nutritionnel » quantifie les aspects défavorables de l'aliment et mesure l'excès par rapport aux valeurs maximales recommandées de consommation de sel, d'acides gras saturés et de sucres ajoutés. En introduisant deux seuils d'acceptabilité (SAIN > 5 et LIM < 7,5), les aliments vont être classés en quatre catégories : (1) fort SAIN et faible LIM : les aliments recommandés pour la santé, *i.e.* la plupart des fruits et légumes, le pain complet et certains produits animaux (yaourts et fromages frais nature, viandes maigres, poissons, abats et œufs et le pain complet) ; (2) faible SAIN et faible LIM : les aliments neutres pour la santé, i.e. les fruits secs, le pain blanc, les pâtes et le riz blanc ; (3) fort SAIN et fort LIM : une catégorie d'aliments intermédiaire à recommander en petite quantité ou occasionnellement, *i.e.* les poissons fumés et/ou salés, le jambon, les viandes rouges et certains fromages; et (4) faible SAIN et fort LIM : les aliments à limiter, *i.e.* la grande majorité des charcuteries, les gâteaux et sucreries, les fromages gras et salés, toutes les matières grasses et les sauces. Le système SAIN - LIM permet d'évaluer séparément les aspects positifs et négatifs de chaque aliment considéré individuellement. Il peut être considéré, par sa définition, comme un indicateur multicritère. Il présente, cependant, quelques imperfections. Dans cette version, ce système classe toutes les matières grasses ajoutées dans la même catégorie (« à limiter »), sans faire de distinction, notamment entre matières grasses végétales et animales. Madoumier (2016) précise que ces indicateurs, qui sont basés uniquement sur la connaissance de la composition précise du produit, évaluent la qualité « nutritionnelle » du produit, sans lien explicite avec le procédé de transformation qui a permis d'aboutir au produit.

4.1.5 Indicateurs sanitaires

La sécurité microbiologique et chimique des produits alimentaires doit être au cœur des préoccupations sanitaires, puisque ces produits sont destinés à l'alimentation humaine. La réglementation européenne stipule que seules des denrées alimentaires sûres doivent être mises sur le marché (article 14 du règlement CE 178/2002 (Commission européenne, 2002)). Il est ainsi interdit de mettre sur le marché une denrée alimentaire qui est dangereuse pour le consommateur. Pour déterminer si une denrée alimentaire est dangereuse, il faut tenir compte de la présence qualitative ou quantitative d'un danger mais aussi des conditions d'utilisation attendues, de l'information fournie au consommateur, de l'effet probable sur la santé, et encore de la sensibilité spécifique de certains consommateurs.

Cette sécurité sanitaire des produits agricoles ou transformés se mesure, soit en estimant le nombre de cas de maladies (et le fardeau sanitaire) associés à ce produit (Anses, 2017; 2018) ; *cf.* Chapitre 3), soit de manière indirecte au travers de quantités de microorganismes ou de substances nocives, qui doivent être maintenues à des niveaux inférieurs à ceux fixés par la règlementation en fonction du type de microorganismes ou de substances chimiques.

L'intégration de ces indicateurs sanitaires dans des approches d'analyse multicritère des qualités des produits alimentaires nécessite une formulation mathématique pour permettre leur prédiction en fonction des différents scénarios à prioriser (Madoumier, 2016).

Pour les dangers microbiologiques, de nombreux modèles décrivant la qualité sanitaire d'un aliment existent (Guillier *et al.*, 2016). Par exemple, il existe de nombreux modèles cinétiques décrivant sous la forme d'une population de microorganismes présente dans un aliment ou ceux décrivant la dénaturation de certaines molécules pour évaluer l'impact du procédé sur la qualité des aliments, à partir de cinétiques de dégradation basées sur la température, l'activité de l'eau et la composition du milieu (Maroulis et Saravacos, 2003). Ainsi, des indicateurs de suivi de la qualité ou de la sécurité peuvent être bâtis à partir de modèles de dégradation, mais il faut admettre que la prise en compte des critères de qualité dans les approches multicritères est resté relativement rare, non seulement par la difficulté de quantification de ces critères, mais aussi par le

manque de connaissances de l'impact des conditions opératoires du procédé sur la qualité du produit transformé (Madoumier, 2016). Toutefois, ces dernières années ont vu la publication de plusieurs études combinant des indicateurs sanitaires pour des dangers chimiques et microbiologiques à d'autres indicateurs qu'ils soient nutritionnels ou de durabilité (Boue *et al.*, 2017 ; 2018 ; Duret *et al.*, 2019 ; Persson *et al.*, 2018).

4.2 Description des outils d'analyse multicritère, d'optimisation multi-objectif et d'aide à la décision

Selon Roy et Bouyssou (1985), « l'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans le processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé, d'autre part ». L'aide à la décision est donc un processus qui utilise un ensemble d'informations disponibles à un instant donné afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis. Dans le cadre de la décision multicritère, l'objet de la décision est formé par un ensemble d'actions ou alternatives. La prise de décision consiste à faire un choix parmi des alternatives possibles, et résulte d'un processus cognitif complexe. La théorie de la décision est un vaste domaine de recherche qui vise à comprendre les enjeux et mécanismes sous-jacents à la prise de décision.

En particulier, les problèmes de conception ou d'ingénierie des systèmes font souvent état de problèmes décisionnels dans un environnement multicritère. Plusieurs objectifs contradictoires (typiquement le coût vs. la qualité) doivent être satisfaits simultanément, ce qui implique la recherche d'une solution présentant le meilleur compromis possible. Une discipline particulière de la recherche opérationnelle s'est ainsi spécialisée dans la structuration de ce type de problèmes : il s'agit de l'aide à la décision multicritère (Multi-Criteria Decision Analysis or Making – MCDA or MCDM). Parmi les outils permettant de structurer de tels problèmes, les outils d'optimisation multi-objectif (Multiobjective optimization – MOO) connaissent un large succès car ils visent à trouver la meilleure solution possible (Raffray, 2014).

4.2.1 Méthodes d'analyse multicritère et méthodes d'optimisation multi-objectif

La notion de « choix » dans le domaine de l'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) repose sur les concepts de solution, de préférence et de variables d'observation. Le « choix » d'un décideur est donc défini comme la sélection d'une solution candidate selon un processus de décision qui fait appel à la relation de préférence. La meilleure solution est donc celle qui est préférée par le décideur. Cependant, ce choix repose sur l'évaluation et la comparaison simultanée de multiples indicateurs de performances appelés variables d'observation. Le but de la MCDA est donc d'assister le décideur dans cet environnement multidimensionnel. Il existe ainsi deux catégories de problèmes, selon que le décideur soit en présence (i) d'un groupe de solutions candidates bien définies à comparer/classer, ou (ii) qu'il existe un très grand nombre (voire une infinité) d'alternatives non encore définies. La notion de préférence est fondamentale, car c'est elle qui permet au décideur de sélectionner la meilleure solution.

Certaines méthodes de résolution développées en MCDA sont structurées selon une relation de préférence déjà connue : ce sont les méthodes *a priori*. Les méthodes scalaires sont pour la plupart des méthodes *a priori*, car elles consistent à transformer le problème multi-objectif en un problème mono-objectif, soit en définissant un nouveau critère comme somme pondérée de l'ensemble des critères et des facteurs scalaires attribués à chaque critère (Timmerman, 1986), soit en introduisant des contraintes additionnelles et un nouveau critère (Ouattara, 2011). Par exemple, la méthode de pondération des fonctions objectif, ou « approche naïve », consiste à former une unique fonction objectif à partir de la somme pondérée des objectifs. Une autre méthode utilise un objectif idéal (ou de référence), et il s'agit, dans ce cas, de minimiser la distance entre cet objectif et les solutions recherchées. Pour plus d'informations sur ces méthodes *a priori*, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage écrit par Collette et Siarry (2002). A titre d'illustration, De Jong (1996) a utilisé un programme pour optimiser un procédé de traitement UHT du lait en fonction de la qualité du produit et des coûts opératoires, mais sans tenir compte de l'impact environnemental. Ce programme minimise une fonction objectif constituée, d'une part, d'un critère de qualité du lait calculé à partir de la somme des taux de dénaturation de certains constituants du lait et, d'autre part, d'un critère formé à partir de variables opératoires du procédé ; le problème a ainsi été réduit à un problème mono-objectif, permettant d'obtenir une réduction de près de 50% des coûts opératoires (De Jong, 1996). Dans les méthodes *a priori*, l'utilisateur définit le compromis qu'il désire réaliser avant de lancer la méthode de résolution et de l'employer de façon séquentielle pour obtenir l'ensemble des solutions de compromis. Cela peut donc conduire rapidement à un nombre d'évaluations de critères prohibitif (Ouattara, 2011).

Cependant, il existe des problèmes trop complexes où le décideur n'est pas en mesure d'anticiper son schéma préférentiel. Aussi, il existe des méthodes spécifiques - méthodes interactives ou *a posteriori* - qui génèrent d'abord un ensemble de solutions optimales dites non-dominées, ou Pareto-optimales[3].

Les méthodes interactives forment la famille des méthodes dites progressives et consistent à laisser l'utilisateur spécifier ses préférences dans le choix des compromis entre les différents objectifs au cours d'un processus d'optimisation. Par exemple, dans la méthode numérique du Simplex (Cardoso et Climaco, 1992 ; Cerda *et al.*, 2016), un algorithme évalue à l'aide des fonctions objectif des solutions de départ choisies par l'utilisateur, supprime « la moins efficace » au sens de l'optimisation, et crée à partir de la solution rejetée un nouveau point. L'utilisateur détermine alors si les objectifs sont atteints, et dans le cas contraire, relance l'algorithme.

Les méthodes *a posteriori* exploitent généralement des méta-heuristiques (Madoumier, 2016). Une méta-heuristique se définit comme étant un algorithme inspiré de la vie courante ou de phénomènes naturels et destiné à résoudre des problèmes pour lesquels les méthodes classiques déterministes s'avèrent inefficaces. Les méta-heuristiques ont généralement trois points communs principaux : (1) la recherche d'un optimum global à partir d'un ensemble de solutions sur le domaine de chaque fonction objectif ; (2) le caractère stochastique (aléatoire) du calcul de nouvelles solutions à chaque itération ; (3) la dégradation des critères d'optimisation est autorisée. Parmi les principales méta-heuristiques, il convient de citer le recuit simulé, la recherche avec tabous et les algorithmes génétiques, qui ont donné lieu à diverses méthodes d'optimisation.

Le recuit simulé se base sur le principe du recuit en métallurgie, qui consiste à porter un métal à haute température, puis à le laisser refroidir lentement afin que les atomes se réorganisent et forment une structure ordonnée. Dans cette méthode proposée à l'origine par Kirkpatrick *et al.* (1983), un point de départ pour les solutions aux objectifs est choisi au hasard, puis un nouveau point est sélectionné selon une probabilité dépendante de l'écart avec le point de départ et de la « température » du système, qui est progressivement diminuée. Les méthodes PASA (« Pareto Archived Simulated Annealing » (Hanoun *et al.*, 2011)) développée par EDF et MOSA (« Multiple Objective Simulated Annealing » (Ulungu *et al.*, 1999 ; Varadharajan et Rajendran, 2005)) sont basées sur le recuit simulé, et diffèrent principalement dans le calcul de la probabilité d'acceptation d'un nouveau point (nouvel « état ») correspondant à une solution du problème multi-objectif (Madoumier, 2016).

Dans la recherche avec tabous proposée par Glover (1989), des voisins du point de départ choisis arbitrairement sont construits à chaque itération pour explorer le domaine des solutions aux fonctions objectifs, mais en tenant compte du calcul des voisins à la précédente itération pour éviter de retourner à des solutions déjà testées (on parle de recherche locale) ; la liste de ces mouvements interdits a donné son nom à cette méta-heuristique (Glover *et al.*, 1995 ; Liang et Chao, 2008). Cette méthode se distingue des méthodes de recherche locale simples par l'introduction de la notion d'historique dans la politique d'exploration des solutions afin de diriger au mieux la recherche dans l'espace. Au final, la méthode de recherche avec tabous se révèle être d'une grande efficacité et d'un fonctionnement simple à comprendre. Par contre, elle comporte plusieurs paramètres peu intuitifs et elle est très gourmande en ressources informatiques, si la liste de tabous est longue, tout en présentant un risque de manquer de nombreux optima locaux.

Les algorithmes génétiques reproduisent les processus d'évolution génétique et de sélection naturelle décrits par Darwin : une « population » de solutions de départ subit des modifications génétiques par croisement, mutation et sélection d'éléments de son ADN (les « gênes » correspondent aux valeurs que prennent les fonctions objectifs), en fonction des performances de chaque individu de départ pour former de nouveaux individus, c'est-à-dire des solutions potentiellement plus performantes pour le problème multi-objectif (Leardi *et al.*, 1992). L'opérateur de « sélection » permet de reformuler une population « fils », en copiant certains individus de la population « père » selon leur chance de survie. Les chances de survie sont proportionnelles au classement de chaque individu. L'élitisme permet d'assurer la survie du meilleur individu. L'opérateur de « croisement » permet de combiner les gènes de deux individus « pères », et ainsi créer un individu « fils » différent. L'opérateur de « mutation » permet de modifier aléatoirement les gènes des individus, en restant dans le domaine des valeurs possibles de l'espace de décision. Les opérateurs « croisement » et « mutation » ne sont pas systématiquement appliqués à tous les individus, car ils obéissent à une probabilité

[3] L'optimisation multiobjectif peut être simplement définie comme le domaine qui recherche un équilibre tel que l'on ne peut pas améliorer un critère sans détériorer au moins un des autres critères. Cet équilibre est appelé l'optimum de Pareto (en hommage à l'Italien Vilfredo Pareto qui a introduit cette notion en économie) et conduit à la génération d'un ensemble de solutions dites Pareto-optimales.

d'exécution. Ce sont eux qui permettent d'explorer aléatoirement l'espace de décision, en modifiant les gènes de la population initiale (Raffray, 2014).

Plusieurs méthodes mettant en œuvre des algorithmes génétiques ont été développées, les principales étant :

VEGA (« Vector Evaluated Gentic Algorthm ») : conçue par Schaffer (1984), VEGA est l'une des premières méthodes basées sur des algorithmes évolutifs. Son principe est le suivant : (1) avant les opérations de croisement et de mutation, la population est divisée en sous-populations en fonction du nombre de critères, (2) chacune des fractions de la population subit la procédure de sélection et (3) une fois les sélections réalisées, la population est re-mélangée, puis les procédures de croisement et de mutation sont mises en œuvre de manière classique. Le défaut majeur de la méthode VEGA est de conduire à une convergence vers des optima propres à chacun des critères (Ouattara, 2011).

MOGA (« Multiple Objective Genetic Algorithm ») : cette méthode (Fonseca et Fleming, 1993) est basée sur l'utilisation du concept de dominance au sens de Pareto. Chaque individu de la population est rangé en fonction du nombre d'individus qui le dominent. Ensuite, l'utilisation d'une fonction de notation permet de tenir compte du rang de l'individu et du nombre d'individus ayant le même rang. Selon Ouattara (2011), le principal défaut de la méthode MOGA est de ne pas proposer suffisamment de diversité dans la représentation des solutions.

NSGA (« Non-dominated Scoring Genetic Algorithm »), qui est basée sur les mêmes principes que la méthode MOGA, avec, toutefois, comme différence principale le fait que les individus sont triés par rang de non domination (Siinivas et Deb, 1994). En premier lieu, un rang (dit de Pareto) est affecté à chaque individu de la population. Tous les individus non dominés de même rang sont classés selon un front, auquel est affecté une efficacité inversement proportionnelle au rang de Pareto du front considéré. L'objectif est d'avoir une répartition uniforme des individus d'un même front, et ce, afin de garantir une bonne diversité des solutions. Pour ce faire, on affecte aux individus classés une nouvelle valeur d'efficacité, en tenant compte du voisinage autour de chaque individu, au travers d'un paramètre de « distance de partage » pour estimer la densité de solutions autour d'un point de la population. Cette méthode requiert un temps de calcul long, du fait du tri et du partage, et nécessite de spécifier le paramètre de partage, peu facile à fixer (Ouattara, 2011). Une version améliorée de l'algorithme NSGA (appelée NSGA II), gommant ses principaux défauts, a été proposée par Deb *et al.* (2002) et est actuellement l'une des méthodes mettant en œuvre des algorithmes génétiques les plus utilisées. D'un point de vue général, l'algorithme NSGA II permet de maintenir l'élitisme et la diversité sans ajouter de paramètres supplémentaires, tout en étant simple à utiliser du fait d'un nombre minimum de paramètres de réglage.

Gomez *et al.* (2010b) ont proposé six variantes d'algorithmes génétiques, qui ont été rassemblées dans une bibliothèque dénommée Multigen. L'objectif de la création de cette bibliothèque était de pouvoir disposer, dans un seul outil, de plusieurs algorithmes susceptibles de résoudre plusieurs types de problèmes multi-objectifs, avec ou sans contrainte, impliquant différents types de variables (Ouattara, 2011).

Parmi les méthodes d'optimisation multi-objectifs, les procédures stochastiques ou évolutives, comme les algorithmes génétiques, du fait de leur mode opératoire, sont parfaitement adaptées à la résolution des problèmes multi-objectifs en raison de leur parallélisme implicite : de ce fait, elles sont très utilisées dans de nombreux secteurs de l'ingénierie, où l'amélioration de solutions existantes est souvent l'objectif recherché (Gomez *et al.*, 2010a). De plus, les algorithmes génétiques présentent un fort potentiel pour l'écoconception, car ils permettent de résoudre des problèmes multi-objectifs sans faire intervenir de pondération, en mettant donc sur un pied d'égalité l'ensemble des critères. Ils permettent aussi d'obtenir directement le front de Pareto, car le processus itératif de la méthode conduit à un traitement simultané de plusieurs solutions (Madoumier, 2016).

4.2.2 Outils d'aide à la décision

Au final, la phase d'optimisation multi-objectifs par algorithme génétique conduisant à un ensemble de solutions optimales au sens de Pareto, il importe donc de déterminer celle(s) qui corresponde(nt) aux meilleurs choix afin de guider le décideur dans sa tâche finale, ce qui requiert l'utilisation de méthodes d'aide à la décision pour rechercher la ou les meilleures solutions de compromis. Depuis les années 1990, les méthodes d'aide à la décision ont été largement utilisées dans le domaine de la recherche et différentes approches ont été développées, comprenant les méthodes SODM (en anglais, Single Objective Decision-Making), MCDM et DSS (en anglais, Decision Support Systems). Une classification de ces différentes méthodes d'analyse de la décision a été faite par Zhou *et al.* (2006) (*cf.* Figure 4.1 ci-après).

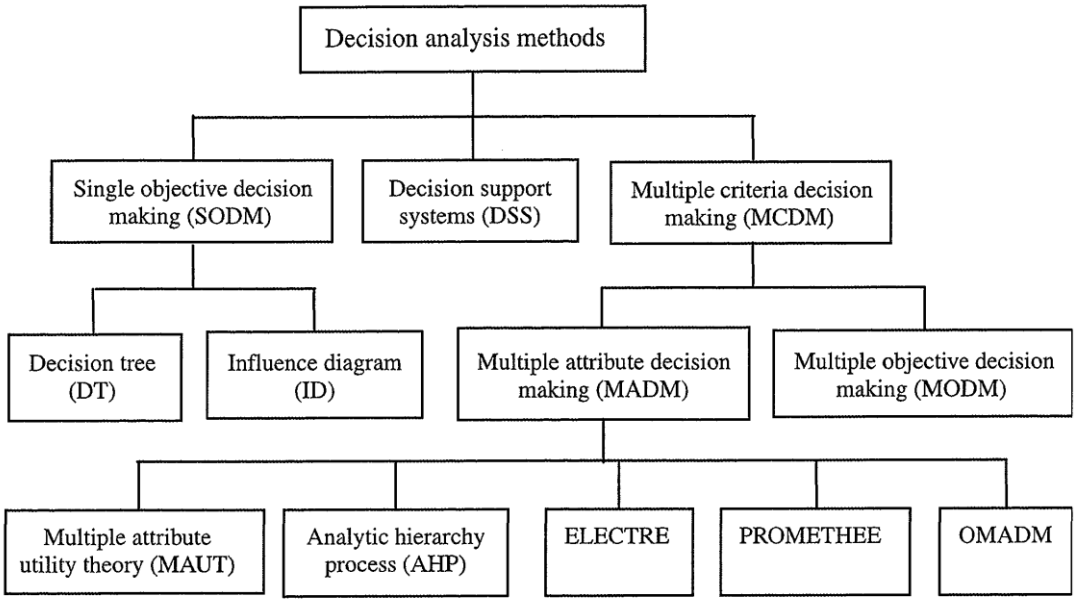


Figure 4.1 : Classification des différentes méthodes d'analyse de la décision (d'après Zhou et al. (2006))

Parmi ces méthodes d'aide à la décision qui diffèrent principalement dans la manière dont sont définies les relations d'ordre entre les solutions et dans le traitement des valeurs attribuées aux relations entre solutions, il convient de citer les plus connues, à savoir :

La méthode TOPSIS - « Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution » (Hwang et Yoon, 1981 ; Yoon et Kim, 2017) : l'idée fondamentale de cette méthode consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale, *i.e.* la meilleure sur tous les critères, et à s'éloigner le plus possible de la pire, *i.e.* celle qui dégrade tous les critères. D'une manière générale, la méthode TOPSIS, qui est facile à mettre en œuvre, permet d'ordonner les actions et son grand apport est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal (Hammami, 2003). En outre, elle est sensible à la volonté du décideur. Toutefois, certaines limites caractérisent cette méthode : les attributs doivent être de nature cardinale et les préférences sont fixées *a priori*. Par ailleurs, si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.

La méthode MAUT – « Multiple Attribute Utility Theory » (Keeney et Raiffa, 1976) : cette méthode repose sur l'idée fondamentale que tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction qui agrège tous les attributs. Elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). A ce moment, on parle de fonction d'utilité et non plus de fonction de valeur. La méthode MAUT s'applique alors dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite (fini), une articulation *a priori* des préférences, et un univers incertain (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont incertaines). Par contre, la méthode MAUT est très exigeante d'un point de vue informationnel et les fonctions d'utilité sont difficiles à concevoir. En outre, elle exige plusieurs vérifications telles que l'indépendance mutuelle au sens de l'utilité. La méthode MAUT exige une articulation *a priori* des préférences et une évaluation des actions sur des échelles cardinales (Hammami, 2003).

La méthode AHP – « Analytic Hierarchy Process » (Saaty, 1980) : cette méthode consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. Les points forts de la méthode AHP sont la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique et l'utilisation d'une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur. Bien qu'elle soit très populaire, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs critiques, parmi lesquelles : (1) un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires ; (2) le problème de renversement de rang faisant que deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser, suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions ; (3) l'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais (Hammami, 2003). De ce fait, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs extensions telles que la prise en compte de l'incertitude (AHP stochastique ou Stochastic AHP ; (Jalao *et al.*, 2014; Ramanathan, 1997)) et du flou (AHP flou ou Fuzzy AHP ; Chang (1996) dans l'expression des jugements.

Les méthodes ELECTRE - « Elimination Et Choix Traduisant le REalité » - sont basées sur l'approche du surclassement. Le développement de ces méthodes MCDA a commencé en France à la fin des années 1960 (Roy et Bouyssou, 1985). Les méthodes ont été mises au point pour tenter de tenir compte d'hypothèses moins solides, comme l'existence d'une fonction d'utilité ou d'une additivité, et pour exiger moins d'informations de la part des décideurs comme l'intensité des préférences ou les taux de substitution (associés à la notion de compensation entre les critères), qui sont nécessaires pour mettre en œuvre certains modèles de mesure de la valeur (comme les méthodes MAUT ou AHP). Les méthodes fondées sur le surclassement supposent que la décision est un processus itératif au cours duquel les décideurs peuvent modifier leurs préférences en fonction des nouvelles informations fournies ou après avoir mieux compris le problème décisionnel. Pour cette raison, les méthodes basées sur le surclassement sont construites pour permettre au début l'incomparabilité des alternatives et éviter ainsi un surclassement complet et prématuré et des conclusions. Le nom "ELECTRE" vient du français "ELimination Et Choix Traduisant la REalite". Toutes les méthodes ELECTRE ont en commun l'utilisation de relations de surclassement entre alternatives. Parmi les différentes méthodes ELECTRE, la méthode ELECTRE III est la méthode la plus avancée. Elle vise à classer les alternatives, en général du meilleur au pire (Roy, 1996). Le principe fondamental d'ELECTRE III découle du traitement d'un système de comparaisons par paires des alternatives. Une alternative *a* surclasse une alternative *b* si la première alternative est considérée comme au moins aussi bonne que la seconde. L'ELECTRE III prend explicitement en compte les seuils d'indifférence, de préférence et de veto.

La méthode PROMETHEE - « Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations » (Behzadian *et al.*, 2010; Brans *et al.*, 1986) : cette méthode se base sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action a_i par rapport à une autre action a_k. Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une forme parmi six formes de courbes possibles. Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence. Les méthodes PROMETHEE sont faciles et compréhensibles par l'utilisateur. Plusieurs variantes de la méthode originelle PROMETHEE ont été développées : PROMETHEE III (conduit à un ordre d'intervalle), PROMETHEE IV (lorsque l'ensemble des solutions admissibles est un continuum) et enfin PROMETHEE V, cette méthode ayant été conçue pour des choix multicritères présentant des contraintes de segmentation.

Toutes les méthodes d'aide à la décision précédemment décrites permettent de classer « rationnellement » des solutions non dominées (Madoumier, 2016). Par contre, en matière d'approche multicritère et d'aide à la décision, il n'existe pas de méthode universelle, adaptée à toutes les situations, mais différentes techniques sont conçues pour traiter des cas spécifiques. En effet, l'absence de cadre formel pour comparer les différentes méthodes entre-elles, rend difficile leur acceptation et surtout leur utilisation de manière appropriée. En fait, il n'existe pas de méthode parfaite applicable à toutes les situations décisionnelles. Tout système d'aide multicritère à la décision est donc fonction du contexte pour lequel il a été développé (Guitouni *et al.*, 2010).

4.3 Exemples d'applications dans la chaîne alimentaire en lien avec les produits animaux

4.3.1 Durabilité de la chaîne d'approvisionnement des produits

Concept d'éco-efficacité :

Jusqu'à récemment, les chaînes d'approvisionnement se concentraient principalement sur la fourniture de produits de haute qualité à faible coût et ne prêtaient que peu d'attention à l'impact environnemental et à l'épuisement des ressources naturelles. Cependant, les ressources naturelles se raréfient et leur demande devrait augmenter en raison de la croissance de la population mondiale. La détérioration croissante de l'environnement suscite l'intérêt croissant des chercheurs et des praticiens pour développer des chaînes d'approvisionnement vertes, qui se différencient des chaînes d'approvisionnement traditionnelles pour inclure des activités qui minimisent l'impact environnemental d'un produit, tout au long de son cycle de vie (Beamon, 1999). Pour satisfaire les besoins futurs d'une population croissante, les chaînes d'approvisionnement doivent augmenter la productivité et éliminer les inefficacités actuelles. Pour ce faire, des outils d'aide à la décision, qui prennent en compte les caractéristiques des produits, tels que, par exemple, les risques accrus liés à l'incertitude du marché et de la productivité, peuvent être utilisés pour évaluer les innovations techniques au niveau de la chaîne et optimiser la gestion logistique. Éliminer les inefficiences et concevoir des chaînes d'approvisionnement « vertes » impliquent une quantification de ce qui est réalisable d'un point de vue technique et un calcul des compromis entre indicateurs économiques et environnementaux (Dekker *et al.*, 2012). Cela conduit au concept d'éco-efficacité, qui vise à maintenir ou augmenter la valeur de la production économique, tout en réduisant l'impact de l'activité économique sur l'environnement (Braungart *et al.*, 2007). L'éco-efficacité, par conséquent, combine les exigences environnementales et économiques (Govindan *et al.*, 2014b), et une « solution éco-efficace » est une solution dans laquelle des

dommages environnementaux supplémentaires ne peuvent être évités qu'à des coûts plus élevés (Dekker *et al.*, 2012). L'étude de l'éco-efficacité dans les chaînes d'approvisionnement vertes exige la prise en compte de plusieurs critères contradictoires, et implique donc des compromis entre les différents objectifs contradictoires (Wang *et al.*, 2011). L'inclusion de critères multiples dans les chaînes d'approvisionnement est un moyen naturel de traiter différentes dimensions de la durabilité (Eskandarpour *et al.*, 2015 ; Kannegiesser *et al.*, 2015).

Dans ce contexte, la chaîne d'approvisionnement en produits alimentaires diffère de celle en lien avec les autres produits, car les aliments présentent des changements de qualité continus tout au long de cette chaîne, jusqu'à la consommation finale. Par conséquent, concernant les aliments, la qualité, la santé et la sécurité nécessitent une considération centrale. L'importance de la sécurité sanitaire des aliments a été maintes fois discutée, après la survenue de crises alimentaires (présence de salmonelles dans le poulet ou les bovins infectés par l'ESB…), ce qui a entraîné des maladies graves, voire mortelles, et des rappels de produits importants. La durée de conservation limitée des produits alimentaires, les exigences en matière de température et d'humidité (Lecoq *et al.*, 2017), les effets d'interaction possibles entre les produits, les délais d'exécution pour la livraison des produits, les attentes élevées des clients et les faibles marges bénéficiaires font de la gestion de la distribution des aliments un domaine difficile à relever (Akkerman *et al.*, 2010). A ce propos, la périssabilité des produits alimentaires est une source importante d'inefficacité car elle contribue à la production de déchets.

Indicateurs d'éco-efficacité :

Du fait de la production de produits finis à partir de matières premières et la livraison de produits aux clients finaux, les chaînes d'approvisionnement nuisent, inévitablement, à l'environnement (Tang et Zhou, 2012). Dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement, les principaux objectifs de l'entreprise, sur le plan environnemental, sont la réduction des coûts, l'amélioration de la réactivité et la prévention des dommages environnementaux permanents (Soysal *et al.*, 2012). Afin de quantifier l'impact économique et environnemental des activités de la chaîne d'approvisionnement et d'améliorer les performances environnementales et économiques, un ensemble d'indicateurs d'éco-efficacité doit être sélectionné et pris en compte pour appuyer la prise de décision. Outre les indicateurs couramment utilisés pour rendre compte des performances économiques des chaînes d'approvisionnement, tels que les coûts totaux ou les bénéfices, la littérature montre que les principaux indicateurs rendant compte de l'éco-efficacité sont, classiquement, les émissions des GES, la consommation d'énergie et la consommation d'eau (Dekker *et al.*, 2012 ; Seuring, 2013 ; Soysal *et al.*, 2012). Les produits sont caractérisés par la qualité, les fluctuations de la demande et des prix, la saisonnalité et la périssabilité (Akkerman *et al.*, 2010 ; van der Vorst *et al.*, 2009). Le changement de qualité dans le temps est également associé à une incertitude car ce changement n'est pas connu *a priori* avec précision, car il dépend des conditions environnementales.

Ces dernières années, la recherche s'est concentrée sur l'amélioration de la performance environnementale des chaînes d'approvisionnement (Brandenburg *et al.*, 2014). Pour classer les problèmes de décision dans un cadre conceptuel, Shukla et Jharkharia (2013) ont proposé une classification qui permet de distinguer 3 problèmes de décision ayant une incidence sur l'éco-efficience dans les chaînes d'approvisionnement : la planification de la production, la planification de la distribution et la gestion des stocks.

La planification de la production fait généralement référence à des décisions sur la manière dont la production est organisée, comment, quand et combien de produits sont fabriqués, et quand les produits deviennent disponibles, afin de minimiser les coûts opérationnels de production et d'utiliser simultanément les ressources et les capacités disponibles de manière efficace. Dans la planification de la production, deux aspects jouent un rôle important (Dekker *et al.*, 2012). Le premier aspect concerne le processus de production et la manière dont le produit est fabriqué, c'est-à-dire quelles ressources sont utilisées pour fabriquer le produit et quel est l'impact environnemental lié à sa production. Les décisions associées portent, par exemple, sur les matières premières et les technologies à utiliser, ainsi que sur l'endroit où les utiliser, pour créer le bon nombre de produits finis à temps pour satisfaire la demande du client. Ces décisions ont un impact sur l'efficacité écologique, car elles déterminent les quantités de matières premières, d'énergie, d'eau et de carburant utilisées, ainsi que la quantité totale de déchets produits. Le deuxième aspect important qui concerne la planification de la production est de savoir si la valeur d'un produit peut être partiellement récupérée après son utilisation. Cette question concerne également les chaînes d'approvisionnement en produits alimentaires, car les produits qui ne peuvent pas être vendus, en raison d'exigences de qualité, et qui sont considérés comme des pertes après récolte possèdent souvent encore des nutriments précieux. Si les produits ou leurs composants peuvent être traités et réutilisés, cela pourrait améliorer l'efficacité, en réduisant la quantité totale de déchets et donc la nécessité d'utiliser d'autres matières premières (Banasik *et al.*, 2018).

La planification de la distribution fait référence à deux sujets principaux : la sélection des installations et le transport. Les installations sont des emplacements physiques dans une chaîne d'approvisionnement, comprenant des sites de production, des centres de distribution, des aéroports, des gares ferroviaires ou des ports. Les décisions connexes sur le rôle, l'emplacement, la taille et le nombre d'installations ont un impact important sur la performance d'une chaîne d'approvisionnement. Les décisions concernant les installations affectent, non seulement, les coûts d'exploitation totaux, mais également l'utilisation énergétique des installations. De plus, l'emplacement et le nombre d'installations déterminent la distance totale parcourue par un produit avant d'atteindre la destination finale. Les décisions relatives aux installations ont donc une incidence sur le temps total nécessaire pour atteindre le client final, ce qui est un aspect important pour les produits dont la qualité se dégrade au fil du temps (Banasik *et al.*, 2018). Le second aspect de la planification de la distribution est le transport, qui fait référence au mouvement des produits entre les installations. Les décisions en matière de transport incluent la sélection du mode de transport, du type et de la taille de l'unité de transport, du choix du carburant, du chargement et de l'itinéraire des véhicules. Les activités de transport représentent 15% des émissions totales de GES dans le monde (TSP, 2010[4]) et représentent en même temps jusqu'à deux tiers des coûts logistiques totaux (Akkerman *et al.*, 2010). En raison de la manipulation et de la détérioration des produits alimentaires, le transport est également la principale cause de gaspillage alimentaire dans les chaînes d'approvisionnement (Shukla et Jharkharia, 2013). Cela montre que les choix de transport ont un impact considérable sur la performance environnementale et économique. De nouveaux équipements de transport permettent de réduire la consommation de carburant observée dans les avions ou les navires (Dekker *et al.*, 2012), et les innovations technologiques permettent le transport de produits dans des conditions de refroidissement ou de gel. Cela permet de contrôler la dégradation de la qualité du produit au fil du temps, mais entraîne en même temps une consommation d'énergie supplémentaire. Ces innovations technologiques font des problèmes de transport un environnement très dynamique nécessitant de fréquents réexamens de choix antérieurs (Akkerman *et al.*, 2010).

Les décisions en matière de gestion des stocks déterminent la durée d'attente du produit avant utilisation. En ce qui concerne les produits dont la durée de conservation est limitée, le facteur le plus important est la prise en compte de la détérioration des produits au fil du temps (Shukla et Jharkharia, 2013). La détention des stocks est associée aux coûts de possession, et dans le cas de conditions de conservation contrôlées comme le stockage congelé ou réfrigéré, qui est souvent utilisé pour les produits périssables, la détention de stocks est également associée à un impact environnemental du fait de la consommation d'énergie (Dekker *et al.*, 2012).

Approche multicritère :

Les décideurs en matière de chaînes d'approvisionnement sont confrontés à des critères de performance économique et environnementale multiples et en grande partie contradictoires, ce qui implique par définition que les approches d'aide à la décision multicritère constituent des outils précieux, pour tester l'efficacité de diverses configurations et stratégies de fonctionnement de ces chaînes d'approvisionnement (Aramyan *et al.*, 2011 ; Ramudhin *et al.*, 2010).

Sur ce point, la revue bibliographique (188 articles analysés, publiés dans 68 journaux différents) réalisée par Banasik *et al.* (2018) et visant à faire un bilan sur les outils d'analyse multicritère appliqués aux chaînes d'approvisionnement en lien avec des problèmes de production, de distribution et d'inventaire, est très intéressante. Ces auteurs ont constaté que le développement d'outils d'analyse multicritère visant à appuyer les décisions en matière de production, de distribution et d'inventaire dans les chaînes d'approvisionnement est en pleine expansion, ces dernières années. Cependant, l'utilisation de ces outils pour concevoir les chaînes d'approvisionnement « vertes » n'est pas mentionnée dans les nombreux journaux de gestion des opérations et de gestion des chaînes d'approvisionnement, ce qui est révélateur d'une lacune dans la littérature (Banasik *et al.*, 2018). De plus, la plupart des publications étudiées traitent de problèmes de production et de distribution, peu d'études portent sur la gestion des stocks, sûrement parce que les décisions en matière de gestion des stocks n'influencent que faiblement l'impact environnemental. Même dans le cas du stockage des produits alimentaires qui nécessite souvent des conditions de température contrôlées et donc une consommation d'énergie conséquente, aucune étude sur la gestion des stocks de produits alimentaires n'a été rapportée (Banasik *et al.*, 2018). Toutefois, la périssabilité et la dégradation de la qualité des produits ont, toutefois, été prises en compte dans quelques publications, notamment par Soysal *et al.* (2014) et Govindan *et al.* (2014a) au travers d'un nombre maximal de périodes de temps consécutives pendant lesquelles un produit alimentaire peut être stocké. D'autres auteurs ont défini un taux de dégradation donné pendant le stockage, en supposant que sur une période donnée, une certaine fraction des produits stockés se détériore et ne peut donc pas être utilisée (Miret *et al.*, 2016; You *et al.*, 2012). Bortolini *et al.* (2016) ont proposé une fonction qualité décrivant la

[4] The shift project data portal. http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-GHG-Emissionsby-Sector

durée de conservation et permettant d'évaluer la baisse de qualité au fil du temps et la probabilité d'achat correspondante sur le marché. Enfin, selon Banasik *et al.* (2018), il est très surprenant qu'aucune attention n'ait été réellement accordée, à ce jour, aux principes d'économie circulaire dans les publications traitant des produits périssables, compte tenu des technologies existantes qui permettent de transformer les déchets agroalimentaires en matières premières utilisables dans la même chaîne d'approvisionnement, comme celles présentées dans Zisopoulos *et al.* (2015).

Les indicateurs les plus couramment utilisés pour rendre compte de la performance économique sont le coût, le bénéfice, la valeur actuelle nette, le rendement attendu, la production économique, le risque financier et la valeur totale des achats. Aucun indicateur économique n'a été introduit dans les études centrées sur la planification de la production, ces études mettant l'accent sur la recherche de compromis entre la consommation d'énergie et la durée totale d'achèvement (Mansouri *et al.*, 2016 ; Mouzon *et al.*, 2007; Yildirim et Mouzon, 2012), la consommation d'énergie et les retards (Liu *et al.*, 2014b), ou les émissions de carbone et la durée totale d'achèvement (Liu *et al.*, 2014a). Concernant les indicateurs environnementaux, beaucoup d'indicateurs différents, en lien avec l'émission de GES, la consommation d'énergie ou/et d'eau, les quantités de déchets, sont utilisés pour appréhender la performance environnementale dans les chaînes d'approvisionnement, le plus souvent en lien avec la production et la planification de la distribution. Cependant, des tentatives d'évaluation de l'impact environnemental d'une chaîne d'approvisionnement existent, en utilisant des méthodes standardisées telles qu'Eco-Indicator, ReCiPe 2008 (Goedkoop *et al.*, 2013) ou Impact2002+ (Jolliet *et al.*, 2003). Il semble toutefois qu'aucun consensus n'existe autour d'un indicateur unique à utiliser pour prendre en compte les dommages environnementaux, vu que de nouvelles méthodes agrégeant plusieurs indicateurs continuent à apparaître, comme le score d'impact environnemental (Inghels *et al.*, 2016) ou le niveau de « greenness » (Ghayebloo *et al.*, 2015). Il est surprenant de noter qu'aucune des publications traitant des aliments ne prend les déchets alimentaires comme indicateur (Shukla et Jharkharia, 2013), sachant qu'un tiers des aliments produits pour la consommation humaine sont perdus ou gaspillés le long de la chaîne (FAO, 2013). Enfin, des indicateurs sociaux, tels que le nombre d'emplois cumulés, les heures de travail, le taux d'accident, les niveaux de satisfaction des parties prenantes et des clients, ont également été utilisés dans les études portant sur les chaînes d'approvisionnement.

En termes de méthodes d'évaluation multicritère appliquées aux chaînes d'approvisionnement, les méthodes TOPSIS et AHP sont majoritairement utilisées afin d'évaluer les fournisseurs potentiels, sélectionner les technologies de production les plus appropriées ou évaluer les sous-traitants pour des activités de logistique. Les méthodes d'aide à la décision sont aussi utilisées, avec pour but de faciliter la prise de décision concernant les problèmes liés à la conception de réseaux, à la planification du transport, à la planification et aux problèmes d'allocation (Banasik *et al.*, 2018). La plupart des publications traitant de ce type de méthodes se concentrent sur la recherche de solutions efficaces (au sens de Pareto), particulièrement informatives, et qui correspondent à un compromis quantifié entre performances économiques et environnementales, *a priori* contradictoires. Les solutions efficaces de Pareto sont conçues pour aider le décideur à choisir la solution la plus préférable. Les méthodes scalaires, *i.e.* la méthode de la somme pondérée et la méthode dite ε-contrainte, sont les plus utilisées pour déduire ces solutions efficaces, alors que d'autres méthodes nécessitent souvent l'implication du décideur, qui peut ne pas être toujours disponible ou capable de participer au processus de détermination du poids. Certains problèmes sont résolus à l'aide de méta-heuristiques, majoritairement au travers d'algorithmes génétiques. De plus, dans un certain nombre de cas, les approches sont combinées pour aboutir à la solution finale. Par exemple, dans l'étude de Validi *et al.* (2014), afin de mettre en évidence le meilleur candidat pour le décideur, la méthode AHP a été mise en place pour inclure les avis consensuels des décideurs concernant les véhicules utilisés pour la distribution, et l'approche TOPSIS a été utilisée pour évaluer les résultats générés par 3 algorithmes génétiques.

Dans la majorité des études sur les chaînes d'approvisionnement, toutes les données sont supposées déterministes et l'incertitude (demande, prix, paramètres de transformation, changement de la qualité des produits…) est encore trop peu souvent prise en compte. Cependant, la théorie des ensembles flous est la plus souvent appliquée pour prendre en compte cette incertitude. Par exemple, Ziolkowska (2014) et Azadnia *et al.* (2015) ont utilisé cette théorie pour évaluer les variables linguistiques attribuées par les décideurs ou les experts afin d'étudier la relation entre chaque alternative de production et chaque attribut. Par contre, aucune des sources d'incertitude répertoriées dans le cadre de la production alimentaire (rendements de production, demande…) n'a été incluse dans les études modélisant les chaînes d'approvisionnement alimentaires (Banasik *et al.*, 2018). En conclusion, il est donc nécessaire d'essayer d'équilibrer davantage les critères économiques et environnementaux dans les problèmes réels de décision en lien avec les chaînes d'approvisionnement. Comme indiqué par Brandenburg *et al.* (2014), le besoin d'approches plus stochastiques de modélisation pour représenter l'environnement décisionnel incertain des chaînes d'approvisionnement se fait ressentir afin de prendre en compte les caractéristiques intrinsèques des produits, et notamment celles des aliments.

4.3.2 Exemples concernant la production de lait et sa transformation en produits laitiers

Encart 1 : Choix de l'unité fonctionnelle

Lors des études environnementales, le choix de l'unité fonctionnelle, c'est-à-dire la base sur laquelle vont être quantifiés les impacts, est primordiale. Par exemple, en agriculture (élevage des animaux), activité où la gestion des espaces est un enjeu majeur, calculer les impacts environnementaux par hectare de surface agricole occupée tombe sous le sens. Par contre, en matière d'alimentation où l'intérêt nutritionnel est primordial, calculer les impacts environnementaux par kg de protéine ou kilocalorie apportés semble plus approprié. Dans les ACV portant sur les aliments, l'unité fonctionnelle dominante est la masse, malgré la norme ISO 14040 (Organisation internationale de normalisation, 2006) qui impose que l'unité fonctionnelle retenue pour réaliser l'ACV reflète la fonction réelle du produit. En se basant sur l'outil SAIN.LIM (Darmon *et al.*, 2009) de profilage nutritionnel, Scislowski (2015) a défini l'unité fonctionnelle nutritionnelle (UFN) comme étant l'unité de mesure de la contribution de 100 g d'aliment à la couverture des besoins quotidiens en énergie et en nutriments pour l'Homme ; en d'autres termes, la méthodologie de calcul de l'UFN permet de quantifier le service nutritionnel rendu par chaque aliment consommé. Ainsi, selon Scislowski (2015), plus un aliment présente une fonction nutritionnelle importante et donc une UFN élevée, plus son impact environnemental sera réduit (Scislowski, 2015). Cependant, à ce jour, l'UFN n'est pas reconnu par les instances décisionnaires en charge d'établir les règles finales d'étiquetage environnemental.

Sonesson *et al.* (2017) ont essayé de définir différentes unités fonctionnelles à utiliser dans les ACV, en se basant sur le contenu et la qualité des protéines et en incluant les pratiques alimentaires, car, selon eux, la valeur nutritionnelle d'un nutriment dépend de l'apport alimentaire total. Ils ont testé comme unité fonctionnelle la teneur des aliments en protéines (totales ou seulement digestibles), ainsi qu'un indice de qualité des protéines basé sur l'apport digestible des neuf acides aminés essentiels contenus dans le produit ramené à l'apport alimentaire total équivalent de ces mêmes acides aminés. Ce dernier indice illustre l'importance du produit étudié en tant que fournisseur d'acides aminés essentiels dans un contexte alimentaire spécifique. Si un produit contient des acides aminés essentiels qui manquent dans le régime alimentaire, l'indice de qualité des protéines de ce produit spécifique sera plus élevé, et vice-versa. En appliquant ces trois unités fonctionnelles aux études ACV de six produits alimentaires – pain, filet de poulet, porc haché, bœuf haché, lait et soupe de pois -, Sonesson *et al.* (2017) ont pu évaluer leur facilité d'utilisation, ainsi que leur plus-value, et montrer que les différences relatives entre les produits changeaient lors de l'utilisation d'une unité fonctionnelle liée aux protéines. L'introduction de la notion de digestibilité des protéines a permis de réduire quelque peu la sous-évaluation systématique liée aux produits d'origine animale. L'unité fonctionnelle correspondant à l'indice de qualité protéique a permis d'améliorer la compréhension de l'impact environnemental lié à la fonction la plus importante de l'alimentation, *i.e.* la nutrition, par rapport à l'unité fonctionnelle basée sur la masse, mais sa mise en application pourrait être rendue délicate par le fait quel le calcul de cet indice requiert de nombreuses données. Dernièrement, ces mêmes auteurs ont conclu que 1) la prise en compte de la valeur nutritionnelle des aliments dans les études ACV améliorait la compréhension de la relation entre les impacts environnementaux et les fonctions nutritionnelles réelles des aliments; 2) la performance environnementale des différents aliments variait selon le contexte alimentaire; et 3) la généralisation de l'indice de qualité protéique pourrait aider l'industrie, les autorités et les consommateurs à améliorer leurs produits et leurs régimes alimentaires (Sonesson *et al.*, 2019). Très récemment, Batlle-Bayer *et al.* (2019) ont proposé une nouvelle unité fonctionnelle couplant l'apport énergétique et la qualité nutritionnelle des régimes alimentaires, de façon à assurer une comparaison plus « équitable » des régimes alimentaires, dont les qualités énergétique et nutritionnelle diffèrent.

Encart 2 : Méthode d'allocation des impacts environnementaux

Outre le choix de l'unité fonctionnelle, la question de la méthode d'allocation des impacts environnementaux entre les différents coproduits est cruciale dans le cas du lait, de la viande et des produits qui en sont dérivés : produits laitiers et produits carnés. Il s'agit de décider sur quelle base répartir les impacts entre, par exemple, le lait et la viande au sein d'un élevage laitier, ou entre les différentes fractions obtenues après la découpe d'un animal (viande, graisses, os, peau, viscères…) qui vont suivre différentes voies de valorisation (Aubin, 2014). La norme ISO (Organisation internationale de normalisation, 2006) propose une hiérarchie entre les méthodes d'allocation, selon 3 niveaux. Le premier niveau consiste à concevoir le système et l'unité fonctionnelle de façon à éviter l'allocation ; on parle alors d'expansion du système. Compte tenu de la complexité des systèmes agricoles et de la multiplicité des rôles des coproduits, la méthode d'expansion est souvent très difficile à appliquer, bien que préconisée par Cederberg et Stadig (2003). Le deuxième niveau consiste à se baser sur les règles physiques qui régissent les liens entre les différents coproduits qui ont des fonctions similaires, ce qui peut se traduire par une répartition des impacts selon (1) la masse des différents coproduits,

(2) la quantité de matière sèche des coproduits (Gac *et al.*, 2012), (3) la quantité d'énergie brute contenue dans les différents coproduits (Ayer *et al.*, 2007), (4) le contenu en protéines et lipides des différents coproduits, ou (5) la quantité d'énergie allouée entre les différents coproduits ; on parle alors d'allocation biophysique (Nguyen *et al.*, 2013) ; (Fédération Internationale de la Laiterie (FIL), 2010). Le troisième et dernier niveau consiste à choisir un autre type de règle, souvent économiques, ce qui permet de répartir les impacts en fonction de la valeur économique (prix X poids) des différents coproduits (Basset-Mens et van der Werf, 2005). Toutefois, l'application des méthodes d'allocation économique ou basées sur la masse en produits ou en fonction de la matière sèche, induit des écarts importants entre les résultats obtenus sur les différents impacts. Les niveaux d'impacts sont plus élevés pour les produits ayant une valeur économique plus importante, en utilisant la règle d'allocation économique. En fait, il n'y a pas encore de consensus sur la meilleure méthode d'allocation des impacts environnementaux. Alors que dans le cas des productions laitières, le guide de la Fédération Internationale Laitière (Fédération Internationale de la Laiterie (FIL), 2010) et le projet AgriBalyse de l'ADEME (Koch et Salou, 2014) préconisent l'allocation biophysique, la majorité des études publiées et les cahiers des charges à l'échelle internationale (PAS 2050, 2008) ; (Environmental Product Declaration (EDP), 2012) utilisent la règle d'allocation économique.

Elevage et production durable de lait :

En 2009, sur la base de l'analyse de 60 articles scientifiques, rapports et thèses, les principales conclusions d'un rapport de la Fédération Internationale de Laiterie (Guinard *et al.*, 2009), en matière de production de lait, étaient les suivantes :

- 85% des émissions de GES et 40% de la consommation d'énergie se déroulaient directement à la ferme
- En moyenne, la production de 1 kg de lait était responsable de la production de 1 kg éq. CO_2
- L'émission de méthane, du fait de la fermentation entérique et la production des déjections des animaux, représentent de 35% à 80% des émissions de GES qui se produisent à la ferme. Le protoxyde d'azote constitue la deuxième source d'émission.
- Cependant, une forte dispersion existe entre les différentes fermes, ce qui laisse à penser que le mode de gestion de la ferme est un bon levier pour réduire les émissions de GES.

Ces dernières années, de plus en plus de profils environnementaux des produits de l'élevage ont été rendus disponibles, comme ceux fournis par le projet AgriBalyse (Koch et Salou, 2014). Le rapport Livestock's long shadow (FAO, 2006) a largement contribué au débat sur l'impact des productions animales sur l'environnement, en identifiant quatre domaines *a priori* très négativement impactés : le climat (émission de GES), l'eau, les terres agricoles et la biodiversité (Aubin, 2014).

A l'échelle de la Planète, les estimations des émissions de GES font état de 7,1 Gt en équivalent CO_2 par an imputables à l'élevage, soit 14,5% des émissions de GES liées aux activités humaines. Ce sont les ruminants qui contribuent le plus à ces émissions ; les bovins laitiers contribuant pour 20% (Gerber *et al.*, 2013). En France, en 2010, le bilan net des émissions de GES lié à l'élevage bovin s'élevait à 39,5 Mt en équivalent CO_2, dont 34% étaient imputables aux vaches laitières et 27% aux vaches allaitantes. Le méthane entérique chez les bovins est le contributeur majeur aux GES, ainsi que la phase de production des aliments concentrés chez toutes les espèces. Ces grandes généralités cachent des disparités très importantes inhérentes aux pratiques d'élevage, aux contextes climatiques et aux ressources utilisées pour nourrir les animaux. Deux facteurs clés conditionnent le niveau de ces résultats : l'efficacité de la conversion des aliments par les animaux et la qualité de l'aliment qui influe aussi chez les bovins, sur la quantité de méthane entérique émise. Par exemple, les bovins élevés de façon extensive sur des pâturages ou des parcours de mauvaise qualité ont un risque fort de présenter des bilans d'émission de GES élevés ramenés au kg de lait produit. Néanmoins, ces systèmes d'élevage extensifs participent au maintien des surfaces en prairies et donc potentiellement au stockage de carbone sous prairies (Pradere, 2014). Cela permet de valoriser des prairies permanentes qui pour l'essentiel sont des surfaces inutilisables pour faire des productions végétales et qui représentent plus de 60% de la surface agricole des terres émergées (Zabel *et al.*, 2014). D'après la FAO, le stockage de carbone pourrait représenter 0,6 Gt éq. CO_2 par an à l'échelle mondiale (Gerber *et al.*, 2013). Des expérimentations sur le stockage de carbone sous prairies, menées dans le cadre des projets européens GreenGrass (Soussana et Luscher, 2007) et CarboEurope (Schulze *et al.*, 2009), ont mis en évidence que les prairies constituaient des puits de carbone stockant de 500 à 1 200 kg C/ha/an. Aux Etats-Unis et en Nouvelle-Zélande, des niveaux de stockage comparables compris, respectivement, entre 120 et 400 kg C/ha/an et entre 590 et 900 kg C/ha/an ont été observés sur des prairies pâturées (Mudge *et al.*, 2011). Ces fortes variations dans les flux de carbone peuvent s'expliquer par le contexte pédoclimatique et les pratiques culturales (Arrouays *et al.*, 2002 ; Klumpp *et al.*, 2011; Soussana *et al.*, 2010). Dollé *et al.* (2013) indiquent qu'en France, le taux de compensation des émissions de GES par le potentiel de stockage de carbone du secteur herbivore s'élève à 28%, avec un niveau de compensation moyen qui varie selon les systèmes et qui sera plus élevé pour les systèmes les plus herbagers. La prise en compte

du stockage de carbone sous prairies permet de ramener l'empreinte carbone nette des systèmes laitiers entre 0,5 et 0,8 kg de CO_2 eq/kg de lait, en diminution de 15 à 25% de 1990 à 2010. Pour plus de détails sur les impacts environnementaux liés à l'élevage de ruminants et la production laitière, il est possible de se référer aux écrits d'une précédente expertise collective qui a analysé et objectivé les différents rôles, mais aussi les impacts économiques, sociaux et environnementaux, ainsi que les services marchands et non marchands rendus par les systèmes d'élevage à l'échelle de l'Europe (Dumont *et al.*, 2016b).

Dans le domaine de la production laitière, une méthodologie pour l'évaluation multicritère de la performance environnementale des exploitations laitières et de la qualité globale du lait qui en est issue a été récemment mise en place (Botreau *et al.*, 2018). L'évaluation réalisée à l'échelle de l'exploitation est annuelle ; elle tient compte de la variabilité saisonnière des caractéristiques du lait du tank de l'exploitation. L'outil de diagnostic a été conçu pour servir de base de discussion et d'échange entre l'agriculteur et un conseiller formé à la démarche, afin que ce dernier puisse fournir un conseil adapté pour améliorer les performances de l'exploitation, à la fois sur le plan environnemental et de la qualité du lait. La méthode proposée se voulait générique, reposant sur des méthodes de collecte de l'information et d'analyse standardisées et pouvant être réalisée en une journée sur l'exploitation, avec un budget d'analyses n'excédant pas 100 €. L'outil de diagnostic visait à fournir une information synthétique sous forme d'une note globale de performance environnementale et d'une note globale de qualité du lait en maintenant accessibles toutes les notes intermédiaires et les indicateurs mesurés de façon à facilement identifier les points forts et faibles d'une exploitation donnée. Les critères et les indicateurs de performances ont été élaborés en combinant une utilisation de données bibliographiques et la consultation d'experts. L'évaluation de la performance environnementale des exploitations (Tableau 4.1) a été réalisée en utilisant une méthode ACV reposant sur une allocation économique des impacts, ne tenant pas compte du stockage du carbone et utilisant comme unité fonctionnelle, 1 000 kg de lait vendus. Les impacts des exploitations sur la biodiversité domestique et sauvage ont également été évalués en utilisant la méthode IBEA (Impact des pratiques sur la Biodiversité des Exploitations Agricoles, ibea.portea.fr) conçue par France Nature Environnement et résultant d'un partenariat entre France Nature Environnement, l'INRA, le Muséum National d'Histoire Naturelle, la Fondation pour la recherche sur la biodiversité et l'enseignement agricole (DGER, Bergerie Nationale et lycées agricoles). L'outil IBEA est fondé sur une approche multicritère, qui décompose la biodiversité en différents éléments selon une structuration hiérarchique, et qui relie ces éléments de biodiversité à des ensembles de pratiques notées de manière positive ou négative selon leur impact sur la biodiversité.

Tableau 4.1 : Evaluation de la performance environnementale de la production de lait (extrait de Botreau et al. (2018)).

Dimension	Composantes	Sous-composantes	Nb indicateurs
Performance environnementale de la production de **lait**	Air	Changement climatique	1
	Eau	Eutrophisation	1
	Sol	Acidification	1
		Ecotoxicité terrestre	1
	Ressources et énergie	Surface utilisée	1
		Consommation d'eau	1
		Consommation d'énergie non-renouvelable	1
	Biodiversité	Biodiversité domestique	4
		Biodiversité sauvage	29

En l'absence de méthodes formalisées pour évaluer la qualité du lait, une méthode a été créée sur la base d'une démarche participative impliquant des experts (chercheurs, professionnels et institutionnels). Les indicateurs pour évaluer la qualité du lait pouvant varier considérablement selon l'utilisation du lait, deux arbres de décision différents ont été proposés pour évaluer la qualité du lait destiné à la fabrication de lait UTH demi-écrémé, d'une part, et de fromages au lait cru à pâte pressée non cuite, d'autre part. Les deux arbres d'évaluation proposés se basent sur l'évaluation des mêmes composantes de la qualité. Il s'agit de la qualité sensorielle estimée du futur produit fini (et non pas de la qualité sensorielle du lait cru du tank de l'exploitation), de la qualité technologique qui couvre tous les aspects liés à la capacité du lait à être transformé correctement, la qualité pour la santé humaine (cette composante couvre à la fois les risques sanitaires potentiels pour le consommateur, mais aussi les aspects positifs que le lait peut avoir sur ce dernier), et la qualité nutritionnelle (réduite ici à son sens strict, ne couvrant que les composantes du lait faisant l'objet d'une recommandation nutritionnelle pour l'homme). Contrairement aux composantes de la qualité, les sous-

composantes et surtout les critères et indicateurs pertinents pour évaluer ces composantes de qualité sont très sensiblement différents selon l'utilisation du lait (Tableaux 4.2 et 4.3).

Les concepteurs de la méthode soulignent par ailleurs que le choix des indicateurs retenus a été très réduit par les contraintes de faisabilité (une analyse de lait en hiver et une en été) et de coût des analyses du lait du tank. L'évaluation proposée n'est donc pas exhaustive ; par exemple, la composante « santé » ne tient pas compte des risques de contamination du lait par des substances minérales (ex. métaux lourds) ou chimiques (ex. dioxines).

Tableau 4.2 : Evaluation de la qualité du lait destiné à être transformé en lait UHT demi-écrémé (extrait de Botreau et al. (2018)).

Dimension	Composantes	Sous-composantes	Nb critères	Nb indicateurs
Qualité du lait destiné à être transformé en **lait UHT** demi-écrémé	Qualité sensorielle	Flaveur	-	1
	Qualité technologique	Stabilité thermique et aptitude à la conservation	2	5
	Qualité santé	Constituants bioactifs	4	11
	Qualité nutritionnelle	Matière azotée	-	8
		Matière minérale	-	2
		Vitamines	-	1

Tableau 4.3 : Evaluation de la qualité du lait destiné à être transformé en fromage au lait cru de type pâte pressée non cuite (extrait de Botreau et al. (2018)).

Dimension	Composantes	Sous-composantes	Nb critères	Nb indicateurs
Qualité du lait destiné à être transformé en **fromage** au lait cru non standardisé de type pâte pressée non cuite	Qualité sensorielle	Texture	-	6
		Apparence	2	3
		Flaveur	2	7
	Qualité technologique	Aptitude à l'acidification	3	5
		rendement fromager	4	5
		Aptitude à l'égouttage	3	5
	Qualité santé	Organismes vivants	-	1
		Toxicologie	-	1
		Constituants bioactifs	3	11
	Qualité nutritionnelle	Macroéléments	2	4
		Matière minérale	-	2

La construction des modèles d'évaluation des impacts environnementaux et de la qualité du lait a reposé ensuite sur l'interprétation des valeurs brutes des indicateurs sous forme d'une note variant de 0 (situation très défavorable) à 10 (situation très favorable). Ces notes (critères), attribuées selon les cas par des groupes d'experts ou par comparaison à des données de la bibliographie (Botreau *et al.*, 2017) ont ensuite été agrégées à l'échelle des sous composantes, elles même agrégées à l'échelle des composantes pour arriver enfin à une note d'évaluation globale (Figure 4.2)

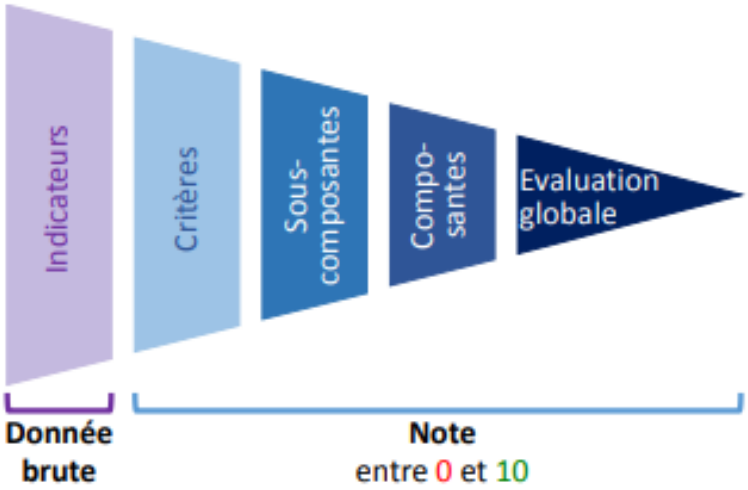


Figure 4.2 : Structure de l'évaluation depuis les indicateurs mesurés jusqu'à la note d'évaluation globale (extrait de Botreau et al. (2018)).

La méthode d'agrégation utilisée est celle de l'outil CONTRA décrit dans Bockstaller *et al.* (2017) et basé sur un arbre de décision utilisant des ensembles flous. Cette méthode repose sur la prise en compte de règles liées aux pondérations entre critères (parmi les critères à agréger, certains sont-ils plus importants que d'autres ?) et aux possibles compensations (jusqu'à quel point souhaite-t-on autoriser la compensation d'une mauvaise note sur un critère par une bonne note sur une autre ?). Les pondérations ont toutes été établies à dires d'experts, de manière collégiale, en se basant sur des données de la bibliographie et les compensations ont été décidées par les partenaires du projet. Le niveau de compensation retenu était intermédiaire entre ce que la moyenne pondérée permet (compensations pleinement autorisées) et ce que l'opérateur minimum réalise (compensations interdites, c'est-à-dire que si une performance est mauvaise alors le score global est mauvais, quelles que soient les performances obtenues ailleurs). Cette méthode a été testée sur un échantillon de 30 exploitations (15 dans le Finistère, 15 dans le Cantal) sélectionnées de manière à représenter la diversité des systèmes d'élevage en France (Botreau *et al.*, 2018). Les notes de la performance environnementale fluctuaient entre 1,5 et 8,3 (moyenne de 4,9 ± 2,1), ce qui montre que la méthode appliquée a permis une bonne discrimination des exploitations. En revanche, les notes de qualité globale, que ce soit pour le lait UHT ou pour le fromage étaient basses et peu dispersées, car comprises entre 2,2 et 3,9. Les auteurs ont conclu que la méthode doit être revue, car les notes ont été jugées très sévères et trop resserrées, vraisemblablement en raison du niveau faible des compensations appliquées à un nombre important de critères. Par ailleurs, aucune corrélation n'a été mise en évidence entre la performance environnementale et la qualité globale du lait pour la transformation en lait UHT ou en fromage.

Concernant l'étude de la durabilité des systèmes en élevage de ruminants par une approche multicritère, il convient de citer l'outil d'évaluation environnementale et d'appui technique en élevage de ruminants CAP'2ER® - Calcul Automatisé des Performances Environnementales en Elevages de Ruminants[5], - développé par l'Institut de l'élevage (IDELE). CAP'2ER® a pour objectif d'évaluer, en se basant sur le concept de l'ACV, les impacts environnementaux à l'échelle d'une exploitation d'élevage de ruminants et par atelier : bovin lait, bovin viande, ou ovin viande. Lorsqu'un atelier génère plusieurs produits (lait et viande), une allocation des impacts environnementaux est faite : (1) en bovin lait, les impacts sont répartis entre la production de lait et celle de viande, en fonction de l'énergie nécessaire aux différentes étapes de l'élevage des animaux ; ces allocations sont, en moyenne, de 74% pour le lait et 26% pour la viande ; (2) en bovin viande, les impacts sont exprimés uniquement par kg de viande produite, sans tenir compte de la catégorie animale.

CAP'2ER® vise à :

- Sensibiliser les éleveurs et les conseillers à la prise en compte des enjeux environnementaux (positifs et négatifs), mais également économiques et sociaux ;
- Evaluer l'empreinte environnementale des produits des élevages de ruminants : lait, viande ;
- Situer les exploitations par rapport à des références ou à un groupe d'exploitations, et créer un observatoire national ;
- Faire le lien entre les performances environnementales, techniques et économiques ;

[5] http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/guide-methodologique-cap2er.html

- Identifier les marges de progrès et mettre en place des actions pour améliorer l'empreinte environnementale des exploitations, tout en assurant leur pérennité.

CAP'2ER® est un vrai outil multicritère d'évaluation de la durabilité des exploitations d'élevage de ruminants. En effet, au-delà de l'enjeu représenté par le changement climatique, afin de mieux cerner les autres impacts potentiels sur l'environnement et la durabilité des exploitations, CAP'2ER® intègre d'autres indicateurs environnementaux, comme la qualité de l'eau au travers de l'eutrophisation, la qualité de l'air au travers de l'acidification et l'épuisement des ressources fossiles au travers de l'estimation de la consommation directe et indirecte d'énergie. Cette évaluation environnementale est complétée par des indicateurs traduisant les contributions positives de l'activité d'élevage sur la biodiversité et le stockage de carbone, mais également par un indicateur de performance nourricière traduisant la fonction première de l'activité agricole. De manière à apprécier la durabilité des exploitations, des indicateurs traduisant la performance économique (coûts de production, Excédent Brut d'Exploitation) ou liés aux conditions de travail (charge de travail, pénibilité) viennent compléter le jeu des indicateurs. Cette dimension vise à intégrer l'évaluation de la triple performance économique, sociale et environnementale, de manière à construire des plans d'action en cohérence avec la durabilité des exploitations d'élevage de ruminants à moyen et long termes.

Aussi indispensables soient-ils pour qualifier les performances d'un élevage, les indicateurs environnementaux et de durabilité doivent être reliés à des indicateurs de pratiques utilisés quotidiennement par les éleveurs et les techniciens en lien avec la gestion du troupeau, l'alimentation, la fertilisation et la valorisation des déjections. En évaluant en parallèle ces deux types d'indicateurs, CAP'2ER® permet ainsi de mettre en avant les pratiques qui doivent évoluer, de manière à améliorer les performances environnementales et techniques d'un élevage.

Durabilité des systèmes de transformation du lait en produits laitiers :

Même si la production du lait à la ferme est souvent identifiée dans les études comme un maillon impactant fortement l'environnement (Thoma *et al.*, 2013), notamment en termes de production de GES, l'impact de la transformation du lait est loin d'être neutre sur le plan environnemental quand l'on considère les autres catégories de dommages. En effet, Guinard *et al.* (2009) ont mis en évidence que la transformation du lait générait un impact sur l'épuisement des ressources équivalent à celui généré lors de la production à la ferme. Une des études IMPRO (« environmental IMprovement of PROducts ») commanditée par l'Union Européenne a souligné que les économies d'énergie dans les industries de transformation des matières premières de type viande et lait constituaient un important levier d'action pour réduire l'impact environnemental (Weidema *et al.*, 2008).

Fort de ce constat, Madoumier (2016), dans sa thèse, a proposé une méthodologie d'écoconception du procédé d'évaporation du lait écrémé, qui est l'un des procédés les plus énergivores du secteur laitier, en combinant des outils d'analyse systémique, d'analyse multicritère et d'optimisation multi-objectif. Trois points marquants qui mettent en lumière les difficultés rencontrées par Madoumier (2016) pour bâtir sa méthodologie méritent d'être soulignés, à savoir :

L'adaptation d'un simulateur de procédés classiquement utilisé pour modéliser et simuler des procédés chimiques et pétrochimiques, à l'évaporation du lait, en particulier la définition d'un modèle de propriétés du lait considéré comme un mélange d'eau et de matière sèche, elle-même constituée d'un mélange de matières grasses, de protéines, de sucres et de minéraux ;

La prise en compte du nettoyage alcalin de l'équipement dans les étapes de la transformation, et la modélisation de sa cinétique à partir de données empiriques de la littérature ;

La démonstration de l'intérêt du cadre méthodologique proposé pour l'écoconception au travers de trois cas d'études mettant en œuvre analyse multicritère et modélisation multi-objectif, et portant sur la modélisation de trois solutions de conception de l'évaporateur et la comparaison de ces solutions selon des critères économiques et environnementaux, la comparaison de différents combustibles (gaz naturel, fioul lourd, plaquettes de bois) pour la production d'énergie nécessaire au procédé d'évaporation, et enfin, la détermination de la conduite de nettoyage présentant le meilleur compromis entre rentabilité économique et impact environnemental.

L'écoconception d'un procédé peut avantageusement tirer profit des outils d'optimisation multi-objectif et d'aide à la décision, car ces outils permettent de trouver des solutions de compromis entre des objectifs contradictoires, comme la maximisation de la viabilité technico-économique du procédé et la minimisation des impacts environnementaux. Dans ce contexte, la simulation des différentes étapes du procédé permet de générer beaucoup de données qui peuvent ensuite être exploitées lors de l'optimisation multi-objectifs. C'est pourquoi, le cœur du cadre méthodologique des travaux de Madoumier (2016) a été constitué de 3 outils de simulation permettant d'analyser le procédé en fonction de sa conduite et de son dimensionnement : un outil de simulation du

procédé en phase de production, un outil de simulation du procédé en phase de nettoyage et un outil de simulation de la centrale de production d'énergie alimentant le procédé, aussi bien en phase de production que lors du nettoyage. A partir des résultats de ces 3 modèles, Madoumier (2016) a pu calculer des indicateurs tant environnementaux, au moyen de l'ACV, en mettant en œuvre les méthodologies ReCiPe (Goedkoop *et al.*, 2013) et Impact2002+ (Jolliet *et al.*, 2003), qu'économiques au travers d'indicateurs classiques de rentabilité : bénéfice actualisé, temps de retour sur investissement et coût d'investissement des équipements (Madoumier, 2016). Ensuite, l'optimisation multi-objectif a été réalisée au moyen de la bibliothèque d'algorithmes génétiques Multigen (Gomez *et al.*, 2010b). Enfin, la méthode d'aide à la décision M-TOPSIS (Ren *et al.*, 2007) a été utilisée pour hiérarchiser les solutions Pareto-optimales en fonction des critères pour les 3 cas d'études cités précédemment. La Figure 4.3 schématise l'échange des données entre les différents outils mis en œuvre pour constituer la méthodologie d'écoconception bâtie par Madoumier (2016) et illustre la complexité de cette dernière.

Au final, en combinant approche expérimentale, modélisation, simulation, optimisation et aide à la décision, la démarche proposée par Madoumier (2016) a eu le mérite d'identifier les grandes lignes directrices conduisant à une écoconception du procédé d'évaporation du lait. Les travaux de Madoumier (2016) ont permis aussi de mettre en évidence un certain nombre de difficultés lors de l'établissement de la méthodologie d'écoconception inhérentes, d'une manière générale, à un manque de connaissances, notamment en termes d'impacts du procédé sur les caractéristiques du produit alimentaire, et en termes de modèles pour simuler les différentes étapes du procédé (évaporation, nettoyage), à la différence des secteurs chimique et pétrochimique où beaucoup de modèles unitaires existent et peuvent être facilement assemblés afin de représenter toutes les étapes de transformation de la matière. Il est aussi intéressant de souligner que, dans les travaux de Madoumier (2016), aucun indicateur social n'a été pris en compte dans l'analyse multicritère, faute de donnée relative à la quantification de ce critère. Et enfin, bien que les propriétés sensorielles, nutritionnelles, ou celles relatives à l'hygiène soient des critères majeurs pour évaluer la qualité du produit, elles n'ont pas non plus été prises en compte car, selon Madoumier (2016) la modélisation de la qualité d'un produit en fonction des choix d'agencement et de conduite du procédé est rendue difficile par le manque de données liant qualité du produit et conditions opératoires du procédé (Madoumier, 2016).

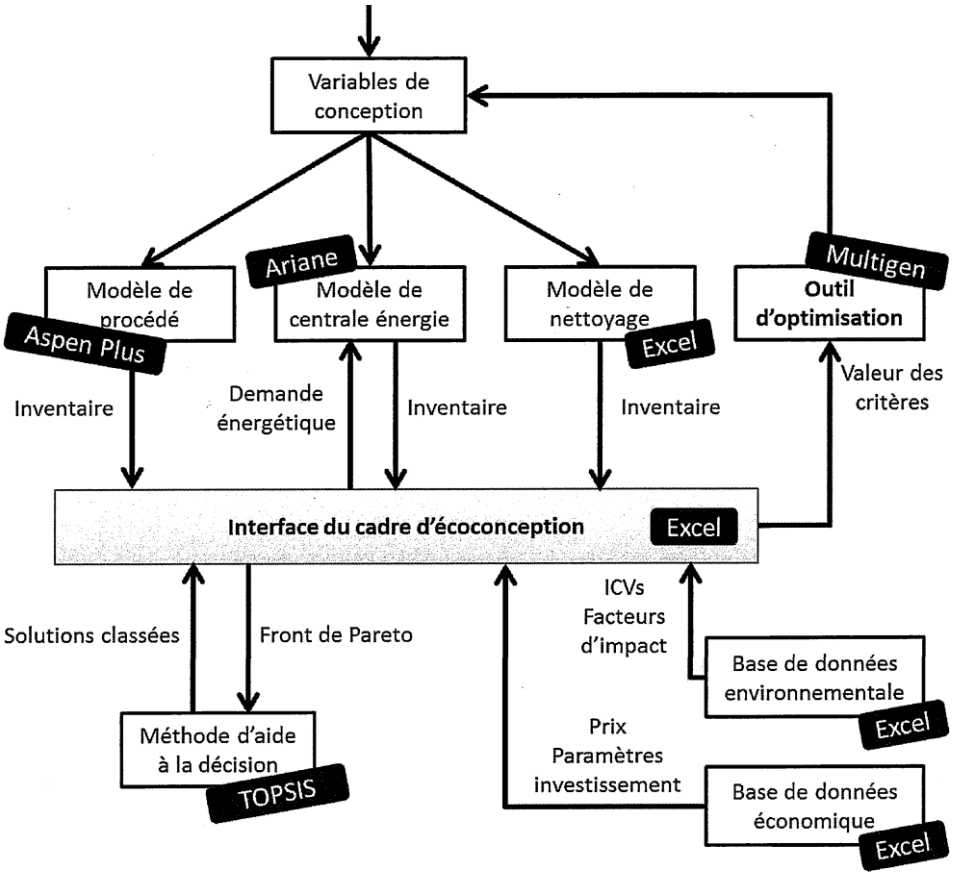


Figure 4.3 : Schématisation de l'échange de données entre les différents outils mis en œuvre pour constituer la méthodologie d'écoconception bâtie par Madoumier (2016)

Concernant la transformation du lait en yaourts et en fromages, Guinard *et al.* (2009) indiquent dans leur rapport qu'en moyenne, la production d'1 kg de fromage est responsable de l'émission de 8,8 kg éq. CO_2, contre 1,1 kg éq. CO_2 pour les yaourts. Le fort d'impact de la production de fromages s'explique par le fait qu'environ 10 L de lait sont nécessaires pour fabriquer 1 kg de fromage et par l'allocation considérée : en effet, la production de fromages génère des coproduits qui peuvent être utilisés pour fabriquer ensuite de la crème ou du beurre. En termes de consommation d'énergie non renouvelable, ces mêmes auteurs rapportent des valeurs de 8 MJ/kg pour le lait, 12 MJ/kg pour les yaourts, 19 MJ/kg pour la crème, 41 MJ/kg pour le fromage, 42 MJ/kg pour le beurre et jusqu'à 58 MJ/kg, dans le cas de la poudre de lait. Comme dans le cas de l'émission de GES, les différences d'impact sur les consommations d'énergie non renouvelable entre les différents produits laitiers s'expliquent en grande partie par les quantités de lait différentes qui sont nécessaires pour leur fabrication et par les allocations (notamment, économiques) qui sont réalisées. Dans le cas de la poudre de lait, la forte consommation d'énergie est également imputable aux conditions du procédé du séchage du lait qui est très énergivore. De plus, pour les produits laitiers qui peuvent être stockés réfrigérés sur une longue période, comme, par exemple, les fromages, aussi bien chez les commerçants que chez les consommateurs, la consommation d'énergie lors de cette phase est loin d'être négligeable. Cependant, la production du lait à la ferme reste le contributeur principal en termes d'émission de GES et de consommation d'énergie dans le cas du fromage, mais pour le lait cru, les traitements (notamment thermiques) réalisés postérieurement à la production requièrent une quantité d'énergie équivalente à celle nécessaire lors de la phase de production à la ferme (Guinard *et al.*, 2009).

Sur la base de 16 études dans lesquelles des ACV ont été menées afin de caractériser l'impact environnemental de la production de différents types de fromages (frais, affiné et fromage à pâte mi-dure), Finnegan *et al.* (2018) ont confirmé la prédominance de la production du lait cru à la ferme comme étape ayant le plus fort impact, devant la transformation, ainsi que l'importance capitale du choix de la méthode d'allocation dans le calcul des impacts de la production de fromages. Ces auteurs ont également souligné le manque d'informations relativement à certains aspects des procédés de transformation qui ont un impact réel sur l'environnement : par exemple, le traitement des effluents ou la fabrication d'emballages permettant de réduire les pertes de produits frais. Enfin, la revue de Finnegan *et al.* (2018) indique que la fabrication de fromages frais aurait un impact sur l'environnement plus faible comparativement à celle des fromages à pâte mi-dure, notamment en termes de consommation d'énergie directe, sûrement du fait de la mise en œuvre d'étapes de procédés de transformation plus simples, moins nombreuses et moins énergivores (Finnegan *et al.*, 2018).

D'une manière générale, les évaluations multicritères portant sur la production et la transformation du lait se concentrent beaucoup sur la production du lait à la ferme en mettant en œuvre des ACV (Flysjo *et al.*, 2011 ; Jan *et al.*, 2012 ; Schueler *et al.*, 2018 ; Zucali *et al.*, 2017) et beaucoup moins sur la transformation, excepté la transformation du lait en quelques produits laitiers bien ciblés comme les fromages (Finnegan *et al.*, 2018 ; Kim *et al.*, 2013 ; Nielsen et Hoier, 2009), les yaourts (Gonzalez-Garcia *et al.*, 2013a), le beurre ou la margarine (Nilsson *et al.*, 2010). Cependant, toutes ces études ne prennent que très peu en compte la qualité des produits transformés sur toute la chaîne allant de la production à la consommation, en passant par la transformation. Enfin, les études prenant en compte la durabilité des procédés de transformation ont souvent porté sur l'opération de nettoyage (Deka et Datta, 2017 ; Eide *et al.*, 2003 ; Madoumier, 2016), sûrement à cause de l'impact environnemental élevé (consommation d'énergie, pollution…) de cette opération en industrie laitière.

4.3.3 Exemples concernant la production de viande et la transformation en produits carnés

Elevage et production durable de viande :

La production de viande et sa transformation en produits carnés sont au cœur des enjeux environnementaux de l'agriculture et sont souvent pointées du doigt. A l'échelle de la Planète, parmi les ruminants, ce sont les bovins viande qui contribuent le plus à ces émissions, avec 41%, alors que les animaux granivores, comme les porcs et les volailles (chair et œufs), contribuent respectivement pour 9% et 8% (Gerber *et al.*, 2013). En France, les ACV conduites ont évalué l'empreinte carbone brute des systèmes de production de viande entre 13,8 et 15,6 kg CO_2 eq/kg de viande vive (Dolle *et al.*, 2013). La prise en compte du stockage de carbone sous prairies permet de ramener l'empreinte carbone brute des systèmes de production de viande comprise entre 13,8 et 15,6 kg CO_2 eq/kg de viande vive à une fourchette de valeurs nettes comprises entre 8,2 et 10,8 kg CO_2 eq/kg de viande vive (Dolle *et al.*, 2013).

Au plan mondial, deux grands profils de contribution se distinguent :

- celui du bœuf, dont les émissions de GES sont d'abord dues aux émissions de méthane entérique (42,6%), puis à la production d'aliment incluant l'utilisation des fertilisants (35,5%) et par un effet de changement d'usage des terres, essentiellement du fait de la déforestation au profit des pâturages, et plus faiblement, pour la production de soja (15,5%) (Opio *et al.*, 2013).
- celui des granivores, le porc et les volailles (chair et œufs) respectivement, où les contributeurs aux GES sont d'abord la production d'aliments (60,3% et 74,7%), incluant le changement d'usage des terres pour la production du soja (12,7% et 18,1%), et la gestion des déjections animales (27,4% et 11,3%) (MacLeod *et al.*, 2013).

Outre le climat au travers de l'émission des GES, les productions animales, selon le rapport Livestock's long shadow (FAO, 2006) impactent fortement et négativement l'eau, les terres agricoles et la biodiversité (Aubin, 2014). Pour exprimer l'impact d'une activité sur les ressources en eau, le concept « d'empreinte eau », basé sur la distinction de trois types d'eau, a été proposé (Hoekstra, 2009) : (1) l'eau bleue, eau de surface et souterraine ; (2) l'eau verte, l'eau de pluie et eau liée (dans le sol) pouvant être évaporée ; et (3) l'eau grise, soit l'eau virtuelle nécessaire pour diluer les polluants contenus dans l'eau pour atteindre un niveau d'innocuité. L'empreinte eau préconisée par le « Water Footprint Network » (empreinte eau WFN) additionne donc ces trois types d'eau de nature différente, depuis la croissance des animaux jusqu'à leur sortie de la ferme, mais n'inclut pas l'eau consommée dans les processus industriels situés en aval, comme ceux des laiteries, des abattoirs, des ateliers de transformation de la viande et des tanneries (Doreau et Corson, 2017). La consommation d'eau verte, très majoritaire, est globalement proportionnelle à la surface agricole nécessaire pour l'élevage, et dépend de manière plus limitée de la nature du couvert. C'est ainsi que le calcul de l'empreinte eau WFN a permis d'évaluer à 15 497 L la quantité d'eau nécessaire pour produire 1 kg de viande bovine (Hoekstra et Chapagain, 2007) ou à des valeurs comprises entre 10 244 à 21 829 L (Mekonnen et Hoekstra, 2012). Corson et Doreau (2013) ont répertorié des fourchettes d'estimation comprises entre 12 m^3 et 43 m^3 par kg de bœuf, 4,8 et 6 m^3 par kg de porc ou entre 3,5 et 4,3 m^3 par kg de poulet. C'est également la prise en compte de l'eau verte qui a amené Tuomisto et Teixeira de Mattos (2011) à conclure que la production d'un kg de viande *in vitro* dans une usine virtuelle par cultures de cellules nécessiterait 30 fois moins d'eau qu'un kg de viande de bœuf calculé par la méthode WFN. Aujourd'hui, cette méthode est concurrencée par deux autres approches : l'ACV et l'« empreinte eau » définie par l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO, 2014) (appelée « empreinte eau ISO »»), qui reprend les principes de l'ACV. Le calcul par ACV se focalise sur la consommation d'eau bleue dans la mesure où cette eau n'est plus disponible dans le même état pour d'autres usages ou les écosystèmes. En ACV, la question de la dégradation de la qualité est prise en compte par des indicateurs d'impact comme l'eutrophisation ou l'écotoxicité aquatique (Aubin, 2014). Sur le plan quantitatif, les effets directs comme l'eau de boisson sont pris en compte, mais aussi les effets indirects comme ceux associés aux cultures (irrigation, évaporation…). L'eau utilisée lors des phases d'abattage de découpe et de transformation des produits carnés doit également être comptabilisée. Des variations très importantes de niveaux sont relevées dans la littérature, où les méthodologies ne sont pas systématiquement explicitées. Le calcul de la quantité d'eau bleue réellement consommée en élevage conduit à des valeurs, en moyenne de 550 L par kg de viande bovine selon la méthode WFN, et de l'ordre de 600 à 700 L par kg de viande bovine selon la méthode ACV (Doreau et Corson, 2017). La transformation des flux d'eau bleue en impacts (indices de stress hydrique, par exemple) peut même aboutir à des valeurs souvent beaucoup plus faibles, traduisant le fait qu'une consommation élevée d'eau bleue peut n'avoir qu'un impact limité sur la disponibilité en eau dans certaines régions du Globe, à la différence des régions à faibles réserves hydriques (Ridoutt *et al.*, 2012). La comparaison des différents modes de calcul révèle que l'ACV et l'empreinte eau ISO sont liées aux produits (la viande, par exemple) et aux impacts environnementaux, tandis que l'empreinte eau WFN est plus liée à l'usage optimal et à la gestion de l'eau dans un territoire. Aussi, l'ACV et l'empreinte eau ISO englobent l'utilisation d'eau douce de beaucoup plus de processus en amont de l'exploitation que l'empreinte eau WFN, comme la production des engrais chimiques et de l'électricité, ainsi que les transports (Doreau et Corson, 2017).

Les productions animales sont aussi le premier utilisateur de terres agricoles représentant 78% des surfaces (3,9 milliards d'ha), dont 1/3 de surfaces en cultures, généralement intensives (FAO, 2006). Les productions animales sont souvent pointées du doigt pour leur inefficacité à utiliser les protéines végétales : 2 à 10 kg de protéines végétales sont nécessaires pour produire 1 kg de protéines animales. Ces chiffres globaux ignorent que les protéines animales ont une meilleure valeur nutritionnelle que les protéines végétales et qu'il faut donc en manger 20 à 25% de moins pour couvrir les besoins protéiques journaliers. Ils ignorent surtout que les animaux consomment des protéines non valorisables directement en alimentation humaine et des fourrages produits sur des surfaces sur lesquelles il n'est pas possible de produire des cultures annuelles (Zabel *et al.*, 2014). La contribution réelle des animaux à la sécurité protéique doit donc s'évaluer par la comparaison entre les protéines produites et les protéines d'origine végétales qui seraient consommables en alimentation humaine, mais consommées par les animaux (Peyraud, 2016). Sur cette base, la production de viande bovine valorisant beaucoup d'herbe est globalement neutre, c'est-à-dire qu'elle produit autant de protéines consommables par l'homme qu'elle ne consomme de protéines végétales qui auraient pu être directement

consommées par l'homme, tandis que les systèmes bovins viande utilisant beaucoup de concentrés pour extérioriser le potentiel de production produisent en général un peu moins de protéines qu'ils ne consomment de protéines valorisables en alimentation humaine. Ces résultats, mettent en évidence une tension forte entre la nécessité d'avoir des croissances d'animaux rapides pour satisfaire un besoin de production de volumes importants dû à la demande croissante de protéines animales et la nécessité de limiter la compétition entre l'animal et l'homme pour l'accès aux protéines (Peyraud, 2016).

La mesure de l'impact de la production animale sur la biodiversité au travers d'indicateurs synthétiques reste un défi majeur pour la recherche. Des indicateurs portant sur la diversité de la flore et de la faune, permettant d'évaluer l'impact des animaux sur l'utilisation des espaces herbagers, existent (Dumont *et al.*, 2012 ; Scohier *et al.*, 2013), mais ces indicateurs sont spécifiques à ces écosystèmes. Certains auteurs ont essayé d'intégrer l'évaluation de la biodiversité dans le cadre de l'ACV (Curran *et al.*, 2011; Schmidt, 2008), mais ces approches sont difficilement applicables à l'échelle de systèmes autrement que par des indicateurs de pertes d'espèces, ce qui est très discutable (Aubin, 2014). Cependant, l'élevage modifie profondément les écosystèmes et leur biodiversité associée (FAO, 2006), du fait d'effets combinés (changement climatique, acidification, eutrophisation, écotoxicité terrestre et aquatique, diffusion de molécules toxiques et de pathogènes…) résultant de leurs émissions polluantes. Cette vision négative contraste avec la vision positive prônée par Dumont *et al.* (Dumont *et al.*, 2009) qui indiquent que l'élevage bovins en systèmes herbagers permet d'entretenir et de développer la biodiversité des pâturages. Des informations complémentaires inhérentes aux impacts environnementaux liés à l'élevage de ruminants et la production de viande figurent dans la synthèse de l'expertise collective consacrée à l'élevage à l'échelle de l'Europe (Dumont *et al.*, 2016a).

En matière de production porcine, la durabilité environnementale de 15 systèmes de production en Europe a été évaluée dans le cadre du programme Q-PorkChains, en utilisant l'ACV (Dourmad *et al.*, 2014). Un système conventionnel et deux systèmes alternatifs ont été étudiés dans cinq pays Européens. Les différents systèmes ont été regroupés en quatre types : conventionnel, conventionnel adapté, traditionnel et biologique. Les systèmes conventionnels adaptés présentaient relativement peu de différences comparativement aux systèmes conventionnels, seulement des changements limités visant à améliorer le bien-être, la qualité des produits ou l'environnement. Les changements étaient beaucoup plus marqués pour les systèmes traditionnels, avec souvent l'utilisation de races locales et l'élevage en plein air des porcs lors de l'engraissement (Bonneau *et al.*, 2014a). En moyenne, pour les systèmes conventionnels, les impacts exprimés par kg de porc vif produit s'élevaient à, respectivement, 2,25 kg CO_2 eq, 44 g SO_2 eq, 18,5 g PO_4 eq, 16,2 MJ et 4,13 m^2 pour le changement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, l'utilisation d'énergie et l'utilisation de surface. Comparativement aux systèmes conventionnels, les impacts étaient en moyenne, respectivement, 13%, 5%, 0%, 2% et 16% plus élevés pour les systèmes conventionnels adaptés ; 54%, 79%, 23%, 50% et 156% plus élevés pour les systèmes traditionnels, et 4%, -16%, 29%, 11% et 121% plus élevés pour les systèmes biologiques. A l'inverse, lorsque les impacts étaient exprimés par ha, ils étaient inférieurs de 10 à 60%, en moyenne, pour les systèmes traditionnels et biologiques. Les systèmes conventionnels présentent des impacts globaux, exprimés par kg de porc, plus faibles, alors que les systèmes différenciés ont des impacts locaux, exprimés par ha, les plus faibles (Bonneau *et al.*, 2013). Cela souligne, une nouvelle fois, l'importance du choix de l'unité fonctionnelle dans le calcul des impacts environnementaux.

Un outil d'évaluation de la durabilité des systèmes d'élevage porcin a été mis au point dans le cadre de ce même programme Q-PorkChains, sur la base de la bibliographie et de l'expertise des chercheurs participants (Bonneau *et al.*, 2014b). Il évalue la durabilité selon huit thèmes relatifs aux demandes des éleveurs, des consommateurs et des citoyens, et ayant trait aux ressources génétiques, à la santé et au bien-être animal, à l'environnement, à la sécurité sanitaire et à la qualité de la viande, à l'économie et à la conformité des marchés, ainsi qu'aux conditions de travail. Les données provenaient d'enquêtes réalisées auprès des éleveurs et des organisations de sélection, d'observations en élevage et de mesures en abattoir. L'évaluation globale de la durabilité a été effectuée à partir de 1 à 6 indicateurs primaires pour chacun des thèmes, soit un total de 37 indicateurs (Bonneau *et al.*, 2013). Pour éviter des effets liés aux valeurs brutes des indicateurs, toutes les données ont été centrées sur une moyenne à 0, en soustrayant la moyenne globale pour les 15 systèmes, et redimensionnées à un écart-type de 1, en divisant par l'écart-type global des 15 systèmes. Les données ont ensuite été multipliées par un coefficient de durabilité, égal +1 ou à -1, suivant si l'indicateur avait un impact positif ou négatif sur la durabilité du système. Enfin, un poids statistique de valeur comprise entre 0,1 et 1 a été attribué à chaque indicateur, de manière à ce que chacun des huit thèmes ait le même poids statistique, au final, dans les analyses. Dans la plupart des cas, un poids identique a été attribué à chacun des indicateurs primaires au sein d'un même thème. L'outil a été testé dans les cinq pays sur l'ensemble des 15 systèmes d'élevage décrits dans Bonneau *et al.* (2014a). Chacun des huit thèmes considérés participe effectivement à la variabilité observée, sans être redondant. L'antagonisme le plus marquant se situe entre l'économie et les autres thèmes, particulièrement le bien-être animal (Bonneau *et al.*, 2013). L'outil permet d'établir des profils qui montrent les forces et les faiblesses des systèmes. Du fait de sa construction, l'outil est suffisamment robuste pour permettre une évaluation fiable de systèmes d'élevage très variés, depuis les plus conventionnels jusqu'aux plus traditionnels. Le nombre d'indicateurs

primaires a même pu être réduit de 37 à 18 avec un impact limité sur le profil forces/faiblesses établi pour chaque système. L'intégration des évaluations des huit thèmes dans un score de durabilité unique repose, toutefois, sur des hypothèses sur les poids relatifs qu'il convient d'attribuer aux indicateurs des différents thèmes, lesquels sont très dépendants du contexte et des priorités des utilisateurs finaux de l'outil (Bonneau *et al.*, 2014b).

Concernant la production de volailles, Castellini *et al.* (2012) ont conduit une étude visant à analyser et comparer la durabilité de trois systèmes de production de volailles différents : conventionnel, biologique et bio-plus ; ce dernier comprenant des exigences plus contraignantes que le système biologique, de façon à améliorer le bien-être des animaux et la qualité de la viande. Une approche combinant le recueil de données en fermes et une analyse multicritère a été mis en place. Pour effectuer une évaluation globale de la durabilité, les quatre dimensions suivantes ont été prises en compte : économique, sociale, environnementale et qualité de la viande. La majorité des données a été collectée directement sur les exploitations et les indicateurs environnementaux ont été estimés en combinant les résultats d'une ACV, de l'empreinte écologique et de l'analyse émergétique. Pour développer l'analyse multicritère, six indicateurs ont été sélectionnés pour chacune des 4 dimensions, soit un total de 24 critères :

- économique : revenu total, revenu net, quantité de main d'œuvre par unité de production, poids des animaux avant abattage, taux de conversion de nourriture et taux de mortalité ;
- social : sécurité du personnel au travail (index arbitraire, valant 0 dans le cas de volailles élevées en *indoor* et 1 dans le cas de volailles ayant un accès à l'extérieur), diversité génétique des volailles (index arbitraire valant 0 pour les souches à croissance rapide et 1 pour les génotypes à croissance lente), déplacement des animaux, indicateur de stress (ratio hétérophiles/lymphocytes dans le sang des volailles), boursouflure du sternum, lésion des coussinets plantaires ;
- environnemental : changement climatique, utilisation des terres, écotoxicité, utilisation de combustibles fossiles, ratio Empreinte écologique/Bio-capacité qui exprime la dette ou le crédit en termes de ressources naturelles utilisées par le système d'élevage, taux de charge environnemental basé sur le calcul émergétique ;
- qualité de la viande : rendement en filet, contrainte de cisaillement mesurée après cuisson du filet, teneur en antioxydants (tocophérols, plus caroténoïdes), taux de matière grasse, taux d'oxydation lipidique et profil en acides gras.

Les systèmes de production analysés ont mis en évidence des résultats différents en fonction de la partie prenante considérée : scientifiques, consommateurs et producteurs, à qui, il avait été demandé au préalable de définir le niveau de priorité (de 1 - le plus important à 3 - le moins important) accordé à chacun des 24 critères. Au final, le système de production bio-plus s'est révélé être le plus performant, une fois les 4 dimensions étudiées intégrées. Ce système d'élevage a obtenu les meilleurs scores en raison d'une meilleure qualité de viande, d'un meilleur bien-être animal et d'un impact négatif plus faible sur la biodiversité, ces critères représentant un poids total de 75% dans l'esprit des scientifiques. Les systèmes conventionnel et biologique ont ensuite été classés *exæquo*, même si le système biologique présentait une performance environnementale supérieure à celle du système conventionnel, qui lui était bien meilleur sur le plan économique, et de manière plus surprenante, sur le plan du bien-être animal. Castellini *et al.* (2012) ont expliqué que le système biologique se traduisait par des résultats en termes de bien-être animal inférieurs à ceux du système conventionnel, en raison de souches génétiques non spécifiquement adaptés à ce mode d'élevage. Il est intéressant de noter, qu'en fonction des pondérations attribuées par les différentes parties prenantes, l'ordre de classement des 3 systèmes d'élevage changeait. Pour les consommateurs très sensibles à la qualité de la viande et au bien-être animal, et beaucoup moins à la rentabilité économique, le tiercé par ordre de performance était le suivant : bio-plus, conventionnel et biologique. En revanche, pour les producteurs très focalisés sur les performances économiques, le classement était complètement inversé : le système biologique devenant le plus performant, suivi des systèmes conventionnel et bio-plus, pour lequel les producteurs considéraient que les contraintes supplémentaires liées à ce mode d'élevage n'étaient pas économiquement compensées, à la différence du système biologique.

Très récemment, la même démarche a été appliquée à l'évaluation de la durabilité de trois autres systèmes de production de volailles, *i.e.* un système d'élevage conventionnel en intérieur, un système d'élevage autorisant le parcours en extérieur et un système d'élevage autorisant aussi le parcours des volailles en extérieur, mais au sein d'une oliveraie (Rocchi *et al.*, 2019). Ce dernier système permettant d'éviter la fertilisation et la fauche de l'herbe dans le verger, ce qui, au final, peut être considéré comme deux avantages environnementaux procurés par les volailles. Dans une étude complémentaire, Paolotti *et al.* (2016) ont montré, au moyen d'une ACV, que le pâturage des volailles directement dans l'oliveraie associé à l'élimination de l'utilisation de terres agricoles à des fins de pâturage (déjà comptabilisée dans l'ACV réalisée sur le verger) permettaient de réduire de 18% l'impact de ce système d'élevage sur l'utilisation des terres, et d'environ 12% l'impact environnemental global. Dans leur étude, Rocchi *et al.* (2019) ont réalisé une analyse multicritère basée sur les méthodes PROMETHEE I et II, en utilisant un total de 19 critères, environnementaux (6 critères), sociaux (7 critères) et économiques (6 critères), dont 3 étaient directement liés à la qualité des

viandes (force de cisaillement, teneur en lipides et pourcentage en acides gras n-3). Les critères environnementaux ont été estimés à l'aide d'une ACV, tandis que les critères économiques et sociaux ont été collectés, à la fois, dans les exploitations agricoles et dans la littérature. L'analyse a pris en compte les préférences des différentes parties prenantes concernées par l'élevage, *i.e.* les agriculteurs, les consommateurs et les scientifiques. Dans cette étude, le système combinant élevage et parcours dans l'oliveraie s'est toujours classé en première position, quelle que soit la partie prenante considérée, suivi du système autorisant le parcours à l'extérieur, puis du système intensif conventionnel. Une analyse de sensibilité des résultats a révélé que le classement final était relativement stable, car seuls quatre des 19 critères considérés pouvaient conduire à une inversion dans le classement. Pour ces quatre critères (taux de mortalité, taux de conversion des aliments, utilisations de combustibles fossiles et des terres agricoles), l'inversion de rang était plus facile entre les systèmes parcours libre à l'extérieur et intensif conventionnel, qu'entre les systèmes combinant parcours libre plus oliveraie et intensif conventionnel.

Ces résultats sont cohérents avec le débat actuel portant sur la durabilité environnementale des systèmes d'élevage intensif *vs.* extensif. Sur la base d'une plus grande efficacité de conversion des aliments, certains auteurs (Bokkers et de Boer, 2009 ; Leinonen et Kyriazakis, 2016; Leinonen *et al.*, 2012) ont affirmé que les systèmes intensifs étaient plus durables que les systèmes biologiques ou en libre parcours. D'autres études ont montré que les volailles élevées en liberté avaient moins d'impacts sur l'environnement (Castellini *et al.*, 2006 ; Castellini *et al.*, 2012), ou que la durabilité à long terme des systèmes d'élevage intensif posait de sérieuses questions (Acosta-Alba *et al.*, 2012 ; Cerutti *et al.*, 2011 ; Zhang *et al.*, 2012). Les différences actuelles s'expliquent principalement par la souche génétique utilisée et par le plan d'alimentation adopté dans les différents systèmes étudiés, qui varient selon les pays. En conséquence, le fait que les systèmes en plein air et intensif aient des scores relativement proches traduit l'opinion actuelle des scientifiques sur ces systèmes (Rocchi *et al.*, 2019). Dans le même temps, la meilleure performance du système libre parcours dans l'oliveraie est cohérente avec la littérature récente vantant les mérites environnementaux et sociaux des systèmes intégrés culture-élevage, et en particulier, de cultures arborées combinées à l'élevage (Paolotti *et al.*, 2016).

Comme illustré précédemment au travers de plusieurs exemples, l'ACV est l'outil adéquat pour comparer les impacts environnementaux de plusieurs systèmes de production animale. Bien que les résultats des ACV soient généralement présentés sous la forme de charges environnementales ramenées à l'unité de masse du produit final, plusieurs auteurs affirment que la qualité du produit, et notamment sa qualité nutritionnelle (Saarinen *et al.*, 2017), doit également être prise en compte pour vraiment juger de la pertinence d'un système d'élevage ou de production agricole vis-à-vis de son impact environnemental et donc, sur la société. Cependant, peu d'études ont, à ce jour, investigué les compositions nutritionnelles des produits agricoles, et surtout leurs variations, en fonction des différents systèmes de production, ce qui ne favorise pas l'amélioration des pratiques agricoles pour mieux équilibrer l'impact environnemental et la nutrition humaine. En utilisant les données de sept systèmes de production animale combinant quatre types d'animaux : bovins, ovins, porcins et volailles et deux modes d'élevage : intensif et extensif, McAuliffe *et al.* (2018) ont proposé un nouveau cadre autour de l'ACV, de façon à prendre en compte la valeur nutritionnelle des viandes dans les ACV consacrées aux systèmes d'élevage (McAuliffe *et al.*, 2018). Les résultats d'études quantitatives montrent que les intensités des émissions associées aux différents systèmes d'élevage peuvent être considérablement modifiées lorsque la teneur en éléments nutritifs (protéines, acides gras mono-insaturés, acides gras à longue chaîne, calcium, fer, vitamine B12, sélénium, zinc, notamment) de la viande remplace l'unité de masse de viande en tant qu'unité fonctionnelle ; les systèmes bovins, même en élevage intensif, surpassant les systèmes porcins et avicoles, notamment si l'on considère la production de GES relativement à la couverture des besoins humains en nutriments. Il est aussi intéressant de noter que l'ordre des systèmes de production de viande bovine en termes d'émission de GES s'inverse dès lors que l'on calcule cet impact, non plus, simplement, par rapport à la masse de produit, mais par rapport à sa teneur en acides gras ω-3 ou en acides gras à longue chaine de type DHA et EPA : initialement deux fois plus impactants en termes de GES produits, les systèmes herbagers de production de viande bovine deviennent 3 à 4 fois moins impactants, une fois la disparité des teneurs en acides gras des différentes types de viande bovine produite prise en compte dans le calcul de l'impact environnemental (McAuliffe *et al.*, 2018). Concernant l'impact sur l'utilisation de terres arables, Wilkinson et Lee (2018) ont estimé la superficie de terre requise (séparée en terres arables et prairies) pour une large gamme de systèmes d'élevage nord-européens et ont montré que les systèmes de production de ruminants requéraient moins de terres arables que les systèmes de production d'animaux monogastriques, de volailles et même … d'œufs (Wilkinson et Lee, 2018). En matière de production de viande, ces auteurs recommandent donc la restriction de l'utilisation des aliments destinés à la consommation humaine et l'utilisation préférentielle de sous-produits végétaux, et préconisent l'optimisation des ressources fourragères dans l'alimentation de toutes les espèces de ruminants. Ces différentes études montrent donc que, selon l'impact environnemental considéré (émission de GES ou utilisation de terres) et l'unité fonctionnelle choisie (100 g de viande ou % de couverture des besoins en nutriments, qui, précisons-le, peut varier selon les pays), les systèmes d'élevage peuvent se classer différemment. Les plus performants sont parfois les systèmes produisant de la viande bovine si l'on considère les émissions de GES relativement à la

couverture des besoins humains en nutriments (McAuliffe *et al.*, 2018), parfois ceux produisant de la viande de volailles si l'on considère les émissions de GES pour 100 g de viande produite (Saarinen *et al.*, 2017), et même, parfois ceux produisant de la viande ovine, si l'on se réfère à l'utilisation des terres arables ramenée à la couverture des besoins humains en nutriments (Wilkinson et Lee, 2018). Ceci montre que le classement des systèmes d'élevage en termes d'impacts environnementaux est loin d'être trivial, car il dépend, à la fois, du type d'impact considéré et de l'unité fonctionnelle choisie ; les analyses multicritères sont donc parfaitement adaptées pour pouvoir les classer le plus objectivement possible.

Durabilité des systèmes de transformation des viandes :

La plupart des études environnementales ayant trait à la viande et aux produits carnés s'arrêtent à la sortie de l'exploitation agricole (études dites « from cradle to farm gate »), en calculant les impacts liés à la production d'1 kg d'animal vivant. Les études prenant en compte l'impact des étapes aval comme le transport, l'abattage, la découpe, la transformation, la conservation au froid et la consommation sont plutôt rares, car, selon Aubin (2014), elles requièrent l'intégration de données propres aux filières, souvent difficiles d'accès, notamment celles en lien avec la transformation qui sont souvent protégées par le secret industriel. Il est pourtant évident que les étapes aval ont un impact sur l'environnement, ne serait-ce qu'en termes de consommation d'énergie ou d'utilisation d'eau.

A partir d'une ACV, Scislowski (2015) a quantifié l'impact carbone de différentes catégories d'aliments, dont plusieurs catégories de produits animaux : viandes et œuf, poissons et produits laitiers. Sur la base de 100 g de produit, cette auteure a mis en évidence que la catégorie d'aliments la plus impactante en termes de changement climatique exprimé en équivalent CO_2 était les viandes et œuf (635 g eq. CO_2/100 g), suivies des poissons (548 g eq. CO_2/100 g) et des produits laitiers (297 g eq. CO_2/100 g), loin devant les céréales et les fruits et légumes, dont l'impact carbone était inférieur à 150 g eq. CO_2/100 g. Lorsque l'impact carbone a été exprimé par rapport au service nutritionnel rendu par l'aliment et donc exprimé au travers de l'UFN, ce sont les produits laitiers qui affichaient le plus fort impact, en raison de leur densité nutritionnelle et de leur taux d'acides gras saturés élevés. Les viandes et œuf se plaçaient alors en 3ème position. Comme précédemment, les fruits et légumes, ainsi que les céréales étaient toujours les moins impactants. Ceci montre que plus l'aliment présente une fonction nutritionnelle importante, traduit par une UFN élevée, plus son impact environnemental est réduit (Scislowski, 2015). Dans le détail, la catégorie « Viandes et œuf » rassemblait douze aliments, plus ou moins transformés, à favoriser nutritionnellement, et des aliments dont la fréquence de consommation devait rester modérée, car plus gras et/ou plus salés. Le calcul de l'impact carbone rapporté à 100 g de produit a conduit à répartir ces 12 aliments en 3 groupes : 1) le groupe des aliments les moins impactants (< 100 g eq. CO_2/100 g), comme le canard rôti et le porc rôti, 2) le groupe des aliments les plus impactants (> 1 000 g eq. CO_2/100 g), comme la côtelette d'agneau et le steak haché à 15% de matière grasse, et 3) le groupe d'impact intermédiaire (entre 100 et 1 000 g. eq CO_2/100 g) comprenant les lardons, le saucisson sec, l'œuf, le jambon cuit, le poulet rôti, la bavette de bœuf, l'épaule de veau et l'escalope de dinde. Lorsque l'unité fonctionnelle massique a été substituée par l'UFN, la classification des 12 aliments a été profondément modifiée. Dans le groupe des aliments les plus impactants (> 1 000 eq. CO_2/UFN), figuraient la côtelette d'agneau et le steak haché à 15% de matière grasse, mais également le saucisson sec et les lardons natures, du fait de leur teneur élevée en acides gras saturés et/ou en sel. Dans le groupe des aliments les moins impactants (< 100 eq. CO_2/UFN), figuraient la viande de porc et de canard, mais également l'escalope de dinde ; l'escalope de dinde étant l'aliment de cette catégorie présentant le score SAIN le plus élevé, du fait de sa richesse en protéines et en vitamine B3 et de sa pauvreté en acides gras saturés et en sodium. Enfin, le groupe d'impact intermédiaire comprenait, par ordre croissant d'impact, l'épaule de veau, la bavette de bœuf, le poulet rôti, le jambon cuit et l'œuf. En appliquant l'UFN à ces 12 aliments de la catégorie « Viande et œuf », Scislowski (2015) a mis en évidence que la hiérarchisation de l'impact environnemental coïncidait avec le niveau de transformation appliqué aux produits (Scislowski, 2015) : les produits bruts non transformés, comme l'escalope de dinde ou la viande de porc fraîche, étaient les moins impactants, tandis que les produits les plus transformés par la formulation (ajout de sel ou/et de matière grasse, comme les lardons ou le saucisson sec) ou/et par les procédés (chauffage/cuisson, fumage, séchage…) étaient les plus impactants. D'une manière générale, selon cette approche, la transformation des aliments a toujours un impact négatif sur l'environnement (Scislowski, 2015), car elle conduit à une diminution de la qualité nutritionnelle des aliments, du fait de la baisse du score SAIN et/ou de l'augmentation du score LIM.

La conservation des aliments périssables par la réfrigération dans la chaîne d'approvisionnement est essentielle pour prolonger la durée de conservation et fournir aux consommateurs des aliments sûrs. Cependant, l'électricité consommée dans les processus de réfrigération, estimée à 15% de la consommation totale d'électricité dans le monde entier, a un impact économique et environnemental certain (Guillier *et al.*, 2016). Le secteur agro-alimentaire est responsable à lui seul, en France, de 57% de la consommation industrielle d'électricité consacrée à la production de froid : le secteur des viandes et des produits carnés en est l'un des premiers consommateurs (Massoulier *et al.*, 2011). En 2009, l'Institut International du Froid a estimé que l'absence de

réfrigération ou des problèmes lors l'étape de réfrigération étaient à l'origine de 80% des pertes de denrées périssables à l'échelle du monde, qui elles-mêmes représentaient 25% de l'ensemble des denrées alimentaires produites ; dans les pays industrialisés, les problèmes liés à la chaîne du froid sont même à l'origine de 90% des pertes de denrées périssables, estimées à 10% de la production totale (Laguerre *et al.*, 2013). Dans ce contexte, l'analyse décisionnelle multicritères qui permet de structurer un problème de décision sous l'angle de multiples dimensions - par exemple, le risque microbiologique, la consommation d'énergie et le gaspillage alimentaire - peut aider à la prise de décision, en intégrant différents résultats, des mesures qualitatives et quantitatives dans un cadre transparent, pour la mise en œuvre d'une politique alimentaire équilibrée (Guillier *et al.*, 2016).

Une étude très récente (Duret *et al.*, 2019) a exploré le lien entre la chaîne du froid du jambon cuit - incluant le transport, la chambre froide dans les supermarchés, les vitrines, le transport par le consommateur et le réfrigérateur domestique -, et le risque pour la santé humaine associé à *Listeria monocytogenes*, la quantité d'aliments gaspillés en raison de la croissance des bactéries d'altération et la consommation électrique pour maintenir la température des produits dans la chaîne du froid. Un ensemble de huit actions d'intervention a été testé pour évaluer leur impact sur les trois critères investigués : sécurité, gaspillage et consommation énergétique. Les résultats montrent que la modification du thermostat du réfrigérateur domestique a un impact élevé sur la sécurité alimentaire et le gaspillage des aliments et un impact limité sur la consommation électrique. Inversement, la modification du débit d'air dans l'armoire a un impact élevé sur la consommation électrique et un impact limité sur la sécurité alimentaire et les déchets alimentaires. Une approche d'analyse des coûts et deux méthodes d'analyse décisionnelle multicritères (AHP et ELECTRE III) ont été utilisées pour classer les mesures d'intervention. Ces trois méthodologies montrent que l'un des huit scénarios testés, *i.e.* le réglage du thermostat du réfrigérateur domestique à 4°C, représente le meilleur compromis entre les trois critères. Cette étude a également exploré, par une analyse de sensibilité, l'impact des préférences des décideurs (pondération relative des trois domaines de critères) sur le classement des huit scénarios. Cette analyse a montré une faible sensibilité des préférences relatives des décideurs sur le classement des scénarios. Les approches proposées par cette étude ont démontré leur utilité dans l'aide à la prise de décision pour évaluer l'impact global des actions d'intervention sur des questions impliquant des résultats antagonistes (Duret *et al.*, 2019).

Outre le procédé de conservation des produits alimentaires, quelques travaux se sont intéressés à l'optimisation multicritère de la durabilité des procédés de transformation des aliments en lien avec leurs qualités, soit au couple *procédé de transformation-produit alimentaire*. A ce propos, les travaux conduits par Raffray (2014) et Raffray *et al.* (2015a), visant à concevoir un procédé innovant de fumage à chaud de poissons, en optimisant conjointement la qualité des produits, les performances énergétiques et les performances de production, sont particulièrement intéressants. La méthode d'optimisation globale spécifiquement adaptée à la conception (Sebastian *et al.*, 2010) utilisée est la méthode OIA (Observation-Interprétation-Agrégation), qui repose sur trois étapes principales. Dans la première étape, les indicateurs de performance du procédé, appelés variables d'observation, sont liés aux variables de conception au moyen d'un modèle d'observation. Dans le cas du procédé de fumage à chaud, huit variables de conception ont été identifiées, puis liées aux six variables d'observation suivantes :

- La productivité, définie comme étant la quantité de produit transformé par unité de temps et d'espace ;
- Les pertes de production qui correspondent au séchage excessif de certains produits, œ qui entraîne une perte de productivité, et donc des pertes économiques ;
- L'efficacité de l'échange thermique déterminée par la moyenne temporelle du rapport entre la perte d'énergie des fumées de combustion entre le haut et le bas du fumoir, et l'énergie fournie par le brûleur à gaz ;
- L'efficacité de séchage, définie comme le rapport entre l'énergie latente de vaporisation de l'eau extraite du produit et la quantité totale d'énergie fournie par le brûleur à gaz ;
- L'exposition à la cuisson, variable qui correspond à la température maximale atteinte par la partie la plus froide du produit en cours de fumage ;
- Et l'exposition à haute température, définie comme étant la température maximale atteinte par le produit en cours de fumage.

Le modèle d'observation du procédé de fumage à chaud par plaque radiante a été basé sur un modèle de simulation de ce procédé appliqué au poisson (Raffray, 2014 ; Raffray *et al.*, 2015b).

Lors de l'étape d'interprétation, les variables d'observation sont converties en indices de satisfaction (entre 0 et 1) à l'aide de fonctions de désirabilité prédéfinies (Trautmann et Mehnen, 2005). Cette approche permet de traiter aussi bien des performances que des contraintes en lien avec le problème de conception ; les contraintes pouvant être considérées à leur tour comme des objectifs à satisfaire. Deux niveaux de satisfaction (un bas de non-satisfaction et un haut de satisfaction) doivent être définis pour

chaque fonction de désirabilité, ce qui permet de borner avec précision les domaines de satisfaction des variables d'observation. Le choix des valeurs de ces deux niveaux repose sur la connaissance experte, soit par analogie avec certains dispositifs similaires existants, soit par retour d'expériences, soit à partir d'enquêtes effectuées auprès d'industriels. Dans l'étude de Raffray *et al.* (2015a), un indice de satisfaction a été calculé pour chacun des trois objectifs visés (qualité des produits, performances énergétiques et performances de production), en sommant les variables d'observation deux à deux.

La troisième et dernière étape consiste en l'agrégation de toutes les variables interprétées en un seul indice global ou, dans le cas de Raffray *et al.* (2015a), des trois indices de satisfaction en une seule fonction objectif, indice global ou fonction objectif qu'il convient ensuite de maximiser (Raffray *et al.*, 2015a). Raffray *et al.* (2015a) ont pris le parti de faire cette maximisation en appliquant une règle de minimisation, c'est-à-dire que la valeur de la fonction objectif retenue au final correspond à la valeur minimale des trois indices de satisfaction obtenus. Enfin, un algorithme génétique a été utilisé pour trouver la (les) solution(s) de conception optimale. Une analyse des résultats a permis d'identifier l'efficacité énergétique comme étant l'objectif limitant dans ce procédé de fumage. À partir de là, il a été proposé d'améliorer la technologie en ajoutant des ailettes entre les plaques, afin d'augmenter les coefficients de transfert de chaleur entre les fumées et les plaques du fumoir. Ainsi, la productivité et l'efficacité du séchage ont été augmentées de 120% et de 15%, respectivement, tout en maintenant des niveaux satisfaisants en termes d'efficacité énergétique et de qualité des produits.

Lors du procédé de chauffage/cuisson des viandes, de nombreuses études très récentes basées sur la modélisation et sur de nouvelles approches analytiques ont été conduites pour analyser, selon une approche multicritère, l'évolution des qualités technologiques, sensorielles ou nutritionnelles de ces produits, en particulier, en regard de leur qualité sanitaire (sécurité chimique). Une première série d'études a été menée pour quantifier la quantité de substances toxiques générées lors du chauffage de la viande, comme, par exemple, les amines aromatiques hétérocycliques lors de la cuisson à l'air des viandes (Kondjoyan *et al.*, 2016) ou dans les tranches de muscles de bœuf soumises, soit à des jets d'air chaud (Kondjoyan *et al.*, 2010b), soit à de la vapeur surchauffée (Kondjoyan *et al.*, 2010a). Les études sur la sécurité chimique des viandes, en raison d'énormes progrès dans le domaine de la chimie analytique et de la toxicogénomique, sont devenues plus systémiques, s'étendant à toute la chaîne de la viande : depuis l'élevage - pour quantifier l'exposition du bétail aux micropolluants (Bouhlel *et al.*, 2017) – jusqu'à la consommation de la viande par l'homme, par exemple, pour montrer comment les protéines animales sont assimilées par l'intestin lors de la digestion gastrique (Kondjoyan *et al.*, 2015). Sur ce point, les nouvelles données obtenues à partir de mesures *in vitro* de la bioaccessibilité digestive constituent un pas important vers une meilleure évaluation des risques associés à l'existence de micro-contaminants et/ou de substances toxiques d'origine industrielle dans les produits carnés (Engel *et al.*, 2015). Concernant les procédés de transformation appliqués à la viande, plusieurs auteurs ont démontré la pertinence de combiner des techniques analytiques telles que la chromatographie en phase gazeuse multidimensionnelle, l'olfactométrie et la spectrométrie de masse pour étudier, d'une part, simultanément les productions de substances toxiques et de composés odorants actifs générés pendant la cuisson des viandes (Giri *et al.*, 2015), et d'autre part, le devenir de certains micropolluants auxquels les animaux ont été exposés lors de l'élevage pendant la cuisson à la poêle de la viande (Planche *et al.*, 2017). Les nouveaux outils expérimentaux disponibles pour la détection des toxines induites par les procédés devraient permettre aux professionnels d'innover, tout en répondant aux attentes sensorielles et nutritionnelles des consommateurs et en protégeant leur santé (Meurillon et Engel, 2019 ; Meurillon *et al.*, 2018).

Souvent considéré comme l'élément indésirable associé à l'aliment, notamment dans le cas des produits animaux, l'emballage en est pourtant l'allié indispensable et indissociable. En effet, l'emballage a pour fonction primaire de protéger et de stabiliser l'aliment. Qu'il soit plastique (le plus important en volume produit), papier-carton (premier matériau en valeur), verre, bois, métal ou composite (mélange de plusieurs matériaux), l'emballage est mis en œuvre, le plus souvent, à la fin de la chaîne de production de l'aliment et fait partie intégrante des technologies de conservation de l'aliment (Gontard, 2015). Très récemment, Fresan *et al.* (2019) ont évalué l'impact environnemental (en particulier, les émissions de GES) des matériaux utilisés pour l'emballage primaire des aliments emballés couramment consommés, en particulier lors du petit-déjeuner (dont le lait), et de déterminer si la taille des produits avait un effet quelconque. Ces auteurs ont mis en évidence, quel que soit le produit alimentaire, une différence significative d'émissions de GES par portion en fonction de la taille de l'emballage, des matériaux d'emballage et de la marque commerciale. Ils ont aussi constaté que l'impact environnemental des emballages était constamment inférieur à celui de la production/transformation alimentaire. Malgré tout, en étant vecteur d'importants enjeux économiques, environnementaux et de santé publique, l'emballage alimentaire impose aujourd'hui aux acteurs économiques de faire évoluer les matériaux et les technologies vers des solutions plus respectueuses à la fois de l'environnement et du consommateur. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux plastiques biosourcés et/ou biodégradables ont été introduits sur le marché des matériaux d'emballage avec l'objectif de se substituer aux matériaux plastiques d'origine pétrochimique. La substitution des matériaux d'origine

pétrochimique par des matériaux biodégradables et issus de ressources non seulement renouvelables mais aussi non alimentaires, par exemple les résidus des industries agro-alimentaires, constitue un défi très attendu de la recherche agro-alimentaire (Gontard *et al.*, 2017). Les demandes du monde socio-économique s'orientent aujourd'hui vers l'utilisation et la conception raisonnée d'emballages alimentaires capables d'offrir un bon compromis entre différents critères liés à la qualité des aliments, à la sécurité du consommateur, à la compétitivité économique des produits et à la protection de l'environnement (Angellier-Coussy *et al.*, 2013). Dans ce contexte, Buche *et al.* (2017) ont développé un outil d'aide à la décision multicritère pour choisir au mieux le matériau d'emballage, sur la base d'une approche pluridisciplinaire combinant génie des procédés, ingénierie des connaissances et informatique. Des modèles numériques de transfert de matière simulant un emballage sous atmosphère modifiée sont couplés à deux bases de données 'emballages' et 'produits frais' dans une application web. Une approche originale d'interrogation multicritère a été développée afin de permettre à l'utilisateur d'interroger la base de données 'emballages' à partir des caractéristiques du produit à emballer ainsi que des propriétés de transfert de matière et d'autres critères comme la transparence, la biodégradabilité, le prix, *etc.* Si plusieurs emballages sont dans la même classe d'équivalence après avoir satisfaits les contraintes, un raffinement du tri est possible, en prenant en considération des souhaits (Buche *et al.*, 2017). Enfin, la prochaine génération d'emballages alimentaires devra soutenir la transition vers une économie circulaire (Guillard *et al.*, 2018). En effet, il est possible d'imaginer d'ici à 2050, être en mesure de produire, en Europe, 50% des matériaux d'emballage alimentaire à partir de ressources renouvelables non alimentaires, en utilisant des déchets recyclés issus de l'agriculture biologique (aliments et emballages), les 50% restants étant produits à partir de matériaux recyclés à base d'huile. Tous ces emballages biosourcés seront entièrement biodégradables et compostables à domicile, ce qui permettra de résoudre les problèmes actuels d'accumulation dans l'environnement de déchets plastiques (Dahiya *et al.*, 2018), tout en générant jusqu'à 0,6 billion d'€ de bénéfices annuels, en Europe (Ellen MacArthur Foundation et McKinsey Center for Business and Environment, 2015).

Tous ces résultats montrent que les études ayant trait à la viande et aux produits carnés sont clairement passées, ces dernières années, d'une analyse monocritère souvent liée à une seule qualité de produit en cours de transformation à une véritable analyse décisionnelle multicritères combinant plusieurs qualités technologiques, sensorielles, sanitaires ou nutritionnelles des produits, depuis l'élevage jusqu'à la transformation, incluant l'emballage, voire même la digestion par l'homme. Cependant, il reste encore à combiner tous ces critères portant sur les qualités des produits carnés aux critères liés à la durabilité de l'ensemble de la chaîne de production, de transformation et de conservation de la viande et des produits carnés pour développer de vrais outils d'analyse multicritères systémiques.

Encart 3 : Plateforme nationale MEANS (MulticritEria AssessmeNt of Sustainability)

La plateforme MEANS (https://www6.inra.fr/means/) est née en 2012, de la volonté de l'INRA et, depuis 2018, du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), de mettre à disposition de la communauté scientifique un ensemble complet et modulaire d'outils informatiques pour l'évaluation multicritère de systèmes agricoles et agroalimentaires. La notion capitale de durabilité (sociale, économique, environnementale) est au cœur de ce dispositif qui couvre les champs scientifiques des productions végétales, productions animales et de transformation des produits issus de l'agriculture. Son objectif est de permettre aux équipes INRAE et à leurs partenaires académiques directs de réaliser des analyses multicritères de la durabilité des systèmes de production végétale, animale et de transformation des produits agricoles (Auberger *et al.*, 2013). Il se décline en quatre missions : (1) Développer et mettre à disposition des outils informatiques pour le calcul d'indicateurs de durabilité, (2) Mettre en place et mutualiser des bases de données pour l'analyse multicritère, (3) Former et accompagner les utilisateurs, et (4) Assurer une veille scientifique et technique sur l'analyse multicritère. Depuis 2014, un partenariat avec l'Ademe, dans le cadre du programme AgriBalyse, a permis d'accélérer le développement de la plateforme. MEANS héberge actuellement plusieurs logiciels/méthodes de calcul qui permettent aux utilisateurs de réaliser leurs évaluations multicritères : (1) le logiciel Means InOut, développé par l'équipe de la plateforme, qui facilite l'analyse des systèmes de production végétale et animale par des méthodes multicritères, telles que l'ACV ; (2) la méthode DIAMOND (DIagnostic de durabilité des ateliers d'élevage des Animaux MONogastriques Déclinable par espèce) qui est une méthode d'évaluation de la durabilité des ateliers d'élevage (Litt *et al.*, 2014), générique à l'ensemble des animaux monogastriques (lapins, volailles, palmipèdes gras, porcs…) ; (3) DEXiFruits, un outil d'évaluation multicritère de durabilité des systèmes de culture en arboriculture fruitière (Alaphilippe *et al.*, 2017) ; (4) DEXiPM, un outil intégré de conception et d'évaluation dynamique des cultures, multicritère, multi-échelle et multi-acteur pour aider à la conception *a priori* de systèmes de culture innovants, économes en pesticides (Pelzer *et al.*, 2012) ; (5) le modèle MASC (Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems) qui a été conçu pour évaluer la contribution au développement durable (économique, social, et environnemental) des systèmes de culture, au travers de 39 critères sélectionnés pour rendre compte des performances de ces systèmes de grandes cultures en Europe de l'Ouest (Sadok *et al.*, 2009) ; et (6) l'outil cSyNE qui

permet de calculer des indicateurs SyNE (indicateur d'efficience azotée), SyNB (indicateur de pression azotée) et RNE (indicateur d'efficience azotée relative) dans le cas d'exploitations produisant des grandes cultures, des cultures fourragères et des vaches laitières (Godinot *et al.*, 2014).

La plateforme MEANS est conçue pour guider l'utilisateur dans les 8 étapes de l'évaluation multicritère, que sont la définition des dimensions de la durabilité, l'identification des critères, la définition d'indicateurs, la définition du système étudié, la définition des algorithmes de calcul des indicateurs, la description technique du système étudié, le calcul des indicateurs et l'interprétation des résultats qui peut permettre d'identifier des améliorations du système. Elle propose une interface dans laquelle l'utilisateur peut choisir une méthode d'évaluation multicritère. Selon le système étudié (grandes cultures, production animale par exemple), MEANS propose des formulaires de saisie adaptés, et permet d'appliquer les calculs nécessaires pour la méthode choisie.

4.3.4 Cartographies multicritères : un outil d'aide à la conception de produits plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs – Exemple d'un aliment composite : la pizza

Qu'il s'agisse d'optimiser le coût d'une recette, son profil nutritionnel, sa durée de vie ou remplacer un additif, la reformulation d'aliments est une activité très importante des industriels. Si le profilage nutritionnel est une méthode permettant d'optimiser les recettes sur la base des besoins nutritionnels des individus (Masset *et al.*, 2016), ce type de méthode trouve ses limites, lorsqu'il s'agit de prendre en compte d'autres dimensions telles que l'impact environnemental ou l'appréciation des produits par les consommateurs. Pourtant, les consommateurs et citoyens ont aujourd'hui pris conscience que l'alimentation est un facteur clé de leur bien-être, de leur santé et qu'elle impacte l'environnement et le futur de nos sociétés à travers des pratiques plus ou moins durables. Il est donc nécessaire de pouvoir trouver des méthodes permettant de répondre, à la fois, aux contraintes de transformation des matières premières par les industriels, et aux attentes des consommateurs.

Autour d'un exemple d'un aliment transformé, les pizzas, un travail de cartographie multicritère a été réalisé, avec pour objectifs de caractériser la diversité de l'offre au sein d'une même catégorie d'aliment, mais aussi et surtout pour identifier les leviers de reformulation prenant en compte à la fois des critères nutritionnel, environnemental, technologique, économique et sensoriel (Figure 4.4). Les pizzas sont des produits constitués, à la fois, de produits d'origine animale et végétale, présentant des formulations plus ou moins complexes en nombre d'ingrédients et additifs utilisés.

A partir des données de composition des pizzas, issues de la base de données OQALI (Observatoire de l'alimentation - https://www.oqali.fr/), différents indicateurs nutritionnels (SENS, 5C et des indicateurs de composition nutritionnelle) ont été calculés. Un indice de "processing" des 387 pizzas de l'étude a également été déterminé à partir des itinéraires technologiques de chaque ingrédient présent dans chacune des pizzas et d'un travail de recueil d'experts. Enfin, l'ensemble des données économiques (prix et volumes de ventes) a également été recueillie pour ces pizzas (données Kantar, https://www.kantarworldpanel.com/fr). Des analyses de cycle de vie, ainsi que des analyses exergétiques, ont été réalisées sur 80 pizzas représentatives de la diversité (sélection sur la base d'une classification en 16 groupes comprenant chacun 5 pizzas), afin de calculer différents indicateurs environnementaux. Enfin, 16 pizzas représentatives de l'ensemble des pizzas ont été évaluées, à la fois, par un panel de juges entraînés et de deux panels de consommateurs (en restauration collective et à domicile) pour évaluer les perceptions et l'appréciation des pizzas selon différentes dimensions, liées aux préférences sensorielles, mais aussi à leur caractère naturel, leur qualité nutritionnelle ou leur contribution à la protection de l'environnement.

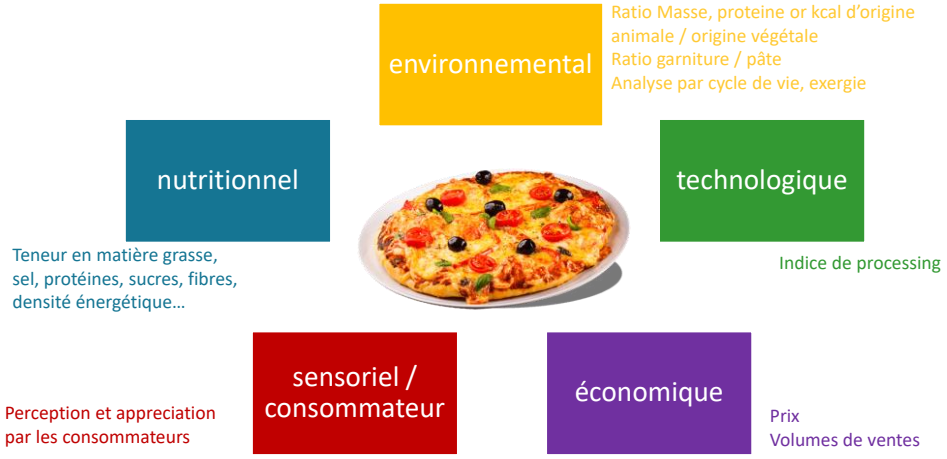


Figure 4.4 : approche multicritère mise en œuvre pour identifier des recommandations pour proposer une offre alimentaire plus saine, plus durable et appréciée

Les résultats de cette étude ont montré qu'en moyenne, une pizza qui contiendrait plus de produits d'origine animale serait plus chère, aurait une qualité nutritionnelle moins bonne et un impact plus grand pour l'environnement qu'une pizza proportionnellement plus riche en produits végétaux. Plus précisément, il a été montré que les pizzas légume, jambon fromage et margherita surgelées des marques distributeurs auraient une part de produits végétaux plus importante, seraient « meilleures » pour la santé et l'environnement et seraient moins onéreuses que les pizzas fromage et charcuterie fraîches de marques nationales (Figure 4.5). Par ailleurs, ces travaux ont montré que le niveau de transformation des pizzas (indice de « processing ») était peu corrélé aux autres indicateurs, mais restait toutefois faiblement corrélé à la qualité nutritionnelle des pizzas et notamment, à la teneur en sel et à la densité calorique.

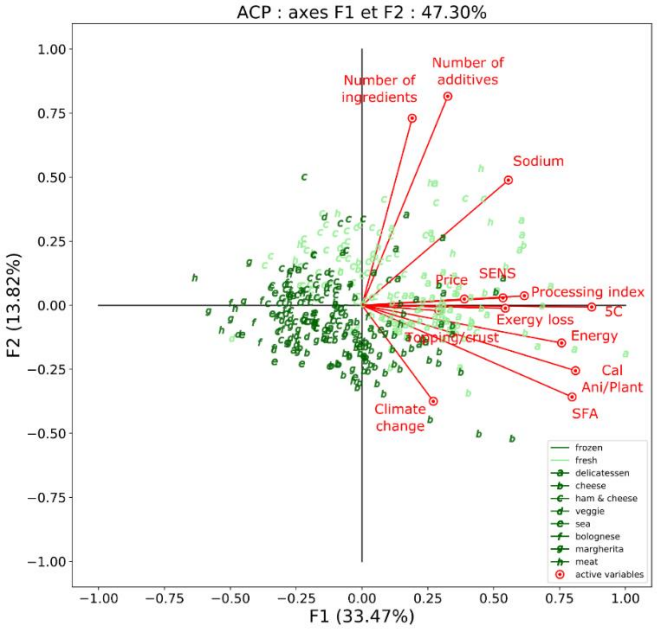


Figure 4.5 : Analyse en composante principale illustrant la diversité des pizzas vendues en supermarché sur la base d'indicateurs nutritionnels, technologiques et économiques (Maurice et al., soumis[6])

En confrontant les données des indicateurs objectifs (nutrition, degré de transformation et indicateurs environnementaux) aux attentes et aux données de perception par les consommateurs, nous avons pu montrer que la perception de naturalité n'était pas liée à ces indicateurs objectifs, montrant la complexité de cette dimension. Par contre, elle est fortement liée à l'appréciation des pizzas. Plus un produit est apprécié, plus il est perçu naturel par les consommateurs. Par ailleurs, ces travaux n'ont montré aucun lien entre la perception de durabilité et l'appréciation des pizzas, le ratio d'ingrédients d'origine animale sur végétale et les indicateurs environnementaux.

Sur la base des perceptions évaluées par les consommateurs, une cartographie des préférences a été construire, permettant ainsi d'identifier les caractéristiques des pizzas les plus appréciées. Ces caractéristiques étaient, par exemple, des pizzas plutôt faciles à mastiquer, avec une pâte peu collante et une garniture abondante. L'extrapolation des données des 16 pizzas, à l'ensemble des pizzas a permis d'identifier les zones possibles de reformulation pour améliorer, à la fois, les caractéristiques nutritionnelles et environnementales des produits, tout en restant appréciés des consommateurs (Figure 4.6).

[6] Maurice B.., Bidault H., Soler LG., Saint-Eve A., Souchon I., Insight into processed foods to investigate the links between a new processing score and nutritional characteristics: case of the French pizza market (soumis)

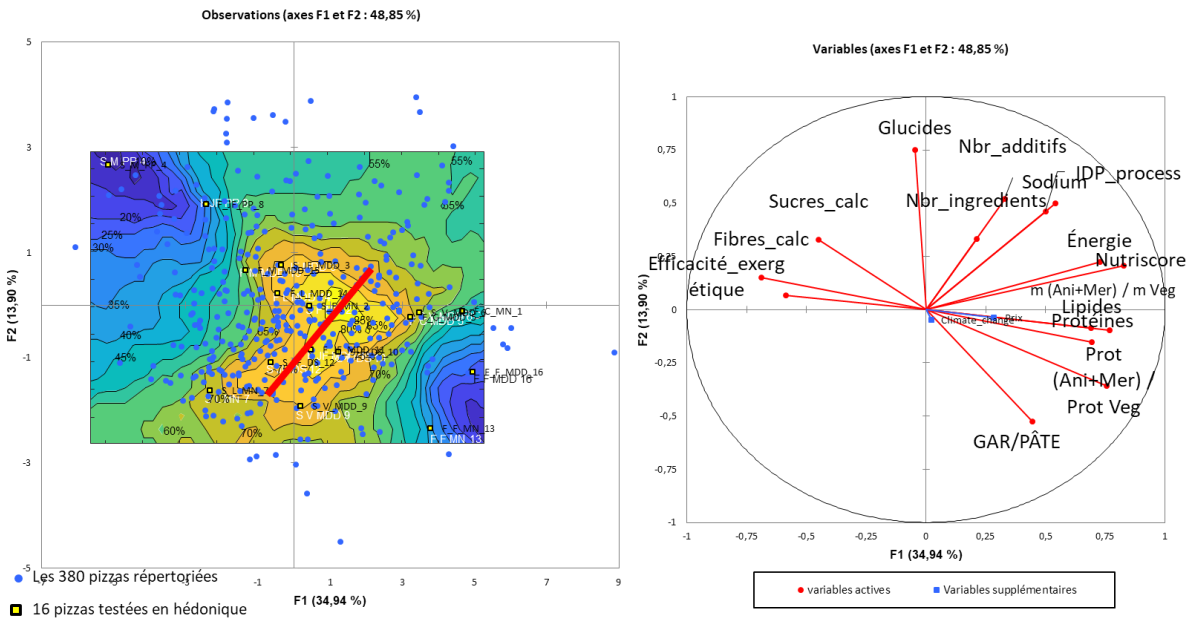


Figure 4.6 : Cartographie des préférences des pizzas selon les caractéristiques nutritionnelles, technologiques et environnementales des produits (Saint-Eve et al., 2018)

L'approche proposée dans cette étude sur les pizzas ne constitue pas une méthode d'optimisation multicritère en tant que telle, mais doit être vue comme une démarche permettant d'intégrer un ensemble de contraintes pour aider à la reformulation de produits, à la fois, plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs.

4.3.5 Approches multicritères : exemples allant jusqu'à la santé des consommateurs

Des études visant à relier régime/choix alimentaire, impact environnemental et santé du consommateur commencent à paraître. Une des premières a été celle conduite par Stylianou *et al.* (2016) qui ont développé un nouveau concept d'ACV combinant impacts environnemental et nutritionnel, afin d'évaluer et de comparer, en parallèle, les effets environnementaux et nutritionnels des aliments ou des régimes alimentaires. Ces auteurs ont appliqué ce cadre conceptuel pour évaluer les impacts sur la santé humain, exprimés en DALY, à un cas d'étude servant de preuve de concept, visant à analyser les effets environnementaux et nutritionnels sur la santé humaine associés à l'ajout d'une portion de lait de consommation au régime moyen actuel d'un Américain adulte. En quantifiant les effets potentiels sur la santé humaine liés au réchauffement climatique, à l'émission de particules dans l'air et à la nutrition, les travaux de Stylianou *et al.* (2016) suggèrent que l'ajout d'une portion de lait au régime alimentaire moyen actuel aurait un effet bénéfique sur la santé des Américains adultes, si les aliments consommés en association et présentant des avantages substantiels pour la santé ne sont pas substitués, tels que les fruits et légumes. Le bénéfice pour la santé est encore plus net lorsque l'ajout de cette portion de lait se fait, dans le cadre d'un régime iso-calorique, au détriment d'aliments dont une consommation excessive est néfaste pour la santé, comme les boissons sucrées.

Parmi ces études, il convient aussi de citer l'étude très récente de Clark *et al.* (2019) qui ont investigué, sur la base de méta-analyses, en quoi la consommation quotidienne d'une portion supplémentaire de chacun des 15 groupes d'aliments étudiés - volaille, produits laitiers, poisson, œufs, fruits, légumes, légumineuses, noix, huile d'olive, pommes de terre, viande rouge transformée, viande rouge non transformée, boissons sucrées, céréales raffinées et céréales complètes - impactait 5 indicateurs traduisant la mise en péril de la bonne santé chez l'Homme adulte - diabète de type II, accidents vasculaires cérébraux, maladies coronariennes, cancer colorectal et mortalité - et 5 indicateurs liés à la dégradation de l'environnement, du fait des pratiques agricoles mises en œuvre pour les produire – émission de GES, utilisation des terres, utilisation de l'eau pondérée par un coefficient pour tenir compte de sa rareté en fonction du lieu géographique, l'acidification et l'eutrophisation. Précisons que dans les impacts environnementaux ne sont pas pris en compte les impacts de certaines étapes survenant après la production ou la fabrication comme le transport, la commercialisation et la préparation des aliments chez le consommateur. Les principales conclusions de cette étude ont été que :

D'une manière générale, les aliments conduisant à une forte réduction du risque de maladie sur l'un des critères sont souvent associés à une réduction encore plus forte du risque de maladie quantifié au travers des autres critères. De même, les aliments

ayant un impact moindre selon l'un des critères quantifiant les dommages environnementaux ont tendance à avoir aussi des impacts plus faibles sur les autres critères environnementaux.

En outre, parmi les aliments associés à une amélioration nette de la santé chez l'Homme adulte (céréales complètes, fruits, légumes, légumineuses, noix, huile d'olive et poisson), tous, à l'exception du poisson, présentent les impacts environnementaux les plus faibles ; le poisson a, cependant, des impacts environnementaux nettement plus faibles que les viandes rouges transformées ou non.

Enfin, les aliments associés aux impacts environnementaux négatifs les plus importants - viande rouge transformée et non transformée - sont systématiquement associés aux augmentations les plus importantes du risque de maladie chez l'Homme adulte.

Enfin, pour rechercher des associations générales entre les impacts des types d'aliments sur la santé et l'environnement, Clark *et al.* (2019) ont comparé le risque relatif de chacun des indicateurs relatifs à la santé chez l'Homme lié à la consommation de chacun des 15 groupes d'aliment *vs.* l'impact environnemental relatif moyenné sur les 5 indicateurs environnementaux. La figure 4.7 présente les résultats dans le cas de l'indicateur 'mortalité'.

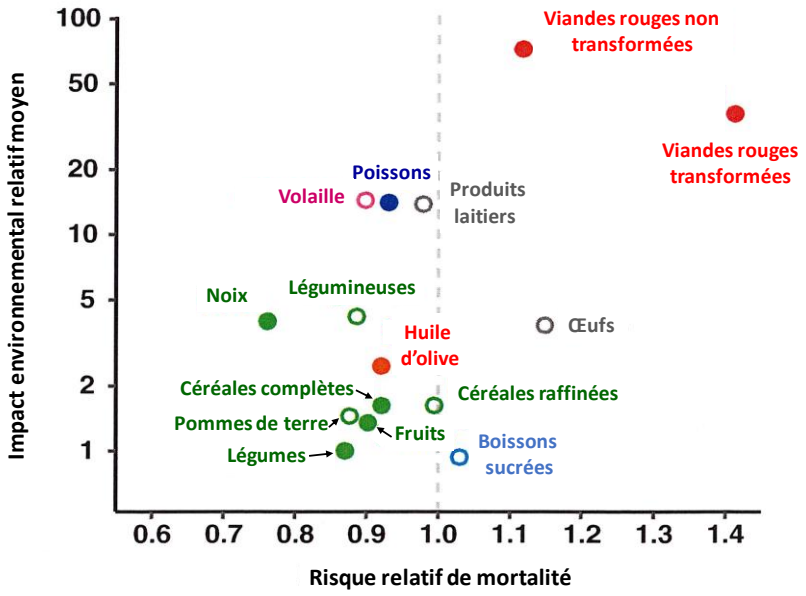


Figure 4.7 : Association entre l'impact sur l'indicateur 'mortalité' d'un groupe d'aliments et l'impact environnemental relatif moyen de ce même groupe d'aliments. L'axe des ordonnées est tracé selon une échelle logarithmique et représente le paramètre 'Impact environnemental relatif moyen' lié à la production d'une portion de chaque groupe d'aliments. L'axe des abscisses représente le risque relatif de mortalité, où un risque relatif > 1 indique que la consommation d'une portion quotidienne supplémentaire du groupe d'aliments en question est associée à un risque accru de mortalité, et un risque relatif < 1 indique que cette consommation est associée à un risque réduit de mortalité (d'après Clark et al. (2019)).

La Figure 4.7 indique que les aliments associés à des réductions significatives de la mortalité ont systématiquement un impact environnemental relatif moyen faible. Le poisson, qui est aussi un groupe d'aliments associé à une réduction significative de la mortalité, présente un impact environnemental relatif moyen intermédiaire. Les aliments associés à une augmentation significative de la mortalité ont des impacts environnementaux variables : les viandes rouges non transformées et les viandes rouges transformées impactent le plus fortement l'environnement, tandis que les boissons sucrées sont, parmi les 15 groupes d'aliments étudiés, le groupe d'aliments impactant le plus faiblement l'environnement. Cependant, même si l'impact négatif sur l'environnement est très faible, il est impossible de recommander une consommation excessive de boissons sucrées, vu son impact très négatif sur la santé chez l'Homme, ce qui démontre, une nouvelle fois, l'intérêt d'aborder la durabilité des systèmes de production et de transformation, ainsi que l'alimentation et la santé chez l'Homme selon une approche multicritère.

Ainsi, selon l'étude de Clark *et al.* (2019), les transitions alimentaires conduisant à une consommation accrue d'aliments plus sains amélioreraient notablement la durabilité environnementale. Enfin, les aliments ayant des impacts environnementaux intermédiaires ou qui ne sont pas associés de manière significative à des effets négatifs sur la santé, tels que les céréales raffinées,

les produits laitiers, les œufs et les volailles, pourraient également contribuer à la réalisation des objectifs internationaux de durabilité axés sur la santé chez l'Homme ou/et sur l'environnement, s'ils étaient consommés en remplacement d'aliments moins sains ou ayant des impacts environnementaux beaucoup plus élevés tels que les viandes rouges transformées ou non (Pan *et al.*, 2012). Ces résultats pourraient aider les consommateurs, les décideurs et les entreprises du secteur alimentaire à mieux analyser les multiples incidences des choix alimentaires sur la santé, mais aussi sur l'environnement.

4.4 Principales conclusions

L'expertise ayant identifié des antagonismes entre les différentes propriétés constitutives de la qualité, un des moyens pour approcher la qualité des produits animaux (lait, viande, produits laitiers et produits carnés…) dans ses différentes dimensions, y compris en prenant en compte les trois piliers (environnemental, économique et social) de la durabilité en lien avec les systèmes de production et de transformation, consiste alors en une évaluation multicritère. Le développement d'indicateurs quantitatifs pertinents est donc un prérequis pour mettre en place cette démarche d'analyse multicritère.

L'impact environnemental qui, généralement se limite à quantifier la consommation de ressources et l'émission de substances polluantes et/ou dangereuses pour l'homme et l'environnement, est généralement caractérisé au moyen d'une analyse du cycle de vie (ACV) ; l'ACV étant une méthode d'évaluation normalisée qui permet de comparer entre eux des produits, des procédés ou des services, sur la base d'une unité fonctionnelle. Le choix de l'unité fonctionnelle est donc primordial. Dans les ACV portant sur les aliments, l'unité fonctionnelle dominante reste la masse de produit, même si certaines études ont montré qu'une unité fonctionnelle plus en lien avec la composition (teneurs en protéines, matières grasses, micronutriments…) permettait d'améliorer la compréhension de l'impact environnemental lié à la fonction la plus importante de l'alimentation, à savoir, la nutrition. Outre le choix de l'unité fonctionnelle, la question de la méthode d'allocation des impacts environnementaux entre les différents coproduits est cruciale dans le cas des produits animaux. Il s'agit de décider sur quelle base répartir les impacts entre, par exemple, le lait et la viande au sein d'un élevage laitier, ou entre les différentes fractions obtenues après la découpe d'un animal (viande, graisses, os, peau, viscères…) qui vont suivre différentes voies de valorisation.

D'une manière générale, les évaluations multicritères portant sur la production et la transformation du lait se sont beaucoup concentrées sur la production du lait à la ferme, en mettant en œuvre des ACV et beaucoup moins sur la transformation, excepté la transformation du lait en quelques produits laitiers bien ciblés : fromages, yaourts, beurre ou margarine. La plupart des études ayant trait à production/transformation de la viande s'arrêtent à la sortie de l'exploitation agricole (« from cradle to farm gate »), et calculent les impacts liés à la production d'1 kg d'animal vivant. Les études prenant en compte l'impact des étapes aval comme le transport, l'abattage, la découpe, la transformation, la conservation au froid et la consommation sont plutôt rares car elles requièrent l'intégration de données propres aux filières, souvent difficiles d'accès, notamment celles en lien avec la transformation qui sont souvent protégées par le secret industriel (données confidentielles). Les études prenant en compte la durabilité des procédés de transformation ont souvent porté sur l'opération de nettoyage, sûrement à cause de l'impact environnemental élevé (consommation d'énergie, pollution…) de cette opération, notamment en industrie laitière. Cependant, toutes ces études ne prennent que très peu en compte la qualité des produits transformés sur toute la chaîne allant de la production à la consommation, en passant par la transformation et la conservation. Toutefois, sur la base d'une étude portant sur des pizzas, il a été montré qu'un travail de cartographie multicritère avait permis d'intégrer un ensemble de contraintes (critères nutritionnel, environnemental, technologique, économique et sensoriel) et pourrait aboutir, suite à une reformulation de produits, à des pizzas, à la fois, plus saines, plus durables et mieux appréciées par les consommateurs. Des études multicritères commencent aussi à apparaître afin de relier régime/choix alimentaire, impact environnemental et santé du consommateur, notamment au travers d'un nouveau concept d'ACV combinant impacts environnemental et nutritionnel.

Les bases méthodologiques sont donc aujourd'hui disponibles pour évaluer les synergies et les antagonismes, et gérer les compromis en lien avec les différents volets de la qualité, d'une part, et en lien avec les attentes des différents acteurs de la chaîne alimentaire, d'autre part. Les connaissances scientifiques sont également présentes pour construire les indicateurs correspondant aux sept dimensions de la qualité des produits animaux. Leur mise en œuvre nécessite, cependant, de définir les objectifs de l'évaluation et les critères à évaluer, de choisir et développer les indicateurs correspondants et de construire le modèle d'évaluation. Certaines approches multicritères s'appuient sur des consultations d'experts des différents maillons des filières, dès le début du processus d'analyse, pour le choix des indicateurs et la manière d'agréger les critères, d'autres beaucoup moins et uniquement à la fin lorsque les arbitrages (pondérations) sont à faire. Plusieurs niveaux d'utilisation de ces méthodes et indicateurs sont donc envisageables. Au niveau des entreprises, pour un nombre limité de maillons de la production alimentaire, les méthodes d'optimisation multi-objectif sont des outils pertinents d'amélioration de la performance au sein des filières. En revanche, pour une prise de décision en matière d'orientation sur le choix des systèmes de production, de transformation et les modes de

consommation, les méthodes multicritères d'aide à la décision sont les plus pertinentes. Si les scientifiques peuvent aider à construire les différents indicateurs à prendre en compte dans l'analyse, les décideurs/gestionnaires/représentants élus ont un rôle essentiel dans la définition des scénarios à évaluer et dans la pondération à donner aux différents critères. Cependant, en matière d'approche multicritère et d'aide à la décision, il faut être conscient qu'il n'existe pas de méthode universelle, adaptée à toutes les situations, mais que beaucoup de techniques ont été développées, permettant de traiter des cas spécifiques.

L'application de ces méthodes d'évaluation multicritère à la problématique des différentes dimensions de la qualité des produits animaux en lien avec la durabilité des systèmes de production, de transformation, de conservation et de consommation n'en est qu'à son début. Des études sont encore à mener afin de réellement intégrer les dimensions économiques et sociales. L'évaluation économique des systèmes de production et de transformation consiste à traduire l'impact économique de ces systèmes en termes de coûts/bénéfices et donc, de valeurs monétaires. L'évaluation de l'impact social est, à ce jour, très peu développé en comparaison des impacts environnementaux et économiques. Bien que le concept d'ACV « sociale » ait été développé dans les années 2000, il reste difficile à mettre en œuvre, faute de données suffisantes. Une fois toutes les données obtenues et ces évaluations réalisées, il sera possible de combiner tous les critères portant sur les différentes dimensions de la qualité des produits animaux aux critères liés à la durabilité de l'ensemble de la chaîne de production, de transformation, de conservation, mais aussi en lien avec la consommation, afin de développer de vrais outils d'analyse multicritères systémiques.

Références bibliographiques

Acosta-Alba, I.; Lopez-Ridaura, S.; van der Werf, H.M.G.; Leterme, P.; Corson, M.S., 2012. Exploring sustainable farming scenarios at a regional scale: an application to dairy farms in Brittany. *Journal of Cleaner Production*, 28: 160-167. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.061

Akkerman, R.; Farahani, P.; Grunow, M., 2010. Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, 32 (4): 863-904. http://dx.doi.org/10.1007/s00291-010-0223-2

Akpinar, E.K.; Midilli, A.; Bicer, Y., 2005. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. *Energy Conversion and Management*, 46 (15-16): 2530-2552. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.008

Alaphilippe, A.; Angevin, F.; Guerin, A.; Guillermin, P.; Velu, A.; Zavagli, F., 2017. DEXiFruits, un outil d'évaluation multicritère des systèmes de production de fruits : d''un outil recherche à un outil terrain. Un outil co-construit. *Innovations Agronomiques*, 59: 205-212. http://dx.doi.org/10.15454/1.5138502185112727E12

Angellier-Coussy, H.; Guillard, V.; Guillaume, C.; Gontard, N., 2013. Role of packaging in the smorgasbord of action for sustainable food consumption. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 24 (3): 15-19.

Anses, 2017. *Avis et rapport de l'Anses relatif à l'attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 1 : Revue des méthodes et inventaire des données*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 189 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra.pdf

Anses, 2018. *Attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 2 : Analyse des données épidémiologiques*. Paris: Anses, (Saisine n°2015-SA-0162), 112 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra-2.pdf

Aramyan, L.; Hoste, R.; van den Broek, W.; Groot, J.; Soethoudt, H.; Nguyen, T.L.; Hermansen, J.; van der Vorst, J., 2011. Towards sustainable food production: a scenario study of the European pork sector. *Journal on Chain and Network Science*, 11 (2): 177-189. https://www.wageningenacademic.com/doi/abs/10.3920/JCNS2011.Qpork8

Arrouays, D.; Balesdent, J.; Germon, J.C.; Jayet, P.A.; Soussana, J.F.; Stengel, P., 2002. *Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse du rapport d'expertise*. paris: INRA-DISI, 33 p. http://inra.dam.front.pad.wedia-group.com/ressources/afile/225455-e2ffa-resource-synthese-en-francais.html

Auberger, J.; Gesan-Guiziou, G.; Haese, C.; Aubin, J.; van der Werf, H., 2013. MEANS : une plateforme informatique INRA pour l'analyse multicritère de la durabilité des systèmes agricoles et agro-alimentaires. *Innovations Agronomiques*, 31: 169-181. https://www6.inra.fr/ciag/content/download/5192/40632/file/Vol31-10-Auberger.pdf

Aubin, J., 2014. Empreinte environnementale de la viande et des produits carnés. *Viandes & Produits carnés*, 30 (6-2): 1-7.

Ayer, N.W.; Tyedmers, P.H.; Pelletier, N.L.; Sonesson, U.; Scholz, A., 2007. Co-product allocation in life cycle assessments of seafood production systems: Review of problems and strategies. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12 (7): 480-487. http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.11.284

Azadnia, A.H.; Saman, M.Z.M.; Wong, K.Y., 2015. Sustainable supplier selection and order lot-sizing: an integrated multi-objective decision-making process. *International Journal of Production Research*, 53 (2): 383-408. http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2014.935827

Azapagic, A.; Perdan, S.; Clift, R., 2011. *Sustainable development in practice: case studies for engineers and scientists*. Wiley Online Library (2nd ed.), 536 p.

Banasik, A.; Bloemhof-Ruwaard, J.M.; Kanellopoulos, A.; Claassen, G.D.H.; van der Vorst, J., 2018. Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30 (3): 366-396. http://dx.doi.org/10.1007/s10696-016-9263-5

Basset-Mens, C.; van der Werf, H.M.G., 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 105 (1-2): 127-144. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2004.05.007

Batlle-Bayer, L.; Bala, A.; Lemaire, E.; Alberti, J.; Garcia-Herrero, I.; Aldaco, R.; Fullana-I-Palmer, P., 2019. An energy- and nutrient-corrected functional unit to compare LCAs of diets. *Science of the Total Environment*, 671: 175-179. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.332

Beamon, B.M., 1999. Designing the green supply chain. *Logistics information management*, 12 (4): 332-342. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/09576059910284159/full/html

Behzadian, M.; Kazemzadeh, R.B.; Albadvi, A.; Aghdasi, M., 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200 (1): 198-215. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021

Bockstaller, C.; Beauchet, S.; Manneville, V.; Amiaud, B.; Botreau, R., 2017. A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling & Software*, 97: 130-144. http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.011

Bokkers, E.A.M.; de Boer, I.J.M., 2009. Economic, ecological, and social performance of conventional and organic broiler production in the Netherlands. *British Poultry Science*, 50 (5): 546-557. http://dx.doi.org/10.1080/00071660903140999

Bonneau, M.; de Greef, K.; Brinkman, D.; Cinar, M.U.; Dourmad, J.Y.; Edge, H.L.; Fabrega, E.; Gonzalez, J.; Houwers, H.W.; Hviid, M.; Ilari-Antoine, E.; Klauke, T.N.; Phatsara, C.; Rydhmer, L.; van der Oever, B.; Zimmer, C.; Edwards, S.A., 2014a. Evaluation of the sustainability of contrasted pig farming systems: the procedure, the evaluated systems and the evaluation tools. *Animal*, 8 (12): 2011-2015. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731114002110

Bonneau, M.; Klauke, T.N.; Gonzalez, J.; Rydhmer, L.; Ilari-Antoine, E.; Dourmad, J.Y.; de Greef, K.; Houwers, H.W.; Cinar, M.U.; Fabrega, E.; Zimmer, C.; Hviid, M.; van der Oever, B.; Edwards, S.A., 2014b. Evaluation of the sustainability of contrasted pig farming systems: integrated evaluation. *Animal*, 8 (12): 2058-2068. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731114002122

Bonneau, M.; Penanmen, F.; Dourmad, J.Y.; Lebret, B., 2013. Q-Porkchains, un programme de recherche européen pour des filières de production porcines durables. *Viandes & Produits carnés*, VPC-2013-29-6-4: 5 p.

Bortolini, M.; Faccio, M.; Ferrari, E.; Gamberi, M.; Pilati, F., 2016. Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization. *Journal of Food Engineering*, 174: 56-67. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.014

Botreau, R.; Beauchet, S.; Laurent, C.; Hulin, S.; Herisset, R.; Thiollet-Scholtus, M.; Kanyarushoki, C.; Boucault, P.; Renaud-Gentie, C.; Jourjon, F., 2018. Une méthode pour évaluer conjointement performance environnementale et qualité globale des produits. Application aux filières vin et lait. *Innovations Agronomiques*, 63: 23-42.

Botreau, R.; Martin, B.; Hulin, S.; Kanyarushoki, C.; Farruggia, A.; Monsallier, F.; Loisel, A.; Herisset, R.; Laurent, C., 2017. Multicriteria evaluation for conjoint assessment of milk quality and environmental performances of dairy farms. *12. International Meeting on Mountain cheese, 20-22 June 2017*. Padova, Italy, 101-105.

Boue, G.; Cummins, E.; Guillou, S.; Antignac, J.P.; Le Bizec, B.; Membre, J.M., 2017. Development and Application of a Probabilistic Risk-Benefit Assessment Model for Infant Feeding Integrating Microbiological, Nutritional, and Chemical Components. *Risk Analysis*, 37 (12): 2360-2388. http://dx.doi.org/10.1111/risa.12792

Boue, G.; Cummins, E.; Guillou, S.; Antignac, J.P.; Le Bizec, B.; Membre, J.M., 2018. Public health risks and benefits associated with breast milk and infant formula consumption. *Critical reviews in food science and nutrition*, 58 (1): 126-145. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2016.1138101

Bouhlel, J.; Ratel, J.; Abouelkaram, S.; Mercier, F.; Travel, A.; Baeza, E.; Jondreville, C.; Dervilly-Pinel, G.; Marchand, P.; Le Bizec, B.; Dubreil, E.; Mompelat, S.; Verdon, E.; Inthavong, C.; Guerin, T.; Rutledge, D.N.; Engel, E., 2017. Solid-phase microextraction set-up for the analysis of liver volatolome to detect livestock exposure to micropollutants. *Journal of Chromatography A*, 1497: 9-18. http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2017.03.008

Brandenburg, M.; Govindan, K.; Sarkis, J.; Seuring, S., 2014. Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233 (2): 299-312. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032

Brans, J.P.; Vincke, P.; Mareschal, B., 1986. How to select and how to rank projects - The promethee method. *European Journal of Operational Research*, 24 (2): 228-238. http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(86)90044-5

Braungart, M.; McDonough, W.; Bollinger, A., 2007. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15 (13-14): 1337-1348. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003

Buche, P.; Gontard, N.; Guillard, V.; Guillaume, C.; Menut, L., 2017. Outil d'aide à la sélection d'emballages alimentaires pour la conservation sous atmosphère modifiée des produits frais. *Innovations Agronomiques*, 58: 81-91. http://dx.doi.org/10.15454/1.5137841213314526E12

Cardoso, D.M.; Climaco, J.C.N., 1992. The generalized Simplex-Method. *Operations Research Letters*, 12 (5): 337-348. http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377(92)90094-j

Castellini, C.; Bastianoni, S.; Granai, C.; Dal Bosco, A.; Brunetti, M., 2006. Sustainability of poultry production using the emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 114 (2-4): 343-350. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.014

Castellini, C.; Boggia, A.; Cortina, C.; Dal Bosco, A.; Paolotti, L.; Novelli, E.; Mugnai, C., 2012. A multicriteria approach for measuring the sustainability of different poultry production systems. *Journal of Cleaner Production*, 37: 192-201. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.006

Cederberg, C.; Stadig, M., 2003. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (6): 350-356. http://dx.doi.org/10.1065/lca2003.07.126

Cerda, V.; Cerda, J.L.; Idris, A.M., 2016. Optimization using the gradient and simplex methods. *Talanta*, 148: 641-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2015.05.061

Cerutti, A.K.; Bagliani, M.; Beccaro, G.L.; Gioelli, F.; Balsari, P.; Bounous, G., 2011. Evaluation of the sustainability of swine manure fertilization in orchard through Ecological Footprint Analysis: results from a case study in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 19 (4): 318-324. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.005

Chang, D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95 (3): 649-655. http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2

Chauvel, A.; Fournier, G.; Raimbault, C., 2001. *Manuel d'évaluation économique des procédés*. Paris: Editions Technip, 512 p.

Clark, M.A.; Springmann, M.; Hill, J.; Tilman, D., 2019. Multiple health and environmental impacts of foods. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (46): 23357-23362. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1906908116

Collette, Y.; Siarry, P., 2002. *Optimisation multiobjectif*. Paris: Editions Eyrolles, 328 p.

Commission européenne, 2002. Règlement (CE) n°178/2002 du Parlement européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires. *JOUE L 031 du 01.02.2002, p. 1-24*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32002R0178

Corson, M.S.; Doreau, M., 2013. Assessment of water use by livestock. *Inra Productions Animales*, 26 (3): 239-248.

Curran, M.; de Baan, L.; De Schryver, A.M.; van Zelm, R.; Hellweg, S.; Koellner, T.; Sonnemann, G.; Huijbregts, M.A.J., 2011. Toward Meaningful End Points of Biodiversity in Life Cycle Assessment. *Environmental Science & Technology*, 45 (1): 70-79. http://dx.doi.org/10.1021/es101444k

Dahiya, S.; Kumar, A.N.; Sravan, J.S.; Chatterjee, S.; Sarkar, O.; Mohan, S.V., 2018. Food waste biorefinery: Sustainable strategy for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 248: 2-12. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.176

Darmon, N.; Maillot, M.; Darmon, M.; Martin, A., 2007. Le SAIN et le LIM. Un système de «profilage nutritionnel» pour orienter favorablement les choix des consommateurs. *3. Journées annuelles INPES de la prévention, Paris, FRA, 2007-03-29-2007-03-30*, 24 p.

Darmon, N.; Vieux, F.; Maillot, M.; Volatier, J.L.; Martin, A., 2009. Nutrient profiles discriminate between foods according to their contribution to nutritionally adequate diets: a validation study using linear programming and the SAIN, LIM system. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89 (4): 1227-1236. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.2008.26465

De Jong, P., 1996. *Modelling and optimization of thermal processes in the dairy industry*. Delft University of Technology, Delft. 165 p.

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, 6 (2): 182-197. http://dx.doi.org/10.1109/4235.996017

Deka, D.; Datta, D., 2017. Multi-objective optimization of the scheduling of a heat exchanger network under milk fouling. *Knowledge-Based Systems*, 121: 71-82. http://dx.doi.org/10.1016/j.knosys.2016.12.027

Dekker, R.; Bloemhof, J.; Mallidis, I., 2012. Operations Research for green logistics - An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219 (3): 671-679. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010

Dewulf, J.; Van Langenhove, H.; Muys, B.; Bruers, S.; Bakshi, B.R.; Grubb, G.F.; Paulus, D.M.; Sciubba, E., 2008. Exergy: Its potential and limitations in environmental science and technology. *Environmental Science & Technology*, 42 (7): 2221-2232. http://dx.doi.org/10.1021/es071719a

Dolle, J.B.; Faverdin, P.; Agabriel, J.; Sauvant, D.; Klumpp, K., 2013. Contribution of cattle farming to GHG emissions and soil carbon sequestration according to production system. *Fourrages*, (215): 181-191.

Doreau, M.; Corson, M.S., 2017. Production de viande et ressource en eau. *Viandes & Produits carnés*: 1-8.

Dourmad, J.Y.; Ryschawy, J.; Trousson, T.; Bonneau, M.; Gonzalez, J.; Houwers, H.W.J.; Hviid, M.; Zimmer, C.; Nguyen, T.L.T.; Morgensen, L., 2014. Evaluating environmental impacts of contrasting pig farming systems with life cycle assessment. *Animal*, 8 (12): 2027-2037. http://dx.doi.org/10.1017/51751731114002134

Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016a. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Synthèse de l'expertise scientifique collective*. Paris: INRA, 136 p.

Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016b. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p.

Dumont, B.; Farruggia, A.; Garel, J.P.; Bachelard, P.; Boitier, E.; Frain, M., 2009. How does grazing intensity influence the diversity of plants and insects in a species-rich upland grassland on basalt soils? *Grass and Forage Science*, 64 (1): 92-105. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2494.2008.00674.x

Dumont, B.; Rossignol, N.; Loucougaray, G.; Carrere, P.; Chadoeuf, J.; Fleurance, G.; Bonis, A.; Farruggia, A.; Gaucherand, S.; Ginane, C.; Louault, F.; Marion, B.; Mesleard, F.; Yavercovski, N., 2012. When does grazing generate stable vegetation patterns in temperate pastures? *Agriculture Ecosystems & Environment*, 153: 50-56. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.03.003

Duret, S.; Hoang, H.M.; Derens-Bertheau, E.; Delahaye, A.; Laguerre, O.; Guillier, L., 2019. Combining Quantitative Risk Assessment of Human Health, Food Waste, and Energy Consumption: The Next Step in the Development of the Food Cold Chain? *Risk Analysis*, 39 (4): 906-925. http://dx.doi.org/10.1111/risa.13199

Eide, M.H.; Homleid, J.P.; Mattsson, B., 2003. Life cycle assessment (LCA) of cleaning-in-place processes in dairies. *Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology*, 36 (3): 303-314. http://dx.doi.org/10.1016/s0023-6438(02)00211-6

Ellen MacArthur Foundation; McKinsey Center for Business and Environment, 2015. *Growth Within: a circular economy vision for a competitive Europe*. UK: Ellen MacArthur Foundation, 97 p. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe

Engel, E.; Ratel, J.; Bouhlel, J.; Planche, C.; Meurillon, M., 2015. Novel approaches to improving the chemical safety of the meat chain towards toxicants. *Meat Science*, 109: 75-85. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.05.016

Environmental Product Declaration (EDP), 2012. *Product category rules-Meat of Mammals-Version 1.0*. Sweden, 27 p.

Eskandarpour, M.; Dejax, P.; Miemczyk, J.; Peton, O., 2015. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega-International Journal of Management Science*, 54: 11-32. http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006

FAO, 2006. *Livestock's long shadow, environmental issues and options*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 390 p. http://www.fao.org/3/a0701e/a0701e00.htm

FAO, 2013. *Food wastage footprint; Impacts on natural resources*. Rome: FAO, 61 p. http://www.fao.org/3/i3347e/i3347e.pdf

Fédération Internationale de la Laiterie (FIL), 2010. A common carbon footprint approach for dairy. *Bulletin of the International Dairy Federation*, 445: 46 p. http://www.ukidf.org/documents/bulletin445.pdf

Finnegan, W.; Yan, M.J.; Holden, N.M.; Goggins, J., 2018. A review of environmental life cycle assessment studies examining cheese production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23 (9): 1773-1787. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-017-1407-7

Flysjo, A.; Cederberg, C.; Henriksson, M.; Ledgard, S., 2011. How does co-product handling affect the carbon footprint of milk? Case study of milk production in New Zealand and Sweden. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16 (5): 420-430. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0283-9

Fonseca, C.M.; Fleming, P.J., 1993. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: FormulationDiscussion and Generalization. *Proceedings of the ICGA-93: Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 17-22 July 1993, San Mateo*, , 416-423. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.48.9077&rep=rep1&type=pdf

Fresán, U.; Errendal, S.; Craig, W.J.; Sabaté, J., 2019. Does the size matter? A comparative analysis of the environmental impact of several packaged foods. *Science of the Total Environment*, 687: 369-379. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.109

Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.J.; Bauer, C.; Doka, G.; Dones, R.; Hischier, R.; Hellweg, S.; Humbert, S.; Köllner, T.; Loerincik, Y.; Margni, M.; Nemecek, T., 2007. *Implementation of life cycle impact assessment methods. Data v2. 0*. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Ecoinvent report No. 3, 139 p. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/028/41028089.pdf?r=1&r=1

Gac, A.; Tribot-Laspière, P.; Scislowski, V.; Lapasin, C.; Ponchant, P.; Guardia, S.; Nassy, G.; Chevillon, P., 2012. *Recherche de méthodes d'évaluation de l'expression de l'empreinte carbone des produits viande*. Collection Résultats. Institut de l'Elevage, 130 p. http://idele.fr/linstitut-de-lelevage/publication/idelesolr/recommends/recherche-de-methodes-devaluation-de-lexpression-de-lempreinte-carbone-des-produits-viande.html

Garcia-Rodriguez, L.; Gomez-Camacho, C., 1999. Thermoeconomic analysis of a solar parabolic trough collector distillation plant. *Desalination*, 122 (2-3): 215-224. http://dx.doi.org/10.1016/s0011-9164(99)00051-x

Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Falcucci, A.; Tempio, G., 2013. *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: FAO, 115 p. http://www.fao.org/docrep/018/i3437e/i3437e.pdf

Ghayebloo, S.; Tarokh, M.J.; Venkatadri, U.; Diallo, C., 2015. Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: The impact of parts reliability and product greenness on the recovery network. *Journal of Manufacturing Systems*, 36: 76-86. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.011

Giri, A.; Khummueng, W.; Mercier, F.; Kondjoyan, N.; Tournayre, P.; Meurillon, M.; Ratel, J.; Engel, E., 2015. Relevance of two-dimensional gas chromatography and high resolution olfactometry for the parallel determination of heat-induced toxicants and odorants in cooked food. *Journal of Chromatography A*, 1388: 217-226. http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2015.01.045

Glover, F., 1989. Tabu search–part I. *ORSA Journal on computing*, 1 (3): 190-206. https://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/ijoc.1.3.190

Glover, F.; Kelly, J.P.; Laguna, M., 1995. Genetic algorithms and tabu search - Hybrids for optimization. *Computers & Operations Research*, 22 (1): 111-134. http://dx.doi.org/10.1016/0305-0548(93)e0023-m

Godinot, O.; Carof, M.; Vertes, F.; Leterme, P., 2014. SyNE: An improved indicator to assess nitrogen efficiency of farming systems. *Agricultural Systems*, 127: 41-52. http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.003

Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.A.J.; De Schryver, A.M.; Struijs, J.; van Zelm, R., 2013. *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08). Report I: Characterisation.*

Gomez, A.; Azzaro-Pantel, C.; Domenech, S.; Pibouleau, L.; Latge, C.; Haubensack, D.; Dumaz, P., 2010a. Exergy analysis for Generation IV nuclear plant optimization. *International Journal of Energy Research*, 34 (7): 609-625. http://dx.doi.org/10.1002/er.1575

Gomez, A.; Pibouleau, L.; Azzaro-Pantel, C.; Domenech, S.; Latge, C.; Haubensack, D., 2010b. Multiobjective genetic algorithm strategies for electricity production from generation IV nuclear technology. *Energy Conversion and Management*, 51 (4): 859-871. http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.022

Gontard, N., 2015. L'emballage Alimentaire. In: Esnouf, C.; Fioramonti, J.; Laurioux, B., eds. *L'Alimentation à Découvert*. Paris (FR): CNRS Editions, p. 90. http://dx.doi.org/10.4000/books.editionscnrs.10226

Gontard, N.; Guillard, V.; Gaucel, S.; Guillaume, C., 2017. L'emballage alimentaire et l'innovation écologique dans toutes leurs dimensions. *Innovations Agronomiques*, 58: 1-9. http://dx.doi.org/10.15454/1.5137830815050605E12

Gonzalez-Garcia, S.; Castanheira, E.G.; Dias, A.C.; Arroja, L., 2013a. Environmental life cycle assessment of a dairy product: the yoghurt. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (4): 796-811. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0522-8

Gonzalez-Garcia, S.; Castanheira, E.G.; Dias, A.C.; Arroja, L., 2013b. Using Life Cycle Assessment methodology to assess UHT milk production in Portugal. *Science of the Total Environment*, 442: 225-234. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.035

Govindan, K.; Jafarian, A.; Khodaverdi, R.; Devika, K., 2014a. Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152: 9-28. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028

Govindan, K.; Sarkis, J.; Jabbour, C.J.C.; Zhu, Q.H.; Geng, Y., 2014b. Eco-efficiency based green supply chain management: Current status and opportunities. *European Journal of Operational Research*, 233 (2): 293-298. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.058

Guillard, V.; Gaucel, S.; Fornaciari, C.; Angellier-Coussy, H.; Buche, P.; Gontard, N., 2018. The Next Generation of Sustainable Food Packaging to Preserve Our Environment in a Circular Economy Context. *Frontiers in Nutrition*, 5: 13. http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2018.00121

Guillier, L.; Duret, S.; Hoang, H.M.; Flick, D.; Nguyen-Thé, C.; Laguerre, O., 2016. Linking food waste prevention, energy consumption and microbial food safety: the next challenge of food policy? *Current Opinion in Food Science*, 12: 30-35. http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2016.06.006

Guinard, C.; Verones, F.; Loerincik, Y.; Jolliet, O., 2009. Environmental/ecological impact of the dairy sector: literature review on dairy products for an inventory of key issues, list of environmental initiative and influences on the dairy sector. *Bulletin of the International Dairy Federation, report*, 436: 90 p.

Guitouni, A.; Bélanger, M.; Martel, J.M., 2010. *Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères*. Canada: Defence R&D pour la défence Canada – Valcartier, 90 p. http://docplayer.fr/57461465-Cadre-methodologique-pour-differencier-les-methodes-multicriteres.html

Hammami, A., 2003. *Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Laval, 395 p.

Hanoun, S.; Nahavandi, S.; Kull, H., 2011. Pareto Archived Simulated Annealing for Single Machine Job Shop Scheduling with Multiple Objectives. In: Paleologu, C.; Mavromoustakis, C.; Minea, M., eds. *Sixth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology*. (International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology), 99-104.

Heijungs, R.; Guinée, J.B.; Huppes, G.; Lankreijer, R.M.; Udo de Haes, H.A.; Wegener Sleeswijk, A.; Ansems, A.M.M.; Eggels, P.G.; van Duin, R.; De Goede, H.P., 1992. *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds* Leiden: Center of Environmental Science (CML), NOH report 9266 and 9267, 130 p. https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/8061 ; https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/8062

Hilaly, A.K.; Sikdar, S.K., 1994. Pollution balance: a new methodology for minimizing waste production in manufacturing processes. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 44 (11): 1303-1308. http://dx.doi.org/10.1080/10473289.1994.10467325

Hoekstra, A.Y., 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68 (7): 1963-1974. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.021

Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K., 2007. Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21 (1): 35-48. http://dx.doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x

Hwang, C.L.; Yoon, K., 1981. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. Berlin Heidelberg: Springer.

Inghels, D.; Dullaert, W.; Bloemhof, J., 2016. A model for improving sustainable green waste recovery. *Resources Conservation and Recycling*, 110: 61-73. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.013

ISO, 2014. ISO 14046 - Management environnemental -Empreinte eau - Principes, exigences et lignes directrices.

Jalao, E.R.; Wu, T.; Shunk, D., 2014. A stochastic AHP decision making methodology for imprecise preferences. *Information Sciences*, 270: 192-203. http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.077

Jan, P.; Dux, D.; Lips, M.; Alig, M.; Dumondel, M., 2012. On the link between economic and environmental performance of Swiss dairy farms of the alpine area. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 (6): 706-719. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-012-0405-z

Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (6): 324-330. http://dx.doi.org/10.1007/bf02978505

Kannegiesser, M.; Gunther, H.O.; Autenrieb, N., 2015. The time-to-sustainability optimization strategy for sustainable supply network design. *Journal of Cleaner Production*, 108: 451-463. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.030

Keeney, R.; Raiffa, H., 1976. *Decision with Multiobjectives, Preferences and Value Trade-Offs*. Wiley, New York, 593 p.

Kim, D.; Thoma, G.; Nutter, D.; Milani, F.; Ulrich, R.; Norris, G., 2013. Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18 (5): 1019-1035. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0553-9

Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220 (4598): 671-680. http://dx.doi.org/10.1126/science.220.4598.671

Klumpp, K.; Tallec, T.; Guix, N.; Soussana, J.F., 2011. Long-term impacts of agricultural practices and climatic variability on carbon storage in a permanent pasture. *Global Change Biology*, 17 (12): 3534-3545. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02490.x

Koch, P.; Salou, T., 2014. *AGRIBALYSE : Rapport méthodologique - version 1.1*. Angers: ADEME (Ed.), 386 p. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/agribalyse-methodologie-v1_1-201403.pdf

Kondjoyan, A.; Chevolleau, S.; Greve, E.; Gatellier, P.; Sante-Lhoutellier, V.; Bruel, S.; Touzet, C.; Portanguen, S.; Debrauwer, L., 2010a. Formation of heterocyclic amines in slices of Longissimus thoracis beef muscle subjected to jets of superheated steam. *Food Chemistry*, 119 (1): 19-26. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.081

Kondjoyan, A.; Chevolleau, S.; Greve, E.; Gatellier, P.; Sante-Lhoutellier, V.; Bruel, S.; Touzet, C.; Portanguen, S.; Debrauwer, L., 2010b. Modelling the formation of heterocyclic amines in slices of longissimus thoracis and semimembranosus beef muscles subjected to jets of hot air. *Food Chemistry*, 123 (3): 659-668. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.028

Kondjoyan, A.; Chevolleau, S.; Portanguen, S.; Molina, J.; Ikonic, P.; Clerjon, S.; Debrauwer, L., 2016. Relation between crust development and heterocyclic aromatic amine formation when air-roasting a meat cylinder. *Food Chemistry*, 213: 641-646. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.118

Kondjoyan, A.; Daudin, J.D.; Sante-Lhoutellier, V., 2015. Modelling of pepsin digestibility of myofibrillar proteins and of variations due to heating. *Food Chemistry*, 172: 265-271. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.110

Krotscheck, C.; Narodoslawsky, M., 1996. The sustainable process index - A new dimension in ecological evaluation. *Ecological Engineering*, 6 (4): 241-258. http://dx.doi.org/10.1016/0925-8574(95)00060-7

Laguerre, O.; Hoang, H.M.; Flick, D., 2013. Experimental investigation and modelling in the food cold chain: Thermal and quality evolution. *Trends in Food Science & Technology*, 29 (2): 87-97. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.001

Leardi, R.; Boggia, R.; Terrile, M., 1992. Genetic algorithms as a strategy for feature-selection. *Journal of Chemometrics*, 6 (5): 267-281. http://dx.doi.org/10.1002/cem.1180060506

Lecoq, L.; Derens, E.; Flick, D.; Laguerre, O., 2017. Influence of air dehumidification on water evaporation in a food plant. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 74: 435-449. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.10.022

Leinonen, I.; Kyriazakis, I., 2016. How can we improve the environmental sustainability of poultry production? *Proceedings of the Nutrition Society*, 75 (3): 265-273. http://dx.doi.org/10.1017/s0029665116000094

Leinonen, I.; Williams, A.G.; Wiseman, J.; Guy, J.; Kyriazakis, I., 2012. Predicting the environmental impacts of chicken systems in the United Kingdom through a life cycle assessment: Broiler production systems. *Poultry Science*, 91 (1): 8-25. http://dx.doi.org/10.3382/ps.2011-01634

Liang, L.Y.; Chao, W.C., 2008. The strategies of tabu search technique for facility layout optimization. *Automation in Construction*, 17 (6): 657-669. http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.01.001

Litt, J.; Coutelet, G.; Arroyo, J.; Bignon, L.; Laborde, M.; Theau-Clement, M.; Brachet, M.; Guy, G.; Drouilhet, L.; Dubois, J.P.; Grossiord, B.; Herault, F.; Fortun-Lamothe, L., 2014. Évaluation de la durabilité et innovations pour des ateliers CUNIcoles et PALMipèdes gras plus durables : projet CUNIPALM. *Innovations Agronomiques*, 34: 241-258. https://www6.inra.fr/ciag/content/download/5252/40978/file/Vol34-16-Litt.pdf

Liu, C.G.; Yang, J.; Lian, J.; Li, W.J.; Evans, S.; Yin, Y., 2014a. Sustainable performance oriented operational decision-making of single machine systems with deterministic product arrival time. *Journal of Cleaner Production*, 85: 318-330. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.025

Liu, Y.; Dong, H.B.; Lohse, N.; Petrovic, S.; Gindy, N., 2014b. An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65: 87-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.060

MacLeod, M.; Gerber, P.J.; Mottet, A.; Tempio, G.; Falcucci, A.; Opio, C.; Vellinga, T.; Henderson, B.; Steinfeld, H., 2013. *Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains–A global life cycle assessment*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 196 p. http://www.fao.org/3/i3460e/i3460e.pdf

Madoumier, M., 2016. *Modélisation et développement d'outils pour l'écoconception d'un procédé de concentration en industrie laitière : cas de l'évaporation du lait*. Agrocampus Ouest, Rennes.

Mansouri, S.A.; Aktas, E.; Besikci, U., 2016. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption. *European Journal of Operational Research*, 248 (3): 772-788. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.064

Maroulis, Z.B.; Saravacos, G.D., 2003. *Food process design*. Boca Raton: CRC Press, 536 p.

Maroulis, Z.B.; Saravacos, G.D., 2007. *Food plant economics*. Boca Raton: CRC Press, 376 p.

Masset, G.; Vlassopoulos, A.; Lehmann, U., 2016. Nutrient profiling for the reformulation of pizza: Modelled impact on nutritional intake in the US adult population. *Faseb Journal*, 30: 2.

Massoulier, F.; Rispal, O.; Huffschmidt, D., 2011. Production et consommation d'énergie frigorifique dans la filière viande. *Viandes & Produits carnés*: 1-8.

McAuliffe, G.A.; Takahashi, T.; Lee, M.R.F., 2018. Framework for life cycle assessment of livestock production systems to account for the nutritional quality of final products. *Food and Energy Security*, 7 (3). http://dx.doi.org/10.1002/fes3.143

Mekonnen, M.M.; Hoekstra, A.Y., 2012. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, 15 (3): 401-415. http://dx.doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8

Meurillon, M.; Engel, E., 2019. Les composés néoformés toxiques et leur remédiation : Focus sur les produits carnés. *Innovations Agronomiques*, 73: 27-41. http://dx.doi.org/10.15454/yuicun

Meurillon, M.; Ratel, J.; Engel, E., 2018. How to secure the meat chain against toxicants? *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 46: 74-82. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.10.004

Miret, C.; Chazara, P.; Montastruc, L.; Negny, S.; Domenech, S., 2016. Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria. *Computers & Chemical Engineering*, 85: 16-35. http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.008

Morales Mendoza, L.F., 2013. *Écoconception de procédés: approche systémique couplant modélisation globale, analyse du cycle de vie et optimisation multiobjectif*. Institut National Polytechnique de Toulouse - Génie des procédes et environnement, Toulouse. 193 p. http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002559/

Mouzon, G.; Yildirim, M.B.; Twomey, J., 2007. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*, 45 (18-19): 4247-4271. http://dx.doi.org/10.1080/00207540701450013

Mudge, P.L.; Wallace, D.F.; Rutledge, S.; Campbell, D.I.; Schipper, L.A.; Hosking, C.L., 2011. Carbon balance of an intensively grazed temperate pasture in two climatically contrasting years. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 144 (1): 271-280. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.09.003

Nguyen, T.T.H.; Doreau, M.; Corson, M.S.; Eugene, M.; Delaby, L.; Chesneau, G.; Gallard, Y.; van der Werf, H.M.G., 2013. Effect of dairy production system, breed and co-product handling methods on environmental impacts at farm level. *Journal of Environmental Management*, 120: 127-137. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.028

Nielsen, P.H.; Hoier, E., 2009. Environmental assessment of yield improvements obtained by the use of the enzyme phospholipase in mozzarella cheese production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14 (2): 137-143. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-008-0048-2

Nilsson, K.; Flysjo, A.; Davis, J.; Sim, S.; Unger, N.; Bell, S., 2010. Comparative life cycle assessment of margarine and butter consumed in the UK, Germany and France. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15 (9): 916-926. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-010-0220-3

Norris, C.B., 2014. Data for social LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19 (2): 261-265. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-013-0644-7

Norris, G.A., 2001. Integrating life cycle cost analysis and LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (2): 118-120.

Opio, C.; Gerber, P.; Mottet, A.; Falcucci, A.; Tempio, G.; MacLeod, M.; Vellinga, T.; Henderson, B.; Steinfeld, H., 2013. *Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains–a global life cycle assessment*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 214 p. http://www.fao.org/3/i3461e/i3461e.pdf

Organisation internationale de normalisation, 2006. *ISO 14040:2006: Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre.*, 23 p. https://www.iso.org/fr/standard/37456.html

Ouattara, A., 2011. *Méthodologie d'éco-conception de procédés par optimisation multiobjectif et aide à la décision multicritère*. INPT.

Pan, A.; Sun, Q.; Bernstein, A.M.; Schulze, M.B.; Manson, J.E.; Stampfer, M.J.; Willett, W.C.; Hu, F.B., 2012. Red Meat Consumption and Mortality Results From 2 Prospective Cohort Studies. *Archives of Internal Medicine*, 172 (7): 555-563. http://dx.doi.org/10.1001/archinternmed.2011.2287

Paolotti, L.; Boggia, A.; Castellini, C.; Rocchi, L.; Rosati, A., 2016. Combining livestock and tree crops to improve sustainability in agriculture: a case study using the Life Cycle Assessment (LCA) approach. *Journal of Cleaner Production*, 131: 351-363. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.024

PAS 2050, 2008. *Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services*. London: British Standards Organisation. https://aggie-horticulture.tamu.edu/faculty/hall/publications/PAS2050_Guide.pdf

Pelzer, E.; Fortino, G.; Bockstaller, C.; Angevin, F.; Lamine, C.; Moonen, C.; Vasileiadis, V.; Guerin, D.; Guichard, L.; Reau, R.; Messean, A., 2012. Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators*, 18: 171-182. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.11.019

Persson, M.; Fagt, S.; Pires, S.M.; Poulsen, M.; Vieux, F.; Nauta, M.J., 2018. Use of Mathematical Optimization Models to Derive Healthy and Safe Fish Intake. *Journal of Nutrition*, 148 (2): 275-284. http://dx.doi.org/10.1093/jn/nxx010

Peyraud, J.L., 2016. L'élevage contribue à la production durable de protéines. *Viandes & Produits carnés*: 1-10.

Planche, C.; Ratel, J.; Blinet, P.; Mercier, F.; Angenieux, M.; Chafey, C.; Zinck, J.; Marchond, N.; Chevolleau, S.; Marchand, P.; Dervilly-Pinel, G.; Guerin, T.; Debrauwer, L.; Engel, E., 2017. Effects of pan cooking on micropollutants in meat. *Food Chemistry*, 232: 395-404. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.049

Potter, N.N.; Hotchkiss, J.H., 1995. *Food science (5th ed.)*. Springer Science & Business Media, 608 p.

Pradere, J., 2014. Liens élevage-environnement-développement durable. *Revue scientifique et technique de L'Office International des Epizooties*, 33 (3): 745-763.

Raffray, G., 2014. *Outils d'aide à la décision pour la conception de procédés agroalimentaires au Sud: application au procédé combiné de séchage, cuisson et fumage de produits carnés*. Montpellier, SupAgro, Montpellier. 146 p. https://www.theses.fr/2014NSAM0066

Raffray, G.; Collignan, A.; Sebastian, P., 2015a. Multiobjective optimization of the preliminary design of an innovative hot-smoking process. *Journal of Food Engineering*, 158: 94-103. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.010

Raffray, G.; Sebastian, P.; Collignan, A., 2015b. Simulation model for the optimization of a radiant plate hot-smoking process. *Journal of Food Engineering*, 147: 56-67. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.025

Ramanathan, R., 1997. Stochastic decision making using multiplicative AHP. *European Journal of Operational Research*, 97 (3): 543-549. http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00285-8

Ramudhin, A.; Chaabane, A.; Paquet, M., 2010. Carbon market sensitive sustainable supply chain network design. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 5 (1): 30-38. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17509653.2010.10671088

Rebitzer, G.; Seuring, S., 2003. Methodology and application of life cycle costing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (2): 110-111. http://dx.doi.org/10.1007/bf02978436

Ren, L.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Sun, Z., 2007. Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and TOPSIS. *Applied Mathematics Research eXpress*, 2007: 1-10.

Ridoutt, B.G.; Sanguansri, P.; Freer, M.; Harper, G.S., 2012. Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 (2): 165-175. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0346-y

Rincón, L.E.; Moncada, J.; Cardona, C.A., 2014. Analysis of potential technological schemes for the development of oil palm industry in Colombia: A biorefinery point of view. *Industrial Crops and Products*, 52: 457-465. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.004

Rocchi, L.; Paolotti, L.; Rosati, A.; Boggia, A.; Castellini, C., 2019. Assessing the sustainability of different poultry production systems: A multicriteria approach. *Journal of Cleaner Production*, 211 (O, 2006, 14044: Environmental Management- Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines): 103-114. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.013

Roy, B., 1996. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding, Volume 12 of Nonconvex Optimization and Its Applications*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Roy, B.; Bouyssou, D., 1985. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica, 423 p.

Roy, P.; Nei, D.; Orikasa, T.; Xu, Q.Y.; Okadome, H.; Nakamura, N.; Shiina, T., 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 90 (1): 1-10. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016

Saarinen, M.; Fogelholm, M.; Tahvonen, R.; Kurppa, S., 2017. Taking nutrition into account within the life cycle assessment of food products. *Journal of Cleaner Production*, 149: 828-844. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.062

Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.

Sadok, W.; Angevin, F.; Bergez, J.E.; Bockstaller, C.; Colomb, B.; Guichard, L.; Reau, R.; Messean, A.; Dore, T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 29 (3): 447-461. http://dx.doi.org/10.1051/agro/2009006

Saint-Eve, A.; Maurice, B.; Delarue, J.; Soler, L.G.; Souchon, I., 2018. Déterminants sensoriels à l'origine des perceptions saine, durable et naturelle d'un produit ultra transforme : les pizzas. *Journées Francophones de Nutrition, 28-30 novembre 2018*. Nice, France.

Schaffer, J.D., 1984. *Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms*. Vanderbilt University, Electrical Engineering, Nashville.

Schmidt, J.H., 2008. Development of LCIA characterisation factors for land use impacts on biodiversity. *Journal of Cleaner Production*, 16 (18): 1929-1942. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.004

Schueler, M.; Paulsen, H.M.; Berg, W.; Prochnow, A., 2018. Accounting for inter-annual variability of farm activity data for calculation of greenhouse gas emissions in dairy farming. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23 (1): 41-54. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-017-1307-x

Schulze, E.D.; Luyssaert, S.; Ciais, P.; Freibauer, A.; Janssens, I.A.; Soussana, J.F.; Smith, P.; Grace, J.; Levin, I.; Thiruchittampalam, B.; Heimann, M.; Dolman, A.J.; Valentini, R.; Bousquet, P.; Peylin, P.; Peters, W.; Rodenbeck, C.; Etiope, G.; Vuichard, N.; Wattenbach, M.; Nabuurs, G.J.; Poussi, Z.; Nieschulze, J.; Gash, J.H.; CarboEurope, T., 2009. Importance of methane and nitrous oxide for Europe's terrestrial greenhouse-gas balance. *Nature Geoscience*, 2 (12): 842-850. http://dx.doi.org/10.1038/ngeo686

Scislowski, V., 2015. Intérêt de l'unité fonctionnelle nutritionnelle (UFN). *Viandes & Produits carnés*: 1.

Sciubba, E.; Ulgiati, S., 2005. Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options? *Energy*, 30 (10): 1953-1988. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.003

Scohier, A.; Ouin, A.; Farruggia, A.; Dumont, B., 2013. Is there a benefit of excluding sheep from pastures at flowering peak on flower-visiting insect diversity? *Journal of Insect Conservation*, 17 (2): 287-294. http://dx.doi.org/10.1007/s10841-012-9509-9

Sebastian, P.; Quirante, T.; Tiat, V.H.K.; Ledoux, Y., 2010. Multi-objective optimization of the design of two-stage flash evaporators: Part 2. Multi-objective optimization. *International Journal of Thermal Sciences*, 49 (12): 2459-2466. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.07.002

Seuring, S., 2013. A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54 (4): 1513-1520. http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053

Shukla, M.; Jharkharia, S., 2013. Agri-fresh produce supply chain management: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Operations & Production Management*, 33 (1-2): 114-158. http://dx.doi.org/10.1108/01443571311295608

Siinivas, N.; Deb, K., 1994. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 2 (3): 221-248.

Sobantka, A.P.; Zessner, M.; Rechberger, H., 2012. The Extension of Statistical Entropy Analysis to Chemical Compounds. *Entropy*, 14 (12): 2413-2426. http://dx.doi.org/10.3390/e14122413

Sonesson, U.; Davis, J.; Flysjo, A.; Gustavsson, J.; Witthöft, C., 2017. Protein quality as functional unit – A methodological framework for inclusion in life cycle assessment of food. *Journal of Cleaner Production*, 140: 470-478. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.115

Sonesson, U.; Davis, J.; Hallström, E.; Woodhouse, A., 2019. Dietary-dependent nutrient quality indexes as a complementary functional unit in LCA: A feasible option? *Journal of Cleaner Production*, 211: 620-627. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.171

Sorguven, E.; Ozilgen, M., 2012. Energy utilization, carbon dioxide emission, and exergy loss in flavored yogurt production process. *Energy*, 40 (1): 214-225. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.003

Soussana, J.F.; Luscher, A., 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. *Grass and Forage Science*, 62 (2): 127-134. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00577.x

Soussana, J.F.; Tallec, T.; Blanfort, V., 2010. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4 (3): 334-350. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731109990784

Soysal, M.; Bloemhof-Ruwaard, J.M.; Meuwissen, M.P.M.; van der Vorst, J.G.A.J., 2012. A review on quantitative models for sustainable food logistics management. *International Journal on Food System Dynamics*, 3 (2): 136-155.

Soysal, M.; Bloemhof-Ruwaard, J.M.; van der Vorst, J., 2014. Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, 152: 57-70. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.012

Steffens, M.A.; Fraga, E.S.; Bogle, I.D.L., 1999. Multicriteria process synthesis for generating sustainable and economic bioprocesses. *Computers & Chemical Engineering*, 23 (10): 1455-1467. http://dx.doi.org/10.1016/s0098-1354(99)00304-x

Stylianou, K.S.; Heller, M.C.; Fulgoni, V.L.; Ernstoff, A.S.; Keoleian, G.A.; Jolliet, O., 2016. A life cycle assessment framework combining nutritional and environmental health impacts of diet: a case study on milk. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (5): 734-746. http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-0961-0

Tang, C.S.; Zhou, S., 2012. Research advances in environmentally and socially sustainable operations. *European Journal of Operational Research*, 223 (3): 585-594. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.030

Thoma, G.; Popp, J.; Nutter, D.; Shonnard, D.; Ulrich, R.; Matlock, M.; Kim, D.S.; Neiderman, Z.; Kemper, N.; East, C.; Adom, F., 2013. Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. *International Dairy Journal*, 31: S3-S14. http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2012.08.013

Timmerman, E., 1986. An approach to Vendor Performance Evaluation. *Journal of Purchasing and Materials Management*, 22: 2-8.

Trautmann, H.; Mehnen, J., 2005. *A method for including a-priori preferences in multicriteria optimization*: Technical Report/Universität Dortmund, SFB 475 Komplexitätsreduktion in Multivariaten Datenstrukturen. Dortmund University. https://www.econstor.eu/handle/10419/22642

Tuomisto, H.L.; de Mattos, M.J.T., 2011. Environmental Impacts of Cultured Meat Production. *Environmental Science & Technology*, 45 (14): 6117-6123. http://dx.doi.org/10.1021/es200130u

Turton, R.; Bailie, R.C.; Whiting, W.B.; Shaeiwitz, J.A., 2008. *Analysis, synthesis and design of chemical processes*. Upper Saddle River, United States: Pearson Education, 1088 p.

Ulungu, E.L.; Teghem, J.F.P.H.; Fortemps, P.H.; Tuyttens, D., 1999. MOSA method: a tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8 (4): 221-236.

Validi, S.; Bhattacharya, A.; Byrne, P.J., 2014. A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system-A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics*, 152: 71-87. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.003

van der Vorst, J.G.A.J.; Tromp, S.O.; van der Zee, D.J., 2009. Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, 47 (23): 6611-6631. http://dx.doi.org/10.1080/00207540802356747

Varadharajan, T.K.; Rajendran, C., 2005. A multi-objective simulated-annealing algorithm for scheduling in flowshops to minimize the makespan and total flowtime of jobs. *European Journal of Operational Research*, 167 (3): 772-795. http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.020

Wang, F.; Lai, X.F.; Shi, N., 2011. A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51 (2): 262-269. http://dx.doi.org/10.1016/j.dss.2010.11.020

Weidema, B.P.; Wesnæs, M.; Hermansen, J.n.; Kristensen, T.; Halberg, N.; Eder, P.; Delgado, L., 2008. *Environmental improvement potentials of meat and dairy products*: Insitutte for Prospective Technological Studies (IPTS), JRC Scientific and technical reports, 217 p.

Wilkinson, J.M.; Lee, M.R.F., 2018. Review: Use of human-edible animal feeds by ruminant livestock. *Animal*, 12 (8): 1735-1743. http://dx.doi.org/10.1017/s175173111700218x

Yildirim, M.B.; Mouzon, G., 2012. Single-Machine Sustainable Production Planning to Minimize Total Energy Consumption and Total Completion Time Using a Multiple Objective Genetic Algorithm. *Ieee Transactions on Engineering Management*, 59 (4): 585-597. http://dx.doi.org/10.1109/tem.2011.2171055

Yoon, K.P.; Kim, W.K., 2017. The behavioral TOPSIS. *Expert Systems with Applications*, 89: 266-272. http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2017.07.045

You, F.Q.; Tao, L.; Graziano, D.J.; Snyder, S.W., 2012. Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *Aiche Journal*, 58 (4): 1157-1180. http://dx.doi.org/10.1002/aic.12637

Young, D.M.; Cabezas, H., 1999. Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm. *Computers & Chemical Engineering*, 23 (10): 1477-1491. http://dx.doi.org/10.1016/s0098-1354(99)00306-3

Zabel, F.; Putzenlechner, B.; Mauser, W., 2014. Global Agricultural Land Resources - A High Resolution Suitability Evaluation and Its Perspectives until 2100 under Climate Change Conditions. *Plos One*, 9 (9): 12. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0107522

Zhang, L.X.; Song, B.; Chen, B., 2012. Emergy-based analysis of four farming systems: insight into agricultural diversification in rural China. *Journal of Cleaner Production*, 28: 33-44. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.042

Zhou, P.; Ang, B.; Poh, K., 2006. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. *Energy*, 31 (14): 2604-2622. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.023

Ziolkowska, J.R., 2014. Optimizing biofuels production in an uncertain decision environment: Conventional vs. advanced technologies. *Applied Energy*, 114: 366-376. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.060

Zisopoulos, F.K.; Moejes, S.N.; Rossier-Miranda, F.J.; van der Goot, A.J.; Boom, R.M., 2015. Exergetic comparison of food waste valorization in industrial bread production. *Energy*, 82: 640-649. http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.073

Zucali, M.; Tamburini, A.; Sandrucci, A.; Bava, L., 2017. Global warming and mitigation potential of milk and meat production in Lombardy (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 153 (1): 474-482. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.037

Chapitre 5 - La consommation : segmentations sociales et des marchés, déterminants socio-économiques, régulations juridiques

Auteurs : Estelle Fourat et Pierre Sans (coordination),Camille Adamiec, Pierre-Etienne Bouillot

Sommaire

Chapitre 5 - La consommation : segmentations sociales et des marchés, déterminants socio-économiques, régulations juridiques 875

5.1. Les qualités principalement identifiées par la législation alimentaire européenne 876

5.1.1. La qualité sanitaire 877

5.1.2. La qualité marchande : les produits animaux soumis au principe de libre circulation des marchandises 878

5.1.3. La prévention des risques : quel équilibre entre la qualité sanitaire et marchande ? 879

5.1.4. L'information du consommateur 883

5.1.5. La qualité des produits animaux et droit du commerce international 887

5.1.6. Conclusion 888

5.2. Déterminants des choix des consommateurs 888

5.2.1. Approche par la théorie économique 888

5.2.2. Révéler les préférences des acheteurs 890

5.2.3. Application à quelques attributs des produits d'origine animale 890

5.2.4. Perception des risques et bénéfices liés aux aliments 893

5.2.5. Gestion du risque par le consommateur 894

5.3. Conclusions 896

Références bibliographiques 897

La présentation des déterminants culturels, sociaux et économiques à la consommation des produits animaux a été amplement traitée dans le chapitre 5 de l'ESCo précédent sous l'angle du rapport à l'animal, des questions éthiques et des enjeux environnementaux (Lepiller *et al.*, 2016). Cette analyse était issue d'une revue détaillée qui reste toujours valable et quasi exhaustive, pour conclure sur une tendance à la « désanimalisation » des aliments consommés, même d'origine animale.

Ce chapitre de cette expertise collective propose une synthèse critique des derniers apports des sciences juridiques, économiques et sociales, à la question de la qualité des produits animaux. Il s'agit de mieux comprendre le rapport des consommateurs aux produits animaux eu égard à la qualité de ces derniers et la manière dont elle est traitée par le législateur. Sur quels critères est définie la qualité d'un produit animal ? Selon quelles modalités de pensée et d'action s'effectuent les choix des consommateurs ? Ces critères varient-ils et, si oui, selon quels déterminants et quelles variables (âge, milieu social, contexte de consommation, etc.) (Kaur et Singh, 2017) ? Après lecture des publications les plus récentes en sciences humaines et sociales, nous avons décidé de traiter de ces questions en termes de perception et de gestion du risque vues par les consommateurs et le législateur (Beck, 2001 ; Peretti-Watel, 2010).

Les différentes crises sanitaires de la fin du XXème siècle ont amené à ce que l'analyse des risques sanitaires devienne un des principes généraux de la législation alimentaire européenne et du rapport à l'alimentation. Le rôle du législateur est à la fois de garantir la qualité sanitaire - en faisant appliquer des règles d'hygiène spécifiques aux produits animaux, de dénominaation de produits et d'informations délivrées – et de satisfaire des intérêts économiques en rendant possible leur libre circulation.

Pour les sciences humaines et sociales, s'intéresser au risque, c'est pointer les décalages entre les modalités d'évaluation scientifiques et profanes des risques. Tandis que le législateur raisonne en termes de règles encadrant la gestion des risques (règles commerciales, d'hygiène, de dénomination et d'information sur les produits), la perception des risques et de ces règles par le profane est plus complexe et soumise à l'influence de facteurs sociaux et culturels. Pour les consommateurs, le risque ne présente pas seulement des aspects négatifs : il peut procurer un divertissement ou une intensification de l'existence, il peut être source de prestige et de légitimité. Ainsi, si l'analyse scientifique du risque se concentre sur la mesure des conséquences négatives d'une action, la pensée dite profane (*lay knowledge*) évalue les avantages éventuels et les risques dans un calcul coût - bénéfice. Le risque ne peut se penser en dehors de ce double mouvement bénéfices / risques. Ces différences à la fois épistémologiques et méthodologiques de la définition du risque rendent parfois le dialogue difficile entre les spécialistes de la qualité et les consommateurs, les premiers ayant l'impression que les seconds sont irrationnels et refusent le progrès. Dans une telle situation, les experts sont tentés soit de se réfugier dans des arguments d'autorité , soit de vouloir éduquer la population à la vérité scientifique. Pour sortir de cette impasse, il faut prendre en compte les conflits stratégiques qui se nouent autour du risque et accepter de voir dans ces décalages un affrontement de rationalités et d'intérêts. Cette circularité des savoirs est centrale dans l'appréhension de l'alimentation. La création et l'acception de nouveaux produits est le résultat de pratiques, de connaissances et de représentations à la fois expertes et profanes sur l'alimentation, la santé et la nature (voir chapitre 6). Ainsi, les « cultures du risque » prennent en compte d'une part la diversité interindividuelle du rapport au risque et d'autre part les manières de tirer parti de ce dernier (Hintermeyer, 2007). L'approche par la culture du risque permet de questionner les enjeux à la fois spatiaux, moraux, et sanitaires et de mettre en lumière les stratégies de résistance et différenciation que génère, collectivement ou individuellement, la qualité des produits animaux. Elle amène à s'interroger sur la façon dont les consommateurs réalisent leurs arbitrages pour l'achat puis l'ingestion des aliments.

Une première partie sera consacrée à l'identification des critères d'appréciation de la qualité des produits animaux par le législateur et des litiges révélant les nouvelles lignes de pouvoir et de contrôle, tandis qu'une deuxième partie abordera la question du point de vue des consommateurs pour comprendre l'arbitrage et la complexité de leurs choix face à une offre alimentaire de plus en plus diversifiée et industrialisée.

5.1. Les qualités principalement identifiées par la législation alimentaire européenne

Le règlement (CE) n°178/2002 explicite dès son premier considérant les qualités des denrées alimentaires qu'il régit (Commission européenne, 2002) :

« *La libre circulation de denrées alimentaires sûres et saines constitue un aspect essentiel du marché intérieur et contribue de façon notable à la santé et au bien-être des citoyens, ainsi qu'à leurs intérêts économiques et sociaux* ».

Qu'il soit d'origine animale ou non, l'aliment doit présenter des qualités sanitaires (*sûr et sain*) et marchandes (*libre circulation*).

Regard sur la bibliographie : Chapitre 5

Pour constituer cette revue de littérature critique, nous avons consulté la base de données en ligne : Web of Science ; Francis ; ScienceDirect ; CAIRN ; Revue.org ; et Google Scholar en appoint.

Nous avons également interrogé les bases d'archives de revues spécialisées dans le champ de l'alimentation et de la consommation, et des revues de sciences humaines et sociales susceptibles d'aborder ces thèmes : Appetite ; Food, Culture & society ; Food & Foodways ; International Journal of Sociology of Food and Agriculture ; Sociologia Ruralis ; Anthropology of food ; Food Policy ; Meat Science ; British food journal ; Ethnozootechnie ; Etudes Rurales ; Revue d'études en agriculture et environnement ; Cahiers de nutrition et de diététique ; Anthropozoologica ; publications du CREDOC ; Ecological Economics ; Social Science & Medicine ; Terrain ; L'Homme ; Sociétés ; Revue française de sociologie ; Ethnologie française ; Journal des anthropologues.

Les publications sous forme d'ouvrages ont également été prises en compte (dans la mesure où nous pouvions y accéder concrètement, ce qui n'était pas le cas de tous les ouvrages en anglais).

Les mots-clés utilisés étaient les suivants : « cruauté » « conditions d'abattage » ; « cruelty » « slaughter » ; « vert »; « green » ; « consommation éthique » ; « production éthique » ; « ethic consumption » ; ethic production » ; « AMAP » ; « engagé » ; « committed » ; « partagé » ; « shared consumption » ; « nature » ; « naturel » ; « healthy » ; « organic food » ; « natural » ; « label » ; « Food label » ; « marché » ; « market place » ; « boucherie » ; « butcher shop » ; « ferme » ; « farm house » ; « sans antibiotiques » ; « antibiotic free » ; « avec OGM » ; « sans OGM » ; « GMO » ; « GMO free » ; « origine contrôlée » ; « controlled origin food » ; « étiquettage » ; « labelling » ; « chair animale » ; « animal flesh » ; « végétarisme » ; « vegetarianism » ; « véganisme » ; « veganism » ; « flexitarisme » ; « flexitarism » ; « spiruline » ; « B12 » ; « élevage en batterie » ; « livestock battery » ; « viande bio » ; « organic meat » ; « lait végétal » ; « plant-based milk » ; « protéines de soja » ; « protéines végétales » ; « protéines animales » ; « soy proteins » ; « vegetal proteins » ; « plant based proteins » ; « substituts de viande » ; « meat substitutes » ; « viande de culture » ; « cultured meat » ; « consommation insectes » ; « insect consumption »

Nous avons limité les interrogations systématiques des bases aux quinze dernières années.

A noter que cette revue n'a pris en compte que la littérature francophone et anglophone, ce qui n'a donc pas permis d'analyser la production dans les langues nationales hormis pour la France et le Royaume-Uni. C'est une limite notable, car la production en langue nationale demeure importante dans le domaine des sciences humaines et sociales, même si cela dépend des pays. On peut estimer que cette limite a pu empêcher de prendre connaissance d'un certain nombre de compte-rendu d'études qualitatives et compréhensives notamment.

L'essentiel des références bibliographiques (124/178 = 70%) est constitué d'articles scientifiques. 11% sont des textes réglementaires (essentiellement volet juridique du chapitre 5)

72% des références sont postérieures à 2010.

Le champ géographique couvert est majoritairement européen et fait une large place aux auteurs dont les travaux portent sur la compréhension des comportements des consommateurs de produits animaux (surtout produits carnés) : Verbeke, Gruner, Combris. La part des articles appartenant à INRAE est faible (10 sur 124 articles).

Les principales revues sont Appetite (12 articles) et Meat Science (10 articles)

L'auto-citation est faible (7 articles sur 124 soit 5,6%).

5.1.1. La qualité sanitaire

Toutes les denrées alimentaires mises sur le marché européen doivent être conformes aux exigences posées par le règlement (CE) n°852/2004 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires (Commission européenne, 2004a), l'un des principaux textes

de la législation alimentaire européenne. Celui-ci fixe les principes que les exploitants du secteur alimentaire[1] doivent respecter. Ils doivent en particulier mettre en place un plan de maîtrise sanitaire qui se fonde sur le respect de plusieurs obligations (autocontrôles basés sur le respect des bonnes pratiques d'hygiène applicables aux locaux, matériel, personnel, denrées alimentaires et au fonctionnement de l'exploitation). Cette obligation doit également s'appuyer la méthode HACCP (Analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise). Elle permet d'identifier les dangers liés à une activité donnée et de mettre en place des mesures préventives ou correctives en fonction du risque. Les exploitants sont également tenus de mettre en place un système de traçabilité des produits (en amont par rapport à leurs fournisseurs et en aval par rapport à leurs clients). En cas de non-conformité par rapport à ces obligations, l'exploitant doit être en capacité de mettre en œuvre efficacement des mesures de retrait et rappel des produits.

Certaines des crises sanitaires liées à l'alimentation à la fin du XXème siècle et au début du XXIème ont conduit à encadrer plus précisément les produits animaux. Ils ont fait l'objet d'une attention particulière du fait des risques sanitaires particuliers auxquels ils sont sensibles. Ainsi, des règles spécifiques à la qualité sanitaire des produits animaux ont été précisées dans le règlement (CE) n°853/2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale (Commission européenne, 2004b). Ce règlement implique notamment une obligation d'agrément ou d'enregistrement pour les exploitants manipulant des produits d'origine animale. Il fixe des règles d'hygiène spécifique à chaque catégorie de denrées d'origine animale qui sont complémentaires à celles issues du règlement (CE) n°852/2004 (Commission européenne, 2004a).

L'organisation des contrôles répond à la même distinction (Union Européenne, 2017). Il existe des règles générales qui sont valides pour l'organisation des contrôles de toutes les denrées alimentaires (art. 9 et s.) et des règles spécifiques concernant la production de produits d'origine animale (art. 16 et s., en particulier art. 18).

5.1.2. La qualité marchande : les produits animaux soumis au principe de libre circulation des marchandises

En 1957, les négociateurs du Traité de Rome ont fixé deux objectifs principaux : rapprocher les peuples européens et promouvoir le développement économique. Le principal moyen pour y parvenir fut de créer un espace qui s'articule autour de quatre libertés. L'article 26 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne (TFUE) énonce ainsi que l'Union adopte des mesures destinées à établir un marché intérieur comportant « *un espace sans frontières intérieures dans lequel la libre circulation des marchandises, des personnes, des services et des capitaux est assurée selon les dispositions des traités* ». Les produits animaux sont principalement concernés par la libre circulation des marchandises. Cette dernière est garantie notamment par l'interdiction de restrictions quantitatives à l'importation ou à l'exportation ainsi que toutes mesures d'effet équivalent[2]. Ces mesures sont entendues comme des dispositions législatives, réglementaires ou administratives ou plus largement d'actes émanant d'une autorité publique. Toutefois, des mesures peuvent être autorisées si elles sont justifiées notamment par des raisons « *de protection de la santé et de la vie des personnes et des animaux ou de préservation des végétaux* »[3].

Si l'aliment peut être considéré comme un bien particulier, il est abordé dans le droit de l'Union européenne dans une perspective marchande et libérale, ce que confirme le premier considérant du règlement (CE) n°178/2002 qui énonce que « *la libre circulation de denrées alimentaires sûres et saines constitue un aspect essentiel du marché intérieur et contribue de façon notable à la santé et au bien-être des citoyens, ainsi qu'à leurs intérêts économiques et sociaux* » (Commission européenne, 2002). Autrement dit, la législation alimentaire vise à éliminer les entraves à la libre circulation des aliments conformes aux exigences sanitaires.

[1] La législation alimentaire européenne s'adresse à l'ensemble des acteurs de la chaîne alimentaire, c'est-à-dire à « toute entreprise publique ou privée assurant, dans un but lucratif ou non, des activités liées aux étapes de la production, de la transformation et de la distribution de denrées alimentaires »

[2] TFUE, Art. 34 et 35. De manière générale sur la libre circulation des marchandises http://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/38/libre-circulation-des-marchandises

[3] TFUE, Art. 36 http://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/38/libre-circulation-des-marchandises

5.1.3. La prévention des risques : quel équilibre entre la qualité sanitaire et marchande ?

En tant que telle, une hiérarchie entre les qualités n'est pas clairement explicitée. Il faut interpréter l'article 14 du règlement (CE) n°178/2002 pour en préciser les contours (Commission européenne, 2002). Si la denrée alimentaire est dangereuse, elle ne sera pas mise sur le marché. Nombreuses sont les denrées alimentaires potentiellement dangereuses : les viandes fraîches ou les produits laitiers, s'ils ne sont pas bien conservés, peuvent avoir un effet néfaste sur la santé. C'est pourquoi le législateur a précisé que le danger devait être apprécié en tenant compte de l'information fournie aux consommateurs et des conditions normales d'utilisation du produit. Cependant, ces différents paramètres ne sont pas toujours certains, c'est pourquoi il est prévu d'évaluer scientifiquement ce risque (1) afin d'en opérer une gestion adéquate (2) en opérant une conciliation des enjeux sanitaires et marchands.

5.1.3.1. L'évaluation scientifique des risques au cœur de l'action publique

Lorsque, à la fin des années 1980, l'Union européenne a fermé ses frontières à la viande bovine issue d'animaux traités aux hormones en provenance d'Amérique du Nord, des lacunes scientifiques de la législation alimentaire avaient été identifiées par l'organe de règlement des différends de l'OMC chargé du litige. L'organe d'appel avait notamment conclu qu'aucune évaluation des risques ne pouvait raisonnablement justifier l'interdiction d'importation énoncée par les directives européennes[4]. C'est l'un des évènements qui a mené à la rénovation du droit européen de l'alimentation. L'analyse des risques est désormais un des principes généraux de la législation alimentaire européenne. Il s'agit en particulier de scinder l'évaluation scientifique des risques de leur gestion. La première vise à caractériser les dangers et les risques liés à l'alimentation et la seconde « *consiste à mettre en balance les différentes politiques possibles, en consultation avec les parties intéressées, à prendre en compte l'évaluation des risques et d'autres facteurs légitimes, et, au besoin, à choisir les mesures de prévention et de contrôle appropriées* » (Commission européenne, 2002)[5]. Ainsi l'évaluateur produit des avis qui n'ont, par nature, pas de valeur contraignante. La gestion des risques, quant à elle, s'exprime juridiquement par la production législative et réglementaire de l'Union européenne et des États membres. Pour partie, les régimes juridiques sont donc déterminés en fonction d'un processus scientifique.

Ainsi, l'action publique peut s'appuyer sur l'évaluation scientifique des risques pour assurer la sécurité sanitaire de la chaîne alimentaire. Par exemple, lorsqu'un exploitant du secteur alimentaire souhaite mettre sur le marché un nouvel aliment, il doit se conformer à une procédure impliquant l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa) [6] qui évalue l'innocuité du nouvel aliment en le comparant notamment à une denrée alimentaire de catégorie similaire déjà mise sur le marché (Union Européenne, 2015). L'avis est alors pris en considération par la Commission qui adopte un acte d'exécution idoine : refus de la demande ou autorisation de mise sur le marché de la denrée alimentaire associée à une obligation d'information spécifique et adéquate vis-à-vis du consommateur.

Le développement de l'objectif de protection sanitaire dans la législation alimentaire entraîne un changement de paradigme dans la construction traditionnelle de la norme juridique. Elle donne une place primordiale à l'évaluation des risques et aux agences qui en sont chargées dans la détermination des régimes juridiques applicables au domaine alimentaire[7].

---

[4] Organe d'appel de l'OMC, Communautés européennes – Mesures concernant les viandes et les produits carnés (hormones), AB-1997-4, 16 janvier 1998.

[5] Art. 3, Règlement 178/2002

[6] Afin d'assurer la confiance dans les bases scientifiques de la législation alimentaire, des règles visent à garantir qu'elles sont réalisées de manière indépendante, objective et transparente. *Cf.* art. 22 et s., Règlement (CE) n°178/2002. Malgré les progrès réalisés à ce propos, l'évaluation de la législation alimentaire générale a montré des faiblesses s'agissant de la transparence des avis de l'Efsa. *Cf. European Commission, The REFIT evaluation of the General Food Law (Regulation (EC) No 178/2002),* Brussels, 15.1.2018SWD (2018) 38 final https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/?fuseaction=list&coteId=10102&year=2018&number=38&version=ALL&language=en

[7] Dans le langage courant, les agences d'évaluation des risques sont souvent présentées comme des agences réglementaires, alors qu'elles ne règlementent que dans de rares cas

5.1.3.2. La gestion des risques

L'activité réglementaire dans le domaine alimentaire résulte souvent de mesures de gestion de risques. Outre les résultats de l'évaluation des risques, les gestionnaires du risque (l'Union européenne ou l'Etat membre) tiennent compte d'autres facteurs légitimes pour la question en cause et du principe de précaution (Commission européenne, 2002)[8].

Ces mesures de gestion de risques sont diverses. Elles vont de l'abstention à prendre des mesures jusqu'à l'interdiction de la mise sur le marché. Le panel de mesures de gestion intermédiaire est large : politique incitative, obligation d'information, autorisation de mise sur le marché, fixation de seuils, organisation de contrôles…

La gestion des risques porte tant sur le risque certain que sur le risque incertain. La législation impose l'application du principe de prévention dans le premier cas et celle du principe de précaution dans le second. Dans le cas d'une contamination de denrées alimentaires par une bactérie de type *E. coli*, il est avéré que l'exposition à ce danger à travers l'ingestion peut avoir des effets néfastes sur la santé humaine. Dans cet exemple, le risque est certain. On se trouve alors dans la prévisibilité et la probabilité, c'est-à-dire dans le champ de la prévention. Les mesures de gestion de risque sont pérennes (comme dans le Plan de Maîtrise Sanitaire).

On entre dans le champ de la précaution lorsqu'il y a un doute sur la possibilité d'un effet nocif sur la santé (Commission européenne, 2002)[9]. Par exemple, le lien entre l'exposition au Bisphénol A utilisé pour la fabrication d'emballage pour l'alimentation et le développement de certains cancers fait l'objet de débats. Cette hypothèse relève du principe de précaution. Toutefois, l'application de ce principe n'est pas automatique. Ainsi, selon le Conseil National de l'Alimentation, il faut que la possibilité d'un effet nocif soit étayée par une hypothèse scientifique sérieuse permettant de suspecter un risque (Conseil national de l'alimentation, 2001).

De manière plus ou moins spécifique, les produits d'origine animale font donc l'objet d'une diversité de mesures de gestion de risques. Nous en donnerons quelques illustrations.

Les mesures d'interdiction peuvent concerner les viandes provenant d'animaux malades ou de certaines parties d'animaux considérés à risques (République Française, 2010)[10]. Il existe aussi des mesures fixant des régimes juridiques plus généraux présumant la dangerosité. Ainsi, le règlement relatif aux aliments nouveaux (Union Européenne, 2015) impose de solliciter une autorisation de mise sur le marché pour les denrées alimentaires dont la consommation humaine était négligeable au sein de l'Union avant le 15 mai 1997. Le texte précise les dix catégories de denrées concernées par cette procédure. L'une d'elles concerne particulièrement les produits d'origine animale :

« *les denrées alimentaires qui se composent d'animaux ou de leurs parties, ou qui sont isolées ou produites à partir d'animaux ou de leurs parties, à l'exception des animaux obtenus par des pratiques de reproduction traditionnelles qui ont été utilisées pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, et pour autant que les denrées alimentaires provenant de ces animaux aient un historique d'utilisation sûre en tant que denrées alimentaires au sein de l'Union* ».

Cette dernière catégorie renvoie notamment aux produits qui peuvent être consommés habituellement sur des territoires extra-européens, comme les insectes (Union Européenne, 2015)[11]. En outre, tant qu'il n'existe pas de législation spécifique, les denrées issues d'animaux clonés ou de leur progéniture sont également concernées (Union Européenne, 2015)[12].

---

[8] Art. 6, Règlement (CE) n° 178/2002

[9] Art. 7, Règlement (CE) n°178/2002. Le principe de précaution qui impose d'adopter des mesures provisoires de gestion des risques « *dans des cas particuliers où une évaluation des informations disponibles révèle la possibilité d'effets nocifs sur la santé, mais où il subsiste une incertitude scientifique* ».

[10] Arrêté du 15 juin 2010 - Par ex : « les viandes provenant d'animaux considérés comme suspects d'encéphalopathie subaiguë spongiforme transmissible » ou « le crâne, y compris les yeux, mais à l'exclusion de l'encéphale, des ovins âgés de plus d'un mois et de moins de six mois »

[11] Considérant n°8, Règlement (UE) 2015/2283. Plusieurs demandes d'autorisations de mise sur le marché ont déposés pour ce type de produits. La Commission n'a encore adopté aucun acte d'exécution concernant ces demandes. Sur le sujet des insectes, v. not. Lahteenmaki-Uutela, A.; Grmelova, N., 2016. European law on insects in food and feed. *European Food and Feed Law Review*, 11 (1): 2-8.

[12] Règlement (UE) n°2015/2283, consid. 14, v. not. Del Cont, V.C.; Friant-Perrot, M., 2011. Quel cadre normatif pour la viande clonée : enjeux sociaux, éthiques et juridiques. *Droit, sciences et techniques : quelles responsabilités*. Lexisnexis, Collection « Colloques et débats », 345-366.

D'autres risques sont gérés par la fixation de teneurs maximales pour certains contaminants des denrées alimentaires. Ainsi, certains composés néoformés font l'objet de mesures réglementaires comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques que l'on peut retrouver dans les viandes fumées (Union Européenne, 2011). Ces dispositions font l'objet de contrôles par les autorités compétentes[13]. En cas de dépassement de seuils, des sanctions pourront être prononcées à l'encontre des exploitants qui ne respectent pas la réglementation[14]. La gestion du risque peut aussi se concrétiser par une abstention de mesure d'encadrement *stricto sensu*. S'agissant des composés néoformés lors de la cuisson au barbecue, les pouvoirs publics n'ont pas mis en œuvre des mesures coercitives ou incitatives. Toutefois, une communication sur ces risques existe, elle est notamment opérée par l'Anses[15].

L'encadrement de l'information du consommateur est également un moyen de gérer le risque sanitaire. Ainsi, pour déterminer si une denrée alimentaire est dangereuse, il est tenu compte « *de l'information fournie au consommateur, y compris des informations figurant sur l'étiquette, ou d'autres informations généralement à la disposition du consommateur, concernant la prévention d'effets préjudiciables à la santé propre à une denrée alimentaire particulière ou à une catégorie particulière de denrées alimentaires* » (Commission européenne, 2002)[16]. Ainsi, le consommateur d'une viande fraîche préemballée doit être informé qu'il doit conserver cette denrée à une température adéquate et la consommer dans des délais brefs (date limite de conservation) (Union Européenne, 2011)[17]. L'obligation d'information du consommateur est l'une des techniques très mobilisées dans la protection de la santé, mais aussi des autres intérêts du consommateur[18].

En définitive, la gestion des risques par les pouvoirs publics résulte de la recherche d'un équilibre entre les intérêts socio-économiques et sanitaires.

Concernant les produits animaux, la gestion du risque relève essentiellement de mesures de politiques publiques non contraignantes visant à informer le consommateur sur les risques d'une consommation excessive de ces produits d'origine animale. Il n'existe pas de dispositions juridiques visant à limiter cette consommation (Dumont *et al.*, 2016). Comme cela était souligné dans le chapitre 5.5 de ESCo Inra - Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe, « *on note l'apparition dans la littérature juridique d'études qui transposent les solutions adoptées pour encadrer la consommation du tabac, de l'alcool et des aliments non sains (Wellesley et al., 2015). Afin de modifier les comportements de consommateurs et de modérer leur consommation de viande, la démarche mobilise plusieurs outils juridiques : l'information et l'éducation du consommateur, la taxation des produits, ainsi que des restrictions liées à la promotion et à l'offre de produits d'origine animale (Bajzelj et al., 2014 ; Wirsenius et al., 2011). Le rapport publié en novembre 2015 par Chatham House et le Glasgow University Media Group analyse ainsi l'interconnexion entre la consommation de viande et de produits laitiers et le changement climatique et préconise ces solutions (Wellesley et al., 2015)* ».

Certains pays développent des dispositifs qui vont dans le sens de ces solutions. « *Ainsi, on voit émerger des politiques locales imposant par voie règlementaire (dans une logique de « command and control ») un jour végétarien dans les cantines scolaires comme à Helsinki en Finlande (Lombardini et Lankoski, 2013). De même, la Suède envisage depuis 2013 de mettre en place une fiscalité comportementale en édictant une taxe sur la viande (Conseil suédois de l'Agriculture, 2013) dans une logique de régulation par le marché (« economic incentives ») (Thow et al., 2010). Plus récemment, en avril 2016, le Comité d'éthique du Danemark a aussi préconisé la mise en place d'une taxe sur le bœuf avec la possibilité d'étendre par la suite cette fiscalité aux autres viandes (Edjabou et Smed, 2013). Dans la perspective de l'adoption de ces outils incitatifs, une étude analyse la*

[13] V. par ex. pour les composés néoformés : https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/contamination-certaines-denrees-alimentaires-par-des-composes-neoformes#_ftn1

[14] Par exemple, le délit de tromperie (art. L. 441-1 du Code de la consommation) est passible d'une peine maximale de deux ans d'emprisonnement et de 300 000 euros d'amende, voire sept ans et 750 000 euros d'amendes si le délit ou sa tentative a eu pour conséquence de rendre l'utilisation de la marchandise dangereuse pour la santé de l'homme ou de l'animal (art. L.454-1 et suivant du Code de la consommation)

[15] https://www.anses.fr/fr/content/cuisson-au-barbecue

[16] Art. 14, Règlement (CE) n° 178/2002

[17] Art. 24, Règlement (UE) n°1169/2011

[18] *Cf.* infra

faisabilité juridique de la mise en place d'une telle taxe au regard du droit du commerce international et du droit de l'Union européenne (Bähr, 2015)[19].

En France, les cantines scolaires ont l'obligation de servir un repas composé notamment de protéines animales[20] (un produit laitier et un plat protidique, c'est-à-dire un « plat principal à base de viandes, poissons, œufs, abats ou fromages » (République Française, 2011)). Ces dispositions ont d'ailleurs fait l'objet d'un recours porté par l'association végétarienne de France. Dans une décision du 20 mars 2013[21], le Conseil d'État reconnait que les dispositions combinées de ces textes imposent de servir des denrées d'origine animale, mais qu'elles ne portent pas atteinte à l'objectif législatif d'équilibre alimentaire. Aux termes de l'arrêté du 30 septembre 2011, les gestionnaires des cantines proposent « *d'autres nutriments que les protéines animales* », ce qui, selon les juges, ne faisait donc pas « *obstacle à l'exercice des choix alimentaires dictés à leurs usagers par leur conscience* ». La situation pourrait évoluer. C'est ce que signale la loi du 30 novembre 2018 dite EGAlim (République Française, 2018b) qui propose, plus qu'elle n'impose, de diversifier les apports en protéines. En effet, l'article 230-5-6 nouvellement créé impose « *à titre expérimental* » et pour une durée de 2 ans que « *les gestionnaires, publics ou privés, des services de restauration collective scolaire [proposent], au moins une fois par semaine, un menu végétarien. Ce menu peut être composé de protéines animales ou végétales* ».

5.1.3.3. Le rôle prépondérant des exploitants

Depuis l'entrée en vigueur du règlement (CE) n°178/2002 (Commission européenne, 2002), les exploitants du secteur alimentaire, qu'ils soient producteurs, transformateurs ou distributeurs, ont également vu leurs obligations renforcées en matière de sécurité sanitaire des denrées alimentaires[22], tant dans le domaine de la prévention des risques que dans la mise en place de mesures de précaution. Il s'agit en particulier d'une obligation de mise sur le marché de denrées alimentaires sûres et non dangereuses (Commission européenne, 2002)[23], d'une obligation de traçabilité (Commission européenne, 2002)[24], de la mise en place de mesures de retrait ou de rappel des produits en cas de risque avéré ou suspecté (Commission européenne, 2002)[25] ou encore d'une obligation d'information du consommateur (Commission européenne, 2002 ; Union Européenne, 2011)[26].

Certaines de ces obligations européennes ont été précisées dans la loi du 30 novembre 2018 dite EGAlim (République Française, 2018b). Elles font notamment suite à l'affaire dite « Lactalis » du mois de décembre 2017 pendant laquelle des imprécisions relatives à l'obligation d'autocontrôle des exploitants avaient été identifiées. Désormais, l'alinéa 2 de l'article L. 201-7 du Code rural dispose que :

« *Tout propriétaire ou détenteur de denrées alimentaires ou d'aliments pour animaux soumis aux prescriptions prévues à l'article L. 231-1 informe immédiatement l'autorité administrative désignée par décret lorsqu'il considère ou a des raisons de penser, au regard de tout résultat d'autocontrôle, qu'une denrée alimentaire ou un aliment pour animaux qu'il a importé, produit, transformé, fabriqué ou distribué présente ou est susceptible de présenter un risque pour la santé humaine ou animale* ».

La législation impose donc un devoir de vigilance à l'égard des risques sanitaires en sus de l'obligation de mettre sur le marché un produit sûr et exempt de danger. De ce point de vue, l'encadrement de l'information du consommateur joue également un rôle essentiel tant pour protéger sa santé que ses intérêts.

---

[19] Pour de plus amples développements, *cf.* chapitre 6.2

[20] Art. 230-24-1 du Code rural et de la pêche maritime https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000025251178&cidTexte=LEGITEXT000022197698&dateTexte=20130701

[21] Conseil d'État, 20 mars 2013, n°354547 https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do?idTexte=CETATEXT000027198464

[22] V. not. Bombardier, J., 2018. Fabrication et distribution d'un produit : de la mise sur le marché à la gestion des risques, quelles obligations et sanctions pour les professionnels ? . *Revue de Droit Rural*, déc. 2018 (n°468): étude 24.

[23] Art. 14, Règlement (CE) n°178/2002

[24] Art. 18, Règlement (CE) n°178/2002

[25] Art. 19, Règlement (CE) n°178/2002

[26] Art. 16, Règlement (CE) n°178/2002 et généralement Règlement (UE) n°1169/2011.

5.1.4. L'information du consommateur

La politique européenne se fonde sur le paradigme informationnel postulant que le consommateur, bien informé, est en mesure de faire des choix rationnels maximisant ses intérêts. La littérature juridique montre la limite de ce paradigme « *pour orienter les choix de consommation. L'analyse du comportement du consommateur souligne la complexité des arbitrages, les variabilités nationales des attentes des consommateurs-citoyens, et par là même les insuffisances d'un droit incitatif et d'application volontaire focalisé sur une régulation par le marché* » (Dumont *et al.*, 2016)[27].

Selon l'article 3 du Règlement (UE) n°1169/2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, aussi appelé règlement « INCO » (Union Européenne, 2011), « *L'information sur les denrées alimentaires tend à un niveau élevé de protection de la santé et des intérêts des consommateurs en fournissant au consommateur final les bases à partir desquelles il peut décider en toute connaissance de cause et utiliser les denrées alimentaires en toute sécurité, dans le respect, notamment, de considérations sanitaires, économiques, écologiques, sociales et éthiques* ». Ce règlement fixe les principales mentions obligatoires : dénomination de la denrée alimentaire, liste des ingrédients, mentions des allergènes majeurs, quantité de certains ingrédients, quantité nette de la denrée, dates d'utilisation, conditions de conservation et/ou d'utilisation, coordonnées de l'exploitant responsable de l'information, pays d'origine ou de provenance … (Union Européenne, 2011)[28]. D'autres obligations relatives à l'information sont précisées dans des textes plus spécifiques comme pour les aliments nouveaux (Union Européenne, 2015) ou lorsqu'il y a eu un traitement de la denrée par ionisation (République Française, 2001).

Le chapitre 5.5 de l'ESCo Inra - *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe* (Dumont *et al.*, 2016) - a aussi largement détaillé les informations prescrites concernant les produits d'origine animale. Il a été montré que la législation tentait de préserver le modèle animal par rapport aux produits d'origine végétale et qu'elle s'attelait à simplifier et clarifier les dénominations des produits d'origine animale. Ensuite, les débats sur l'indication de la provenance des produits et les spécificités quant aux informations nutritionnelles ont été développés. Enfin, le propos soulignait le peu d'informations obligatoires sur les modes et procédés de production (en particulier concernant le clonage et le mode d'abattage des animaux). Sans revenir sur les aspects déjà présentés dans ce précédent travail, il convient de présenter les éléments d'actualisation concernant les dénominations et l'indication de l'origine et de préciser certains aspects de l'information sur les autres qualités des produits d'origine animale.

5.1.4.1. Les dénominations

Le contentieux relatif aux dénominations des produits animaux est riche. Ainsi la Cour de justice des Communautés européennes (CJCE) a pu estimer que l'interdiction par la France de l'utilisation de « *la dénomination « lait en poudre », « lait concentré » suivie ou non d'un qualificatif, ou sous une dénomination de fantaisie quelconque, un produit présentant l'aspect de lait en poudre ou lait concentré destiné aux mêmes usages et ne provenant pas exclusivement de la concentration ou de la dessiccation de lait ou de lait écrémé sucré ou non, l'addition de matières grasses étrangère* » n'était pas conforme au droit européen [29]. Dans le même sens, la CJCE a estimé que l'interdiction par l'Allemagne de l'importation et de la commercialisation de produits à base de viande comportant certains ingrédients non carnés n'était pas conforme à l'article du Traité instituant la Communauté européenne relatif aux justifications d'une restriction à la libre circulation des marchandises[30].

---

[27] Chapitre 5.5.2 de ESCo Inra - Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p. . Pour de plus amples développements, *cf.* chapitre 6.2

[28] Art. 9 et suivant, Règlement (UE) n°1169/2011

[29] CJCE, 23 février 1988 Commission c/ France, Affaire 216/84 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:61984CJ0216_SUM&from=ET

[30] CJCE, 2 février 1989 Commission c/ RFA, Affaire 274/87 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A61987CJ0274

Le règlement (UE) n°1169/2011 dit INCO est venu clarifier les règles d'information du consommateur concernant certains produits animaux, ainsi :

« *5. Dans le cas des produits à base de viande, des préparations de viandes et des produits de la pêche qui contiennent des protéines ajoutées, en tant que telles, y compris des protéines hydrolysées, provenant d'autres espèces animales, la dénomination de la denrée alimentaire doit comporter l'indication de la présence de ces protéines et de leur origine.*

6. Dans le cas des produits à base de viande et des préparations de viandes qui prennent l'apparence d'un morceau, d'un rôti, d'une tranche, d'une portion ou d'une carcasse de viande, la dénomination de la denrée alimentaire doit comporter l'indication de la présence d'eau ajoutée si celle-ci représente davantage que 5% du poids du produit fini. Les mêmes dispositions s'appliquent dans le cas des produits de la pêche et des préparations de ces produits qui prennent l'apparence d'un morceau, d'un rôti, d'une tranche, d'une portion, d'un filet ou d'un produit entier de la pêche.

7. Les produits à base de viande, les préparations de viandes et les produits de la pêche qui peuvent donner l'impression d'être faits d'une pièce entière de viande ou de poisson mais qui, en réalité, consistent en différents morceaux liés ensemble par divers ingrédients, y compris des additifs ou des enzymes alimentaires ou d'autres procédés, portent les indications suivantes : viande reconstituée» ou « poisson reconstitué » (Union Européenne, 2011).

Plus récemment, la question de l'utilisation de dénominations habituellement associées à des produits d'origine animale pour des produits d'origine végétale s'est posée.

La Cour de justice de l'Union européenne s'est prononcée sur l'utilisation des dénominations laitières pour des produits d'origine végétale[31]. L'affaire trouve son origine dans la mise sur le marché allemand de produits purement végétaux sous les dénominations « beurre de tofu », « fromage végétal », « Veggie-Cheese », et d'autres dénominations similaires par la société Tofutown. Une association allemande dont l'un des objectifs est de lutter contre la concurrence déloyale estimait que ces dénominations n'étaient pas conformes au règlement (UE) n°1308/2013 concernant le lait et les produits laitiers (Union Européenne, 2013). Pour justifier l'usage de ces dénominations, la société Tofutown avançait que la compréhension des consommateurs avait évolué ces dernières années à propos de ces produits et que les dénominations laitières étaient toujours associées à des termes renvoyant à des produits d'origine végétale. Toutefois, la Cour a estimé que le règlement (UE) n°1308/2013 s'opposent « *à ce que la dénomination « lait » et les dénominations* [comme « crème », « fromage » ou « yogourt »] *que ce règlement réserve uniquement aux produits laitiers soient utilisées pour désigner, lors de la commercialisation ou dans la publicité, un produit purement végétal, et ce même si ces dénominations sont complétées par des mentions explicatives ou descriptives indiquant l'origine végétale du produit en cause* ». Les juges précisent néanmoins qu'il existe certaines exceptions, comme le lait d'amande ou la crème d'anchois, qui sont énumérées dans une décision de la Commission du 20 décembre 2010 (Commission européenne, 2010).

Le législateur français a également tenté de clarifier la situation en interdisant formellement l'usage des dénominations associées aux produits d'origine animale pour des produits contenant une part significative de produits d'origine végétale. L'amendement avait été adopté en lecture définitive du projet de loi dite « EGAlim » en octobre 2018 (République Française, 2018b)[32]. Toutefois, ayant été introduite en première lecture et n'ayant pas de lien direct avec le projet de loi initial, la disposition a été déclarée contraire à la Constitution pour une raison de procédure [33].

---

[31] CJUE, 14 juin 2017, Verband Sozialer Wettbewerb c/ TofuTown.com GmbH Aff. C-422-16 https://www.doctrine.fr/d/CJUE/2017/CJUE62016CJ0422_SUM . Sur cette affaire, v. not. Arayess, S.; Jeukens, F., 2018. The Netherlands · Alpro's Dairy Alternatives: What Is Allowed and What Is Not in the Light of ECJ's TofuTown? *European Food and Feed Law Review*, 13 (1): 55-57. , Bolton, B., 2017. Dairy's Monopoly on Words: the Historical Context and Implications of the *Tofu Town* Decision. Ibid.12 (5): 422-430. ; la question se pose aussi aux Etats-Unis Moreno, M.E.; Berman, J., 2019. Can Nondairy Beverages Be Called Milk? *Scitech Lawyer*, 15 (2): 24-30.

[32] Art. 31, Projet de loi , adopté, par l'Assemblée nationale, dans les conditions prévues à l'article 45, alinéa 4, de la Constitution, pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous le 2 octobre 2018, T.A. n°177

[33] Conseil constitutionnel, Décision n°2018-771 DC du 25 octobre 2018 Loi pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous https://www.conseil-constitutionnel.fr/decision/2018/2018771DC.htm

À l'avenir, la situation devrait évoluer. D'une part, la Commission européenne devrait se positionner sur l'indication de l'acceptabilité d'une denrée alimentaire pour les végétariens ou les végétaliens (Union Européenne, 2011)[34], car pour le moment il n'existe pas de définition juridique harmonisée sur le sujet. D'autre part, l'importance des enjeux économiques, voire sanitaires, soulevés par certains parlementaires français et européens[35] devrait aboutir à des précisions par rapport à l'usage des dénominations associées aux produits d'origine animale.

Pour le moment, les règles générales du droit de la consommation s'appliquent : les informations transmises au consommateur ne doivent pas être trompeuses. À la lecture des résultats 2018 de la DGCCRF, cette dernière contrôle les dénominations en suivant la position des juges européens. En effet, les contrôles opérés sur les produits portant la mention « vegan » ou « végétarien » ont montré que 23% des 375 établissements contrôlés « *présentaient des anomalies, les plus nombreuses concernant l'usage de dénominations de ventes traditionnellement réservées aux produits d'origine animale pour désigner des denrées exclusivement végétales (terrine de campagne recette veggie, milk shake vegan, spaghetti carbonara vegan, la vegan merguez, le thon rouge et les langoustines végétales, etc.)* »[36].

5.1.4.2. L'origine

Comme cela avait été soulevé dans l'ESCo Inra - *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe* - [37], si l'indication de l'origine des produits répond à une demande des consommateurs, cette information n'est pas obligatoirement apposée sur l'ensemble des denrées alimentaires. Concernant les produits animaux, les viandes fraîches, en particulier bovines, ont fait l'objet d'une attention particulière du législateur.

En France, le décret n°2016/1137 du 19 août 2016 impose l'indication de l'origine du lait et des viandes utilisés en tant qu'ingrédient dans les denrées préemballées (République Française, 2016b). Les opérateurs français sont, en principe, tenus d'indiquer le pays de collecte, de conditionnement et de transformation du lait de manière générale et lorsqu'il est utilisé dans certains produits laitiers, et l'origine des viandes utilisées dans un produit transformé. Notifié à la Commission, ce décret est applicable depuis le 1er janvier 2017. Initialement applicable jusqu'au 31 décembre 2018, son application a été prorogée jusqu'en 2020 (République Française, 2018a). L'arrêté du 28 septembre 2016 fixe les seuils à partir desquels il est obligatoire d'indiquer l'origine (50% pour le lait utilisé en tant qu'ingrédient dans un produit laitier et 8 % pour la viande utilisée en tant qu'ingrédient dans un produit transformé) (République Française, 2016a).

Durant l'année 2018, le Conseil d'État a été saisi par la société Lactalis d'une demande d'annulation de ce texte (République Française, 2018a)[38]. La société soutient notamment que la mention de l'origine est une question harmonisée par le règlement (UE) n°1169/2011 et que le décret français ne remplissait pas les conditions dérogatoires à ce propos (Union Européenne, 2011)[39]. À ce titre, la France aurait dû démontrer l'existence d'un lien avéré entre certaines propriétés de la

[34] Art. 36 § 3, Règlement (UE) n°1169/2011

[35] Mara Bizzotto, Question for written answer E-004310-18to the Commission, 22 august 2018 http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-8-2018-004310_EN.html

[36] Résultats 2018 de la DGCCRF, 48 p. [en ligne] https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/dgccrf/rapports_activite/2018/resultats-dgccrf-2018.pdf

[37] Chapitre 5.5.2 de l'ESCo Inra - Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe p. 581 Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p.

[38] Conseil d'État, 3e - 8e ch. réunies, 27 juin 2018, n°404651 https://www.legifrance.gouv.fr/affichJuriAdmin.do;jsessionid=221564AAA58DFB08046B1607B1CD54E3.tplgfr36s_3?oldAction=rechExpJuriAdmin&idTexte=CETATEXT000037113482&fastReqId=662135183&fastPos=5856

[39] L'article 39 du règlement n°1169/2011 autorise les États membres à adopter des mesures exigeant des mentions obligatoires complémentaires, pour des types ou catégories spécifiques de denrées alimentaires, justifiées par au moins une des raisons suivantes: a) protection de la santé publique; b) protection des consommateurs; c) répression des tromperies; d) protection de la propriété industrielle et commerciale

denrée et son origine ou sa provenance[40]. Le Conseil d'État n'étant pas compétent pour interpréter le droit de l'Union européenne, le juge administratif a renvoyé l'affaire devant la CJUE qui devra se prononcer prochainement sur la question.

5.1.4.3. L'information facultative sur les autres caractéristiques des produits animaux

L'inclusion des qualités des produits animaux autres que celles reconnues par le marché ou pour protéger la sécurité sanitaire repose principalement sur des démarches volontaires.

Il n'est pas obligatoire d'informer le consommateur sur le respect de critères relatifs au bien-être animal, à un savoir-faire ou encore à des traditions culturelles. S'agissant de ces caractéristiques, il s'agit d'un choix de l'exploitant d'informer le consommateur. S'il le fait, il s'engage contractuellement avec le consommateur. Dès lors, l'information doit être loyale et non-trompeuse. Ces mécanismes contractuels proposés s'intègrent à une logique concurrentielle comme en témoignent les modes de valorisation des produits agroalimentaires (Boy, 2007). Ces moyens permettent de distinguer sur un marché différents produits d'une même gamme par l'identification d'une qualité spécifique. Ils reposent sur une diversité d'instruments juridiques tels que les signes d'identification de la qualité et de l'origine, les mentions valorisantes, les démarches de certification[41], les marques simples, les marques collectives*, etc.* Les modes de valorisation s'inscrivent moins en résistance au droit de la concurrence, qu'ils ne s'adaptent à l'ouverture des marchés agricoles. La valorisation ne permet pas seulement une augmentation de la valeur ajoutée des produits[42]. En contractant de leur propre initiative des engagements allant au-delà des exigences minimales imposées par la réglementation, les agriculteurs intègrent des intérêts plus larges que ceux qui sont rendus obligatoires par le droit commun[43].

Tant que les modes de valorisation sont cantonnés à la sphère contractuelle, dépendants d'un engagement volontaire des opérateurs, leur portée reste plus limitée que s'ils étaient généralisés par voie législative ou réglementaire. En gardant ces modes de valorisation facultatifs, le législateur en fait surtout des outils de résistance pour les producteurs dans le cadre d'un marché libéré plutôt qu'un principe général.

Il existe une très grande diversité d'outils ce qui permet d'en critiquer la cohérence et parfois la pertinence[44].

Ces informations facultatives sont parfois encadrées par des textes réglementaires. Il en va ainsi des signes officiels de la qualité et de l'origine ou encore des produits issus d'animaux nourris sans OGM (République Française, 2012). D'autres sont l'objet de démarches privées. Ainsi, le distributeur Casino a mis en place en 2018 un étiquetage informant le consommateur sur des critères relatifs au bien-être animal.

---

[40] L'article 2 g) du règlement (UE) 1169/2011 définit le lieu de provenance comme « *le lieu indiqué comme étant celui dont provient la denrée alimentaire, mais qui n'est pas le «pays d'origine» tel que défini conformément aux articles 23 à 26 du règlement (CEE) no 2913/92; le nom, la raison sociale ou l'adresse de l'exploitant du secteur alimentaire figurant sur l'étiquette ne vaut pas, au sens du présent règlement, indication du pays d'origine ou du lieu de provenance de la denrée alimentaire* ». Il convient de bien distinguer les notions de provenances et de pays d'origine dans le cadre de ce règlement de celles en vigueur dans le cadre des AOP/AOC

[41] Il s'agit notamment l'appellation d'origine, du label rouge ou de l'agriculture biologique (C. rur., art. L. 640-2) https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006071367&idArticle=LEGIARTI000006584653&dateTexte=&categorieLien=cid

[42] Ainsi, selon une étude de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, l'agriculture biologique est plus profitable pour le producteur que l'agriculture conventionnelle. *Cf.* NemesNemes, N., 2009. *Comparative analysis of organic and non-organic farming systems: A critical assessment of farm profitability* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 33 p. http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/011/ak355e/ak355e00.pdf

[43] Cela a été souligné dans le règlement (CE) n°1151/2012 relatif aux systèmes de qualité (cons. 18.) l'identification des caractéristiques est également porteuse de valeurs sociales. Les modes de valorisation concourent en effet à maintenir un tissu social agricole, à assurer la viabilité des exploitations, et ils sont assis sur des territoires ou sur un savoir-faire Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012R1151

[44] Chapitre 5.5.2 de l'ESCo Inra - Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe, p. 591 Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.; Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p.

Récemment, la Cour de justice de l'Union européenne est venue préciser la compatibilité de deux informations facultatives relatives aux produits d'origine animale. Dans une décision du 26 février 2019[45], la Cour a estimé que le droit européen n'autorisait pas l'apposition du logo de production biologique sur des produits issus d'animaux ayant fait l'objet d'un abattage rituel sans étourdissement préalable. Le juge européen a pu constater que le législateur a entendu placer l'agriculture biologique comme un mode de production exemplaire en matière de bien-être animal. Si la réglementation manque de précision sur ce que recouvre cette notion, la Cour estime que l'abattage rituel sans étourdissement préalable, bien qu'il soit conforme aux normes européennes relatives à l'abattage, ne garantit pas un niveau élevé de bien-être animal permettant de bénéficier du label « agriculture biologique ».

5.1.5. La qualité des produits animaux et droit du commerce international

Nous l'avons vu, l'Union européenne est le théâtre de nombreuses tensions concernant la qualité des produits animaux et des denrées alimentaires en général. Des tensions similaires se retrouvent également en droit international. Saisie par le droit international, l'alimentation n'échappe pas au mouvement de libéralisation de sa production et de sa circulation (Cuq, 2016).

En témoigne principalement, les règles fixées dans le cadre de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) qui visent à assurer la libre-circulation des marchandises entre les États. L'Accord sur l'Agriculture de l'OMC, qui régit spécifiquement le commerce des denrées alimentaires, fait référence au principe de non-discrimination. Sauf à démontrer la nécessité d'une limitation de la circulation des denrées alimentaires sur des considérations d'ordre sanitaire ou environnemental, les discriminations entre États membres sont proscrites en application de la clause de la nation la plus favorisée et de celle du traitement national interdisant une discrimination entre produits nationaux et étrangers (Choquet, 2015).

Dans les années 1980, l'Union européenne a notamment eu des difficultés à légitimer scientifiquement l'interdiction des importations de viande bovine et de produits à base de viande bovine traitée avec des hormones anabolisantes. Dans ce différend qui l'a opposée aux États-Unis devant les instances de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), une approche uniformisée de l'évaluation et de la gestion des risques sanitaires sur le territoire européen avait notamment fait défaut à l'Union européenne pour justifier l'embargo. Elle est également révélatrice de conceptions différentes, voire opposées, de la qualité sanitaire (Dangy, 2018).

L'idée d'une régulation optimale par le libre jeu de l'offre et de la demande se retrouve dans les récents accords commerciaux internationaux, où toutes les composantes de la qualité des denrées alimentaires ne trouvent pas forcément d'écho comme dans l'accord commercial qui unit l'Union européenne et le Canada. L'Accord économique et commercial global (AEGC) ou Comprehensive Economic and Trade Agreement (CETA) vise à améliorer la circulation des marchandises entre les deux zones. Ainsi, des contingents de produits sans droit de douane ont pu être négociés (notamment du bœuf canadien vers l'Union européenne et du fromage européen vers le Canada). Cet accord organise aussi la protection de certaines indications géographiques européennes de part et d'autre de l'Atlantique[46]. Jusqu'alors le Canada appliquait le droit des marques.

Les règles nationales, souvent liées à une certaine vision de l'alimentation, évoluent parfois sous l'influence de règles internationales. Ainsi, la dénomination et la qualité de l'emmental français ont évolué suite à la décision du 5 décembre 2000 de la Cour de justice des communautés européennes (CJCE)[47]. À l'origine de l'affaire se trouve le constat par l'autorité française chargée du contrôle de la conformité des produits de l'absence de croûte sur les meules d'emmental d'une laiterie alors qu'elles auraient dû en présenter une selon un décret de 1988 (République Française, 1988)[48]. Le prévenu de ce délit de tromperie opposait la non-conformité du décret à une norme issue du *Codex alimentarius*[49] qui fait référence à la

[45] CJUE, 26 février 2019, aff. C-497-17, Œuvre d'assistance aux bêtes d'abattoirs (OABA)/Ministre de l'Agriculture et de l'Alimentation, Bionoor, Ecocert France, Institut national de l'origine et de la qualité (INAO), https://www.lexbase.fr/revues-juridiques/50114880-cite-dans-la-rubrique-bconsommation-b-titre-%25ABnbsp-iviandes-issues-de-lrabattage-rituel-sans-etourdis note F. Marchadier, *Recueil Dalloz*, 2019 p.805

[46] Annexe 20A, CETA. Toutefois dans le texte consultable sur le site de la Commission européenne, il est seulement précisé les indications européennes reconnues au Canada et non l'inverse https://ec.europa.eu/trade/policy/in-focus/ceta/ceta-chapter-by-chapter/index_fr.htm

[47] CJCE, 5 décembre 2000, aff. C-448/98, Rec. 2000 I-10663. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A61998CJ0448 V. Branlard, J.P., 2014. La table et le droit, Décisions de justices gourmandes : 50 commentaires. In: Paris, ed. *LexisNexis*. p. 119.

[48] L'annexe du décret n 8-1206 du 30 décembre 1988 précise que cette croûte doit être « dure et sèche, de couleur jaune doré à brun clair »

[49] La Commission a l'origine de cet ensemble de normes internationales a été créée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la FAO. Elle a pour objectif d'harmoniser les normes alimentaires mondiales ou régionales dans le but de faciliter le commerce, protéger la santé du

consommation d'emmental sans croûte[50]. Dans une affaire pourtant franco-française, car le producteur vendait sa production sur le seul territoire français, la CJCE a décidé de privilégier la norme *Codex* estimant que le décret français était susceptible d'entraver les échanges entre les États membres. En l'espèce, la Cour de justice a estimé que la présence ou non d'une croûte ne constituait pas une différence majeure nécessitant une autre appellation que celle d'emmental du moment que ce fromage est fabriqué à partir de matières et selon une méthode de fabrication identiques à celles employées pour l'emmental comportant une croûte. Au surplus, la Cour suppose que si la méthode d'affinage était susceptible de représenter une caractéristique essentielle du produit de nature à tromper le consommateur, alors une information adéquate de celui-ci suffirait à écarter ce risque. Ici, la Cour évacue l'importance de la croûte sur les qualités organoleptiques de l'emmental. En effet, dans une affaire similaire, l'expert avait constaté à propos d'échantillons d'emmental sans croûte à l'étiquetage trompeur qu'ils ne présentaient « *pas de différence de dureté, d'extrait sec et de couleur entre la périphérie et le cœur, ce qui n'aurait pas été le cas s'ils possédaient une croûte* »[51]. Pour autant, le pouvoir réglementaire français a finalement créé deux catégories d'emmental (République Française, 2002)[52].

5.1.6. Conclusion

Juridiquement, comme les autres denrées alimentaires, les produits animaux sont soumis au principe de la libre-circulation des marchandises. La législation fixe des limites à cette liberté. Elles sont principalement d'ordre sanitaire. Les aliments doivent être sûrs et exempts de danger (au sens du règlement (CE) n°178/2002 (Commission européenne, 2002)) pour être mis sur le marché. En raison des sensibilités particulières des produits animaux, la règlementation est plus exigeante concernant la production, la transformation et la commercialisation de ces produits par rapport aux produits végétaux.

S'agissant des autres caractéristiques, leur respect relève du volontariat des exploitants. Elles sont admises si leur valorisation auprès du consommateur est loyale et non-trompeuse. De manière générale, les informations transmises aux consommateurs sont réglementées par le règlement européen n°1169/2011 (Union Européenne, 2011). Concernant les produits animaux, deux aspects particuliers ont pu être identifiés comme étant source de tensions sur plan juridique : les dénominations et l'indication de l'origine.

5.2. Déterminants des choix des consommateurs

5.2.1. Approche par la théorie économique

Le choix par un consommateur d'un produit alimentaire peut être abordé sous l'angle de l'économie de l'information. Un bien est constitué d'un panier d'attributs qu'un potentiel acheteur va évaluer et qui va conduire à son achat ou non. La qualité d'un produit sera ainsi analysée selon trois types d'attributs ou caractéristiques (Darby et Karni, 1973 ; Steenkamp, 1990) :

- des attributs de recherche utilisés dans le point de vente par l'acheteur (couleur d'une viande, persillé, information relative à l'origine…) ;

- des attributs d'expérience que l'acheteur ne pourra évaluer qu'une fois le produit consommé (goût, odeur, tendreté…). La satisfaction obtenue renforce les critères de choix du consommateur et influence les futurs achats (Font-i-Furnols et Guerrero, 2014 ; Henchion *et al.*, 2017) ;

- des attributs de croyance (ou de confiance) qui, contrairement aux deux précédents, ne peuvent pas être évalués par l'acheteur y compris après consommation du produit. Celui-ci doit se fier à des tierces-parties en ce qui concernent la véracité des informations portées par le produit (allégations sur le bien-être animal, produit issu de l'agriculture biologique, caractère durable du mode de production, composition nutritionnelle).

---

consommateur et assurer la loyauté des transactions commerciales. Ces normes peuvent être « horizontales » et porter sur des problématiques concernant toutes les filières (sécurité sanitaire, additifs…) ou « verticales » et concerner un produit ou un groupe de produits. Instance de régulation du marché alimentaire, elle influence les règles nationales

[50] Codex Stan 269-1967

[51] Cass. crim., 12 octobre 1999, n°98-83307, publié au bulletin

[52] Le décret n 2002-256 du 22 février 2002 précise que l'emmental avec croûte pourra voir sa dénomination complétée de la mention « affinage de tradition »

Pour un produit donné, les choix des consommateurs sont influencés par des facteurs socio-économiques et culturels (Ocejo, 2014). En outre, certains auteurs révèlent l'importance des engagements individuels et collectifs, des parcours de vie ou des passages d'âges (enfance adolescence, vieillesse) dans la construction ou l'évolution de ces choix (Devine *et al.*, 1998).

Ainsi, la pluralité du consommateur de produits animaux fait consensus. Le choix de tel ou tel aliment est un processus multifactoriel qui résulte :

- de facteurs individuels (croyances, valeurs, attitudes, connaissances, caractéristiques sociodémographiques),
- de facteurs collectifs (culture, religion, normes sociales)
- et de facteurs situationnels (accessibilité du produit, variété de l'offre, occasion de consommation).

L'achat de produits alimentaires étant fréquent et le temps constituant une ressource rare, le consommateur doit arbitrer entre, d'une part, la recherche d'une information complète et l'alignement avec ses valeurs et croyances et, d'autre part, le temps qu'il est prêt à consacrer à ses achats. Aussi, la littérature récente, s'inspirant des travaux de la psychologie (Kahneman, 2011 ; Strack et Deutsch, 2004), a proposé des modèles de décision composés de deux sous-systèmes (*dual-process models*) (Godfray *et al.*, 2018; Marteau, 2017) (Figure 5-1). Le premier dit « réfléchi » (*reflective*) est gouverné par la raison et est consommateur de ressources cognitives ; le second dit impulsif (*impulsive*) est fondamentalement gouverné par l'émotion et par des processus non-conscients. Les deux sous-systèmes fonctionnent en parallèle et sont souvent synergiques : ils permettent une économie de ressources notamment par la mise en place de routines ou d'habitudes de comportements (système impulsif). Cependant, ils peuvent aussi agir de façon antagonistes par exemple lorsqu'un consommateur qui a la ferme intention de perdre du poids se laisse tenter par une barre chocolatée judicieusement disposée à la caisse où il patiente (Marteau, 2017).

Figure 5-1. : Schématisation du processus de décision d'achat selon un modèle dual. Source : Godfray et al. (2018)

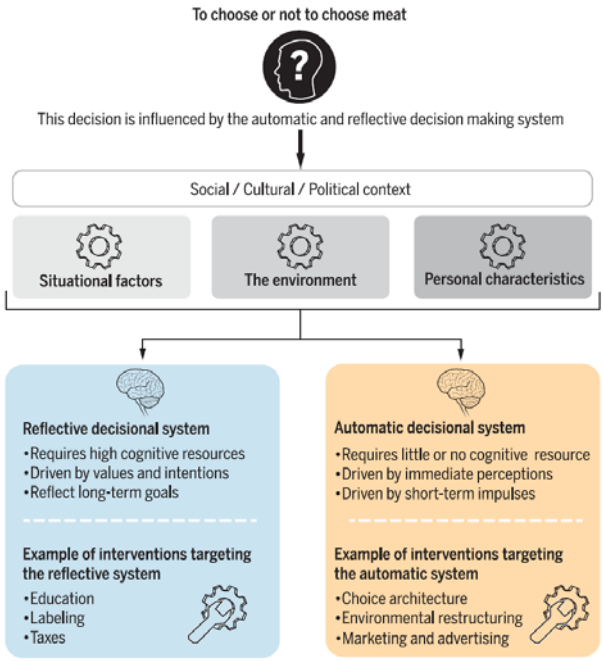


Fig. 5. The dual-process model of motivation and interventions that target automatic and deliberative decision-making. Examples of (i) situational factors are events, moods, and emotions; (ii) the environment are the layout of products in a shop or the marketing experienced by an individual; and (iii) personal characteristics are factors such as values, beliefs, and traits such as self-restraint or impulsivity.

Il a également été montré en sociologie que les pratiques d'achat reposent sur trois figures (Dubuisson-Quellier, 2006): celle de *l'arbitrage routinier* le moins anxiogène *(« j'achète toujours cela »)* qui repose sur des justifications (prix, marque,

emballage, etc.) ; la *sélection* qui correspond à un calcul coût/avantage entre plusieurs produits selon une liste assez fixe d'éléments de comparaison ; et le troisième la *délibération* qui est une mise en concurrence de « points d'appui » assez variables et larges, très anxiogène et dont le résultat d'arbitrage reste très aléatoire.

5.2.2. Révéler les préférences des acheteurs

Les préférences des acheteurs peuvent être révélées par le consentement (ou disposition) à payer (CAP) (ou *Willigness To Pay, WTP*), défini comme le prix maximum qu'un acheteur consent à payer pour une quantité donnée d'un produit (ou d'une caractéristique supplémentaire de ce dernier). Son évaluation peut être réalisée par deux grands types de méthodes :

i/ *des méthodes hypothétiques* (analyse conjointe, évaluation contingente, *choice experiment*) : elles ont en commun l'utilisation d'enquêtes au cours desquelles il est demandé aux répondants d'indiquer le prix maximum qu'ils seraient prêts à payer pour des produits ayant des caractéristiques différenciées. Ces méthodes permettent d'évaluer un CAP déclaré (donc hypothétique) : en effet, lorsqu'elle fixe le prix maximal qu'elle est prête à payer, la personne interrogée n'est pas en situation d'achat effectif (absence d'engagement d'une somme) et ne prend pas en considération toutes les contraintes qui pèseraient sur son choix en situation réelle (budget disponible, disponibilité du produit ou de produits concurrents). Les réponses obtenues sont des intentions et conduisent généralement à une surestimation des CAP.

ii) *des méthodes non hypothétiques* qui utilisent des protocoles d'économie expérimentale soit en laboratoire (*lab experiment*) soit sur le terrain (*field experiment*). Dans les deux cas, il s'agit de reproduire une situation de marché la plus proche possible de la réalité et de faire révéler la disposition à payer pour des attributs de produits par l'analyse de leurs arbitrages. Les protocoles utilisés visent à mieux contrôler l'information disponible pour les pseudo-consommateurs et à les engager davantage dans les conséquences de leur décision, par exemple en leur donnant une somme fixe au début de la session dont ils ont une totale liberté de gestion. Même si ces méthodes ne sont pas exemptes de biais (par exemple un effet d'apprentissage lié à la répétition des choix dans un temps contraint), elles sont désormais privilégiées car elles conduisent à des préférences révélées (via les CAP) plus robustes.

5.2.3. Application à quelques attributs des produits d'origine animale

La plupart des études concernant la consommation des produits animaux portent sur l'une ou l'autre des catégories d'attributs (et majoritairement sur les attributs de recherche ou de croyance) et mettent en avant la difficulté à appréhender la qualité par les acheteurs (Aboah et Lees, 2020; Grunert *et al.*, 2004). Une méta-analyse récente, analyse les CAP pour les attributs de croyance de viandes et produits laitiers issus de ruminants (bovins, ovins et caprins) à partir de 94 publications (Yang et Renwick, 2018). À partir de 555 estimations de CAP, les auteurs évalue le CAP moyen supplémentaire pour ces attributs à 46%, avec un fort écart-type dépendant des produits considérés (la viande bovine ayant le surplus de CAP le plus élevé), du modèle d'estimation utilisé et de la région.

Rares sont les travaux qui allient l'évaluation de deux catégories d'attributs : citons comme exceptions les travaux récents de Meyerding *et al.* (2018) sur la viande bovine et de Sans *et al.* (2017) sur les œufs (Meyerding *et al.*, 2018 ; Sans *et al.*, 2017). Meyerding *et al*. soumettent 55 consommateurs allemands à un test d'analyse sensorielle hédonique, à un choix d'étiquettes (analyse conjointe) puis à un protocole permettant de dévoiler le CAP déclaré pour différents types de viande bovine. Les attributs testés, par combinaison sur les étiquettes, sont le prix, l'origine, les allégations de qualité (race, maturation) et d'éthique (bio, bien-être animal). Les auteurs montrent l'influence de l'étiquette sur l'évaluation sensorielle et sur le CAP : les notes d'acceptabilité globale sont supérieures pour les échantillons portant une étiquette et le CAP est plus élevé. Ce résultat indique que les consommateurs adaptent leur perception du produit à leurs attentes préalables au test sensoriel. Par ailleurs, la mention de l'origine du produit est celle qui est la plus valorisée lors de la décision d'achat, largement devant les considérations éthiques. Dans leur étude sur l'acceptabilité de différents types d'œufs (standard, bio et agroforestier), Sans *et al.* (2017) allient également un test sensoriel hédonique, un choix d'étiquettes et la révélation d'un CAP sur 181 consommateurs français : ils confirment l'importance de la révélation de l'information sur le mode d'élevage sur les préférences des consommateurs (Sans *et al.*, 2017). Ainsi, alors que les œufs standards recueillent les notes d'acceptabilité les plus élevées à l'aveugle (sans révélation de l'information sur les conditions d'élevage), ils sont les moins bien évalués après révélation de ces dernières.

L'importance des informations figurant sur l'étiquette du produit nous conduit à proposer une synthèse des résultats obtenus en matière de comportement de l'acheteur, placé en situation de choix, pour les principales thématiques concernant les produits d'origine animale. L'analyse privilégiera, lorsqu'elles existent, les méta-analyses et les revues de la littérature.

5.2.3.1. Bien-être animal

La perception du bien-être animal par les citoyens-consommateurs et leur CAP pour cet attribut de croyance d'un produit a fait l'objet d'un grand nombre de publications. Deux méta-analyses récentes sont consacrées à ce sujet : Lagerkvist *et al.* (2011) étudient 106 estimations issues de 24 articles publiés entre 1995 et 2008, concernant 4 productions (bovin, porc, poulet de chair, poule pondeuse) et utilisant essentiellement des méthodes d'évaluation hypothétiques.Les auteurs concluent à une relation positive entre le CAP et le revenu et négative avec l'âge. Par ailleurs, il existe de faibles différences de CAP selon les pays mais leur interprétation est délicate dans la mesure où les bases réglementaires ou volontaires concernant le bien-être animal sont hétérogènes. Clark *et al.* (2017) actualisent la précédente méta-analyse et l'étendent par l'inclusion d'articles émanant de la littérature grise. 335 mesures de CAP (essentiellement hypothétiques) provenant de 54 articles concernant des études menées dans 17 pays sont prises en compte. Les auteurs concluent à l'existence d'un CAP positif mais faible (représentant 0,63 fois la valeur de l'écart type) qui varie en fonction de plusieurs facteurs dont le type d'animal et la provenance du consommateur. Concernant les types de production, le CAP le plus faible est observé pour la viande porcine et les plus élevés pour la viande bovine, le lait et les œufs. Une hypothèse pour expliquer le CAP faible de la viande porcine est qu'il s'agit d'une viande bon marché pour laquelle d'autres variables intrinsèques sont prépondérantes dans le choix des consommateurs. Quant aux CAP plus élevés pour la viande bovine et l'œuf, ils pourraient s'expliquer par le statut *premium* de la première et par la segmentation réussie du marché sur des critères de modes de production pour le second. Par ailleurs, à l'instar de Lagerkvist *et al.*, les CAP des consommateurs du Nord de l'Europe et du Royaume-Uni sont plus faibles que ceux des pays du Sud de l'Europe. Une hypothèse avancée est que le premier groupe de pays a des standards de bien-être animal plus élevés que la réglementation et qu'ainsi les consommateurs sont moins sensibles à la différenciation des produits par le marché.

La méta-analyse plus ciblée proposée par Janssen *et al.* (2016) confirme l'intérêt des consommateurs pour un étiquetage sur les conditions de logement, en lien avec le bien-être animal : l'analyse de 53 articles publiés entre 2005 et 2016 et mêlant des approches quantitative (CAP) et qualitative montre que les consommateurs attachent de l'importance à l'accès au plein-air, à la densité et au type de sol en tant qu'indicateurs du bien-être des animaux et qu'au moins un segment de la population se déclare prête à payer un surprix pour des produits dont l'étiquette leur permettrait d'accéder à ces informations. Ces résultats sont cependant tempérés par Grunert *et al.* (2014) : à l'aide d'une enquête en ligne menée dans 7 pays européens et concernant 4408 répondants, les auteurs étudient la relation entre la motivation des consommateurs, la compréhension des informations et l'usage de produits étiquetés comme durables ou éthiques (dont un sur le bien-être animal). Si le niveau d'intérêt général déclaré pour ces thématiques est relativement élevé (notes moyennes comprises entre 4,47 et 5,53 sur une échelle de 7 pour les 14 propositions formulées), il ne se traduit que très faiblement au moment de la décision d'achat. Ainsi, le caractère bio du produit, son impact sur l'environnement et en termes d'éthique arrivent respectivement en 13ème, 14ème et 15ème positions (sur 16) des informations utilisées au moment de l'acte d'achat, très loin derrière le prix, la date limite de consommation (ou la date limite d'utilisation optimale), le poids et la marque. Le fait d'être une femme, une personne plus âgée ou d'avoir un niveau d'éducation élevé a un effet positif sur l'utilisation de ces informations.

Au-delà du bien-être animal au sens strict, d'autres attributs impliqués dans l'éthique des systèmes de production animale sont étudiés : citons, à titre d'illustration, l'évaluation de l'acceptabilité de consommer du lait issu de vaches clonées aux Etats-Unis (Britwum et Bernard, 2018), le CAP pour avoir la garantie que la viande bovine ne contient pas d'hormone en Allemagne et au Royaume-Uni (Lewis *et al.*, 2017) ou l'utilisation de souches de poule à double finalité (œuf et viande) pour éviter la destruction au couvoir des poussins mâles (Gangnat *et al.*, 2018). Pour cette dernière étude, menée sur 408 consommateurs suisses, l'utilisation de souches à double finalité est préférée à la destruction des poussins mâles mais aucune différence n'est constatée avec le sexage *in ovo*. Par ailleurs, le CAP est proportionnellement plus faible pour le poulet de chair (issu de ces souches) que pour les œufs. Enfin, la connaissance des systèmes de production avicole, de la problématique des souches à double finalité et la propension à acheter des produits issus de l'agriculture biologique augmente le CAP.

Ces travaux traduisent l'existence de nouvelles stratégies de résistance et de dissidences adoptées par certains acheteurs afin de consommer des produits animaux sans culpabilité (conditions d'élevage, incidence environnementales, etc.) (Clark *et al.*,

2017). Ces préoccupations conduisent certains auteurs à repenser « l'empreinte morale » des produits animaux (Saja, 2013). Ils proposent que soient pris en compte dans la définition de la qualité morale de la viande à la fois des indices de la qualité de vie des animaux pendant l'élevage, mais également des critères plus techniques et objectifs (poids, durée de vie à la ferme, efficacité temporelle dans l'acquisition de produits animaux). Ces critères plus techniques permettent selon eux d' « objectiver » et de rendre plus universel les attentes morales. Ils souhaitent élargir le spectre de la morale à un ensemble de données disponibles et y englober toutes les étapes du processus d'existence du produit animal, prenant en compte également des données liées aux individus qui produisent cette viande.

5.2.3.2. Agriculture biologique

Une méta-analyse récente compile les résultats obtenus auprès de 124 000 consommateurs interrogés dans le cadre de 150 articles publiés entre 1991 et 2016 dans le but de comprendre leurs motivations à acheter des produits bio (Massey *et al.*, 2018). Les auteurs partent du constat, qu'en dépit des faibles preuves de la supériorité des produits issus de l'agriculture biologique sur la plupart des allégations utilisées pour les commercialiser, un nombre croissant de consommateurs se tournent vers eux. Ils analysent les facteurs qui expliquent un tel comportement en utilisant deux types d'indicateurs (dérivés de ceux présents dans les publications originales) : la proportion de consommateurs estimant que les produits biologiques sont supérieurs aux produits conventionnels et une note moyenne traduisant un degré d'accord sur une échelle en 7 points. Douze facteurs sont évalués selon ces deux indicateurs : 7 attributs de croyance (*bénéfice santé*, *sécurité sanitaire*, *impact environnemental*, *bien-être animal*, *système de production*, *valeur nutritionnelle* et *qualité*), 3 attributs de recherche (*prix plus élevé*, *disponibilité du produit*, *aspect*) et 2 attributs d'expérience (*goût*, *fraîcheur*). Les résultats montrent que, si les trois classes d'attributs sont importantes, la proportion de consommateurs considérant que les produits bio sont supérieurs est plus élevée pour les attributs de croyance (66% pour le *bénéfice santé*, 62% pour la *sécurité sanitaire* et la *qualité* et 57% pour *l'impact environnemental*), que pour ceux d'expérience (45% pour le *goût*) ou de recherche (42% pour *l'aspect*). De plus, l'intensité de la perception (traduite par la note moyenne) est également supérieure pour les attributs de croyance. Par ailleurs, le comportement d'achat est fortement associé à la perception positive, qu'ont les personnes interrogées, des produits bio. A titre d'exemple, le fait d'attribuer une note élevée à la *valeur nutritionnelle* et au *goût* est associée à une forte augmentation de l'intention d'acheter. Cette augmentation est plus faible pour les attributs *impact environnemental* et *santé*. A l'inverse, l'intention d'acheter décroit lorsque la *disponibilité des produits* est questionnée alors que ce n'est pas le cas avec l'attribut *prix plus élevé*, ce qui tendrait à montrer que l'accessibilité au produit constitue la principale barrière à l'achat des produits biologiques. Même s'il a été montré qu'il existe un écart entre l'intention d'achat et l'achat effectif (*intention-behaviour gap*), le premier reste, pour les produits biologique, le meilleur prédicteur de la réalisation de l'achat (Scalco *et al.*, 2017). Il est cependant nécessaire de garder en mémoire la variabilité des comportements en fonction des catégories de produits, des moments de consommation, des lieux et des configurations collectives de consommation (Lamine, 2008). La figure du « mangeur bio intermittent » révèle la pluralité et la variabilité des pratiques alimentaires contemporaines, contrairement aux mangeurs bio « puristes » dont les pratiques sont plus codifiées et régulières. L'auteure souligne le lien santé et conversion au bio, qui s'accompagne généralement d'une « végétarisation » des pratiques culinaires.

Ces quelques exemples d'attributs donnent nécessairement une vision incomplète des thématiques abordées dans l'univers des produits animaux[53] : le lecteur pourra compléter ce panorama par d'autres marqueurs de leur différenciation tels que la

[53] Pour une analyse sur les déterminants des comportements d'achats des produits de la mer, le lecteur se reporter à la revue de Carlucci *et al.* : Carlucci, D.; Nocella, G.; De Devitiis, B.; Viscecchia, R.; Bimbo, F.; Nardone, G., 2015. Consumer purchasing behaviour towards fish and seafood products. Patterns and insights from a sample of international studies. *Appetite*, 84: 212-227. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2014.10.008 et aux articles de Rickersten *et al.* : Rickertsen, K.; Alfnes, F.; Combris, P.; Enderli, G.; Issanchou, S.; Shogren, J.F., 2017. French Consumers' Attitudes and Preferences toward Wild and Farmed Fish. *Marine Resource Economics*, 32 (1): 59-81. http://dx.doi.org/10.1086/689202, Brayden *et al.* : Brayden, W.C.; Noblet, C.L.; Evans, K.S.; Rickard, L., 2018. Consumer preferences for seafood attributes of wild-harvested and farm-raised products. *Aquaculture Economics & Management*, 22 (3): 362-382. http://dx.doi.org/10.1080/13657305.2018.1449270 et Bronnmann et Hoffmann: Bronnmann, J.; Hoffmann, J., ibid. Consumer preferences for farmed and ecolabeled turbot: A North German perspective. 342-361. http://dx.doi.org/10.1080/13657305.2018.1398788 sur la perception des techniques d'élevage ainsi qu'à ceux de Fonner et Sylvia : Fonner, R.; Sylvia, G., 2015. Willingness to Pay for Multiple Seafood Labels in a Niche Market. *Marine Resource Economics*, 30 (1): 51-70. http://dx.doi.org/10.1086/679466 et ; Carlucci *et al.* : Carlucci, D.; De Devitiis, B.; Nardone, G.; Santeramo, F.G., 2017. Certification Labels Versus Convenience Formats: What Drives the Market in Aquaculture Products? Ibid.32 (3): 295-310. http://dx.doi.org/10.1086/692091 qui explorent l'importance des informations présentes sur l'étiquetage et la question de la praticité des produits

région de production (Paustian *et al.*, 2016), la provenance montagne (Martins et Ferreira, 2017 ; Sanjuan et Khliji, 2016 ; Zuliani *et al.*, 2018) ou le circuit de commercialisation (Sanjuan *et al.*, 2012).

5.2.4. Perception des risques et bénéfices liés aux aliments

5.2.4.1. Les additifs : le cas des nitrites

Les nitrites (et leur précurseur les nitrates) sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire comme additifs à la fois, pour leur pouvoir de stabilisation de la flore bactérienne anaérobie et leur effet sur la couleur des produits. Bien qu'ancienne, leur utilisation est controversée en raison de leur potentiel impact négatif sur la santé (Bedale *et al.*, 2016) et apparaissent sur le marché des gammes de produits garantis sans nitrites (jambons cuits, saucisses surfines par exemple). Des travaux récents, combinant des méthodes qualitatives et quantitatives, se sont intéressés à l'attitude et l'intention d'achat de consommateurs vis-à-vis de produits avec un taux réduit de nitrite (ou sans nitrites) et substitution (partielle ou totale) par des composés naturels (Hung *et al.*, 2016a ; Hung et Verbeke, 2018 ; Hung *et al.*, 2016b ; Polizer Rocha *et al.*, 2019 ; Schnettler *et al.*, 2019). Les études de Hung *et al.* portent sur un échantillon de consommateurs provenant de 4 pays européens (Belgique, Pays-Bas, Italie, Allemagne). Le degré de connaissance de la problématique nitrite est faible : 45% des participants n'en ont jamais entendu parler et parmi les autres, 62% répondent correctement à au moins 4 des 6 affirmations concernant l'intérêt de l'usage des nitrites (Hung *et al.*, 2016a). Cependant, après exposition des répondants à des informations sur cet additif, la majorité d'entre eux considèrent qu'il n'est pas risqué d'en consommer en restant dans les recommandations nutritionnelles, et rejettent l'affirmation selon laquelle leur usage n'est pas réglementé. La perception positive (Hung *et al.*, 2016b) et l'intention d'achat de nouveaux produits dans lesquels les nitrites seraient partiellement remplacés par des additifs d'origine végétale sont positivement liés, par ordre décroissant d'importance (Carlucci *et al.*, 2015), à l'ouverture des répondants vis-à-vis de l'innovation dans le domaine alimentaire, au fait qu'ils valorisent positivement les additifs d'origine naturelle et qu'ils craignent l'impact sur leur santé des additifs chimiques, à leur degré de connaissance de la problématique nitrite et à un niveau de consommation moyen à élevé de produits carnés transformés. Dans la continuité de ces travaux, Hung *et al.* (2018) testent l'acceptabilité sensorielle de deux nouveaux produits (saucisse surfine / Belgique et jambon cuit/Pays-Bas) et évaluent le CAP pour les acquérir (avec un système d'enchères). L'analyse des résultats du test sensoriel ne met pas en évidence de différence significative entre les nouveaux produits et leurs homologues conventionnels. Les CAP pour les nouveaux produits sont positifs mais inférieurs au prix de référence du marché. Ils sont influencés positivement par une appréciation sensorielle globale positive, une apparence familière du produit, une couleur attendue et négativement par une couleur trop sombre. Enfin, l'ordre de la séquence dégustation/révélation d'information a une influence sur l'évaluation du CAP, influence qui diffère selon le produit étudié.

Garantir l'absence dans le produit fini ou la non utilisation au cours du processus de production et de transformation d'un intrant jugé indésirable est un axe de différenciation utilisé par certains acteurs : le développement récent en France de gamme de produits « sans antibiotiques » est un exemple.

5.2.4.2. Aliments fonctionnels et allégations santé

Bien qu'il n'existe pas de définition officielle et consensuelle à travers le monde de la notion d'aliment fonctionnel, la FUFOSE (Functional Food Science in Europe) en propose une classification en 4 catégories :

- les aliments d'origine naturelle dont l'un des composants a été transformé (ex : œufs enrichis en acides gras oméga 3, par la modification de l'alimentation de la poule pondeuse) ;
- les aliments auxquels les producteurs ajoutent un composant bénéfique pour la santé. (ex : yaourts enrichis en calcium) ;
- les aliments auxquels les industriels soustraient une substance dans le but d'en réduire l'effet néfaste sur la santé (ex : réduction de la teneur en graisse) ;
- les aliments dont l'un des ingrédients a été chimiquement transformé ;
- les aliments produits par une combinaison des situations présentées plus haut.

Devant l'intérêt croissant des consommateurs pour la valence santé de leur alimentation, et dans la mesure où le bénéfice pour la santé de la consommation d'aliments fonctionnels relève d'attributs de croyance, les allégations pouvant être véhiculées sont encadrées par des réglementations : en situation d'asymétrie d'information, il s'agit en effet de garantir que

les informations transmises aux consommateurs sont compréhensibles et non trompeuses. Elles peuvent porter sur des bénéfices nutritionnels, de santé ou les deux à la fois.

Du fait du développement plus précoce et d'une présence plus forte sur le marché par rapport aux produits carnés, les premiers travaux sur l'analyse de la perception par les consommateurs des aliments fonctionnels ont porté sur les produits laitiers, particulièrement les yaourts enrichis et les fromages réduits en taux de sel (Bonanno *et al.*, 2015 ; de-Magistris et Lopez-Galan, 2016; Ozer et Kirmaci, 2010). Ils montrent que, s'il existe bien un intérêt pour ces produits de la part des consommateurs, se traduisant par un CAP pouvant être élevé (Carlucci *et al.*, 2013), celui-ci dépend de la nature de l'ingrédient ajouté : l'acceptation est plus grande lorsque ce dernier est présent naturellement dans le produit (ex : calcium dans le yaourt), évitant ainsi la perception du caractère artificiel de l'ajout (ex : enrichissement d'un yaourt avec des acides gras omega 3).

Les travaux portant sur les produits carnés fonctionnels se sont développés plus récemment dans la continuité de la mise sur le marché de ces derniers : il s'agit d'augmenter (ou de réduire) la présence de composés actifs favorables (ou défavorables) à la santé afin de promouvoir le caractère fonctionnel de ces aliments (Grasso *et al.*, 2014; Olmedilla-Alonso *et al.*, 2013). Comme pour les produits laitiers, la perception de l'intérêt de ces modifications par les consommateurs est très variable selon le produit considéré, la nature de l'ingrédient ajouté (ou réduit), la promesse faite (allégation), les caractéristiques sociodémographiques et les attitudes des individus concernés (Strijbos *et al.*, 2016; Van Wezemael *et al.*, 2014). Par ailleurs, la recherche de l'avantage fonctionnel ne doit pas trop modifier la qualité organoleptique du produit (notamment le goût) sous peine de le disqualifier aux yeux des consommateurs (Verbeke, 2006).

Dans une étude récente menée au Brésil, Polizer Rocha *et al.* (2019) appliquent un protocole incluant des méthodes quantitatives et qualitatives sur 164 consommateurs, dans le but d'étudier la perception sur les dimensions santé et valeur nutritionnelle de huit saucisses de Francfort : *traditionnelle*, *avec des anti-oxydants naturels*, *à teneur réduite en sel*, *à teneur réduite en gras*, *enrichie en fibres*, *enrichie en acides gras omega 3*, *sans phosphates* et *sans nitrites*. Les saucisses *traditionnelles*, *sans phosphates* et *sans nitrites* obtiennent les moins bonnes notes moyennes sur les deux dimensions. Les deux dernières sont également celles pour lesquelles les intentions de goûter et de consommer fréquemment ou toujours sont les plus faibles. Ces résultats, qui valorisent les produits « enrichis en » plutôt que « sans », confirment le manque de connaissances sur l'usage des nitrites (ou nitrates) comme additifs et sur leurs effets, pointé par Bedale *et al.* (2016). Invités à former des groupes en utilisant les 8 photos de saucisses (strictement identiques à *l'exception* de la mention du type de produit) puis à expliquer ces regroupements, la majorité des consommateurs regroupent les saucisses *sans nitrites* et *sans phosphates* et utilisent des termes traduisant le caractère peu attractif du produit, des défauts de flaveur et le défaut de connaissance sur ces additifs. A l'inverse, les produits enrichis *en fibres*, *avec des acides gras omega 3* ou des *antioxydants naturels* sont considérés comme ayant un impact positif sur la santé et une meilleure qualité nutritionnelle. Ces résultats sont confirmés par la méthode de *laddering* qui permet d'identifier les sous-jacents aux regroupements effectués à l'étape précédente. La dimension santé est omniprésente et s'exprime par des préoccupations concernant la prise de poids, la tension artérielle ou les bénéfices d'une faible consommation de produits carnés alliée à une plus grande ingestion de fibres.

5.2.5. Gestion du risque par le consommateur

Les crises alimentaires successives, révélant certains pratiques de l'industrie agroalimentaire produisant des aliments non identifiables et risqués ont mises à mal la confiance du consommateur. Les stratégies de diminution du risque sont de deux ordres : rétablir la relation et la connaissance des aliments par la notion de proximité ; et améliorer l'étiquetage et l'information.

5.2.5.1. La proximité comme source de confiance

La littérature associe la notion de « circuit court » à une proximité entre le producteur et le consommateur (Leonard, 2010). Elle peut être géographique, relationnelle ou les deux à la fois. Elle met en jeu les notions de confiance, d'identité, d'enracinement, de terroir et de patrimoine (Genestier, 2006). Face aux inquiétudes engendrées par les phénomènes de délocalisation généralisée, le caractère local devient un attribut de qualité en tant que tel (Berard et Marchenay, 1995) pour lequel certains consommateurs sont disposés à payer un surprix (Printezis *et al.*, 2019). Pour être restaurée, la confiance doit s'envisager à une échelle plus petite, dans des liens et des lieux locaux, où les relations sont davantage interpersonnelles et engageantes. L'échange marchand doit créer et maintenir la confiance, gage de qualité et de vertus. Différentes stratégies se

dessinent pour réduire la distance : choisir le lieu de production des produits animaux à consommer et/ou choisir les lieux et les conditions d'approvisionnement des produits animaux commercialisés. Par exemple, Sirieix *et al*. (2009) montrent que l'ancrage régional de produits animaux tels que les œufs influence le consommateur : la moitié des consommateurs préfère un produit conventionnel régional à un produit issu de l'agriculture biologique provenant d'une zone géographique éloignée.

Pour les viandes, des recherches d'Ocejo (2014) montrent l'importance des points d'achat physiques dans la production et l'inculcation d'un « goût omnivore ». Les artisans bouchers développent un service interactif pour préparer, vendre et enseigner le bon goût de la viande, ainsi que des comptoirs à l'esthétique fonctionnelle. Ces pratiques de consommation sont celles des élites économiques et culturelles, qui usent des systèmes marchands de proximité pour trouver le goût de la qualité et de la distinction.

Du point de vue de la rationalité économique, le « panier » de type AMAP, comme le marché, peuvent engendrer un surcoût par rapport à d'autres modes d'approvisionnement (Dubuisson-Quellier et Lamine, 2004). Pour désigner ce type de calcul particulier, qui prend en considération à la fois la qualité, le prix des denrées alimentaires et les relations avec le marchand, les autres consommateurs, et les membres de la famille, Cochoy (2011) utilise la notion de « *qualcul* », qui consiste, pour les membres d'une unité de choix collective, à ajuster leur choix aux expressions de leurs partenaires, sans préjuger bien sûr de la réussite ou de la convergence de cet ajustement. Les produits alimentaires achetés s'évaluent moins en termes monétaires qu'en termes de valeur ajoutée pour la santé, pour l'écologie, pour la solidarité à l'égard des producteurs. Ainsi, la reconnexion entre producteurs et consommateurs est présentée comme faisant partie intégrante du récit de l'alimentation locale (Elias et Saussey, 2013).

Cependant, certains auteurs soutiennent qu'au lieu de dévoiler les conditions de production des produits de base, les discours les reconditionnent pour plaire aux consommateurs soucieux de l'éthique. On peut d'ailleurs se demander si les producteurs alimentaires locaux et les acheteurs de ces aliments s'entendent sur l'état d'esprit et sur la proposition de valeur qui sous-tend leur participation commune (Albrecht et Smithers, 2018). Certaines études suggèrent que de nouveaux rôles ou croyances relatives au marketing, à la relation avec les clients ou la distribution pourraient prédisposer les participants à être en faveur d'autres arrangements (sans contact direct) s'ils devenaient plus facilement disponibles et étaient capables de garantir à la fois la rentabilité du producteur et des aliments sains au consommateur (Belcher *et al.*, 2007; Ripoll, 2013). Ainsi la relation personnelle avec le producteur ou le vendeur peut se trouver remplacée par la valeur de la marque que l'on trouve sur la viande préemballée dans les supermarchés (ou par le nom du boucher-détaillant lui-même), qui deviennent alors les principaux points de référence disponibles pour le consommateur pour garantir la qualité de la viande.

Ainsi, l'engagement participatif reste problématique dans les circuits courts (Mundler, 2007). Chez tous ces consommateurs d'un nouveau type se joue certes une méfiance vis-à-vis du monde marchand mais dans le même temps le désir d'y participer. Leur rejet des systèmes d'échange existants traduit une volonté d'être acteur dans l'échange marchand (Lallement, 2010) en lui redonnant une dimension sociale centrale (Dubuisson-Quellier, 2018).

5.2.5.2. L'origine et la certification comme source de confiance

La proximité est une forme de qualité recherchée par certains consommateurs (Eymard-Duvernay, 1989 ; 1993) qui est complétée par une aspiration à la connaissance des caractéristiques des produits et des modes de production ainsi qu'à la validation de la véracité des informations transmises jusqu'à l'acheteur. L'étiquetage et la certification des produits jouent donc un rôle fondamental dans les choix de ce dernier, notamment dans les transactions opérées dans les conventions de type marchand.

La littérature existante concernant l'information des consommateurs souligne non pas l'irrationalité des consommateurs mais leurs rationalités multiples. Il est impossible de statuer sans risque de se tromper sur les types d'informations jugées les plus pertinentes ou les plus dignes de confiance, ou encore sur les canaux de communication que les consommateurs préfèrent. Ils dépendent du type de consommateurs et évoluent au gré des contextes de crises (dévalorisation soudaine de certaines marques suite à des scandales -notamment sanitaires-, confiance en baisse suite à des produits contaminés, questionnements sur l'éthique de leur production) (Costanigro *et al.*, 2016). Par ailleurs, la demande d'information du consommateur est fluctuante selon les produits : plus ils sont jugés à risque, plus l'exigence d'information est grande. L'efficacité de l'étiquetage

et la mention de l'origine des produits comme vecteurs de la confiance (pour la préserver ou la restaurer) suppose une adéquation entre les attributs retenus et ceux souhaités par les consommateurs. Cette dernière est régulièrement questionnée notamment en raison de la variabilité des attentes des acheteurs (Kehagia *et al.*, 2007) et de l'émergence régulière de nouvelles demandes : ainsi, la pertinence de la mention de l'origine du produit fait débat (Newman *et al.*, 2014; Strasek, 2010). Par ailleurs, certains travaux cherchent à comparer les effets des étiquetages et des informations mises à disposition des consommateurs selon les types de produit. Jansen *et al.* (2016) questionnent les conditions de mise en œuvre d'un étiquetage sur le modèle de l'œuf pour d'autres produits animaux tels que le lait ou la viande. Ils montrent qu'en moyenne les consommateurs ont non seulement une attitude positive à l'égard de systèmes d'élevage plus respectueux du bien-être des animaux avec un accès extérieur et un espace suffisant, mais ils sont également disposés à payer un prix plus élevé pour les produits issus de tels systèmes.

Cette question du choix des attributs du produit (y compris le mode de production) communiqués aux consommateurs constitue une problématique d'une grande acuité dans le domaine des produits alimentaires pour limiter la saturation et les possibles confusions. La littérature en sociologie de l'alimentation ne cesse de rappeler la difficulté pour le consommateur de trier l'ensemble des informations disponibles parfois contradictoires et émanant de différentes sources, et de ne pas se sentir perdu ou en situation d'inconfort intellectuel. Cette confusion est particulièrement bien documentée et analysée pour les produits issus de l'agriculture biologique (Abrams *et al.*, 2010) : ainsi, Dekhili et Achabou (2013), dans leur étude sur la pertinence d'une double labélisation biologique/écologique, soulignent que la signalisation peut engendrer une confusion chez les consommateurs dans le cas de surimposition de signes. L'intérêt porté à l'alimentation de la part d'un nombre croissant d'acheteurs s'accompagne d'une meilleure connaissance des caractéristiques des aliments (Schleenbecker et Hamm, 2013), avec pour conséquences une modification des rapports à la certification et une redéfinition du standard de production et de certification. Le terme « biologique » est alors employé de manière très générique et fait référence non plus à une certification biologique mais à un mode de production défini autour d'une approche commune de la qualité. Dire d'un produit qu'il est bio ne signifie donc pas qu'il possède le label AB mais souligne avant tout la qualité d'un produit et la confiance avec un producteur. La qualité est alors définie par des éléments plus usuels tels que les perceptions organoleptiques, le face à face avec le producteur et les relations d'interconnaissance (Cairns et Johnston, 2018).

5.3. Conclusions

En conclusion de ce chapitre, nous retenons que le choix des consommateurs fait intervenir l'évaluation *ex ante* et *ex post* d'un certain nombre d'attributs du produit. Celle-ci est sous l'influence de facteurs personnels qui incluent des caractéristiques sociodémographiques mais aussi psychologiques (valeurs, croyances…) et des facteurs contextuels ou situationnels (occasion, lieu d'achat…). Comprendre l'arbitrage du consommateur suppose d'intégrer cette dimension multi-attributs tout en essayant de déceler la hiérarchie de ceux-ci. Ainsi, les attributs de sécurité sanitaire priment souvent pour les produits d'origine animale (Viegas *et al.*, 2014). Les exemples traités montrent la grande variabilité des préférences et la complexité de l'appréhension des arbitrages. Ils conduisent à deux constats :

- d'un point de vue méthodologique, il est nécessaire de se placer dans des conditions les plus réalistes possibles afin de minimiser les biais dans la révélation des préférences des consommateurs : en ce sens, les protocoles d'économie expérimentale constituent une avancée notoire.

- au plan pratique, la diversité des comportements et l'existence de segments de consommateurs militent pour des stratégies différenciées de la part des acteurs du marché et des Pouvoirs Publics (Vanhonacker et Verbeke, 2014; Verain *et al.*, 2012). La perception d'une information (intérêt, capacité à la comprendre) est très variable d'un individu à un autre et selon les sujets traités : ainsi, les consommateurs de produits carnés qui n'ont pas envie de remettre en question leur diète privilégient des sources d'information commerciales (fabricants) plutôt que scientifiques car elles sont plus aisément compréhensibles et ne remettent pas en cause leurs motivations à consommer de la viande (Vainio, 2019 ; Vainio *et al.*, 2018). Identifier des groupes cibles, sensibles à telle ou telle problématique, permet, d'une part, la conception de produits répondants mieux aux attentes, d'autre part la mise en place de stratégies différenciées destinées à promouvoir leur vente (voir chapitre 6). Cette question du choix et des rapports au risque ne peut se comprendre que reliée à celle des connaissances disponibles et de l'accès aux savoirs, renvoyant – entre autres – au rôle et à l'impact des médias quant à la définition et la mise en lumière de la qualité des produits animaux. Dans le cadre des circuits courts, lorsque les intermédiaires sont réduits au minimum, la définition de la

qualité est issue de la confiance qui s'établit entre consommateur et producteur : l'étiquetage ou la labélisation peuvent sembler superflus. En revanche, ces derniers s'avèrent nécessaires lorsqu'il s'agit de s'approvisionner en circuits longs.

Cette revue de littérature a également permis d'identifier les critères sur lesquels le législateur définit la qualité des aliments d'origine animale. Ces choix se révèlent en adéquation ou en décalage à ceux pertinents pour les consommateurs dans l'arbitrage de leurs choix. Le législateur satisfait en partie les exigences des consommateurs, au travers de la réglementation limitant les risques liés à la production d'aliments nouveaux, sur la composition et la dénomination des produits à base de chairs animales, sur la teneur en certains contaminants comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les viandes fumées, ou encore sur les modalités de consommation des produits animaux (température et durée de conservation). La réglementation s'oriente également vers une information permettant d'identifier une denrée alimentaire acceptable pour les végétariens ou les végétaliens. Cependant, l'avancement de la réglementation en faveur de la santé des consommateurs et de la limitation des risques alimentaires doit composer avec la défense d'intérêts économiques ou politiques qui peuvent aller à l'encontre du désir de proximité, à la fois physique et sociale, avec les producteurs et les aliments mangés. De même, si d'autres pays ont vu naître des réglementations concernant la limitation de la consommation des produits animaux, en France, les cantines scolaires ont encore l'obligation de servir des repas contenant des protéines animales.

Références bibliographiques

Aboah, J.; Lees, N., 2020. Consumers use of quality cues for meat purchase: Research trends and future pathways. *Meat Science*, 166: 108142. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108142

Abrams, K.M.; Meyers, C.A.; Irani, T.A., 2010. Naturally confused: consumers' perceptions of all-natural and organic pork products. *Agriculture and Human Values*, 27 (3): 365-374. http://dx.doi.org/10.1007/s10460-009-9234-5

Albrecht, C.; Smithers, J., 2018. Reconnecting through local food initiatives? Purpose, practice and conceptions of 'value'. *Agriculture and Human Values*, 35 (1): 67-81. http://dx.doi.org/10.1007/s10460-017-9797-5

Arayess, S.; Jeukens, F., 2018. The Netherlands · Alpro's Dairy Alternatives: What Is Allowed and What Is Not in the Light of ECJ's TofuTown? *European Food and Feed Law Review*, 13 (1): 55-57.

Bähr, C.C., 2015. Greenhouse Gas Taxes on Meat Products: A Legal Perspective. *Transnational Environmental Law*, 4 (01): 153-179. http://dx.doi.org/10.1017/S2047102515000011

Bajzelj, B.; Richards, K.S.; Allwood, J.M.; Smith, P.; Dennis, J.S.; Curmi, E.; Gilligan, C.A., 2014. Importance of food-demand management for climate mitigation. *Nature Climate Change*, 4 (10): 924-929. http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2353

Beck, U., 2001. *La société du risque. Vers une nouvelle modernité*. Paris: Flammarion.

Bedale, W.; Sindelar, J.J.; Milkowski, A.L., 2016. Dietary nitrate and nitrite: Benefits, risks, and evolving perceptions. *Meat Science*, 120: 85-92. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.03.009

Belcher, K.W.; Germann, A.E.; Schmutz, J.K., 2007. Beef with environmental and quality attributes: Preferences of environmental group and general population consumers in Saskatchewan, Canada. *Agriculture and Human Values*, 24 (3): 333-342. http://dx.doi.org/10.1007/s10460-007-9069-x

Berard, L.; Marchenay, P., 1995. Lieux, temps et preuves. La construction sociale des produits de terroir. *Terrain*, n°24 (24): 153-164. http://dx.doi.org/10.4000/terrain.3128

Bolton, B., 2017. Dairy's Monopoly on Words: the Historical Context and Implications of the *Tofu Town* Decision. *European Food and Feed Law Review*, 12 (5): 422-430.

Bombardier, J., 2018. Fabrication et distribution d'un produit : de la mise sur le marché à la gestion des risques, quelles obligations et sanctions pour les professionnels ? . *Revue de Droit Rural*, déc. 2018 (n°468): étude 24.

Bonanno, A.; Huang, R.; Liu, Y.Z., 2015. Simulating welfare effects of the European nutrition and health claims' regulation: the Italian yogurt market. *European Review of Agricultural Economics*, 42 (3): 499-533. http://dx.doi.org/10.1093/erae/jbu033

Boy, L., 2007. Les programmes d'étiquetage écologique en Europe. *Revue internationale de droit économique*, t. XXI, 1 (1): 5-25. http://dx.doi.org/10.3917/ride.211.0005

Branlard, J.P., 2014. La table et le droit, Décisions de justices gourmandes : 50 commentaires. In: Paris, ed. *LexisNexis*. p. 119.

Brayden, W.C.; Noblet, C.L.; Evans, K.S.; Rickard, L., 2018. Consumer preferences for seafood attributes of wild-harvested and farm-raised products. *Aquaculture Economics & Management*, 22 (3): 362-382. http://dx.doi.org/10.1080/13657305.2018.1449270

Britwum, K.; Bernard, J.C., 2018. A field experiment on consumer willingness to accept milk that may have come from cloned cows. *Food Policy*, 74: 1-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.10.006

Bronnmann, J.; Hoffmann, J., 2018. Consumer preferences for farmed and ecolabeled turbot: A North German perspective. *Aquaculture Economics & Management*, 22 (3): 342-361. http://dx.doi.org/10.1080/13657305.2018.1398788

Cairns, K.; Johnston, J., 2018. On (not) knowing where your food comes from: meat, mothering and ethical eating. *Agriculture and Human Values*, 35 (3): 569-580. http://dx.doi.org/10.1007/s10460-018-9849-5

Carlucci, D.; De Devitiis, B.; Nardone, G.; Santeramo, F.G., 2017. Certification Labels Versus Convenience Formats: What Drives the Market in Aquaculture Products? *Marine Resource Economics*, 32 (3): 295-310. http://dx.doi.org/10.1086/692091

Carlucci, D.; Nocella, G.; De Devitiis, B.; Viscecchia, R.; Bimbo, F.; Nardone, G., 2015. Consumer purchasing behaviour towards fish and seafood products. Patterns and insights from a sample of international studies. *Appetite*, 84: 212-227. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2014.10.008

Carlucci, D.; Stasi, A.; Nardone, G.; Seccia, A., 2013. Explaining Price Variability in the Italian Yogurt Market: A Hedonic Analysis. *Agribusiness*, 29 (2): 194-206. http://dx.doi.org/10.1002/agr.21332

Choquet, U., 2015. *Les exceptions environnementales et sanitaires dans la jurisprudence de l'OMC*. Thèse de doctorat Droit. Université de Nice, Nice. http://www.theses.fr/2015NICE0030

Clark, B.; Stewart, G.B.; Panzone, L.A.; Kyriazakis, I.; Frewer, L.J., 2017. Citizens, consumers and farm animal welfare: A meta-analysis of willingness-to-pay studies. *Food Policy*, 68: 112-127. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.01.006

Cochoy, F., 2011. Le "qualcul" économique du consommateur : ce qui s'échange autour d'un chariot. *L'Année sociologique*, 61 (2011/1): 71-101. http://dx.doi.org/10.3917/anso.111.0071

Commission européenne, 2002. Règlement (CE) n°178/2002 du Parlement européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires. *JOUE L 031 du 01.02.2002, p. 1-24*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32002R0178

Commission européenne, 2004a. Règlement (CE) n°852/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 relatif à l'hygiène des denrées alimentaires. *JOUE L 139 du 30/04/2004, p.1-54*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004R0852

Commission européenne, 2004b. Règlement (CE) n°853/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale. *JOUE L 139 du 30/04/2004, p.55 -205*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004R0853

Commission européenne, 2010. Décision 2010/791/UE de la Commission du 20 décembre 2010 établissant la liste des produits visés à l'annexe XII, point III 1, deuxième alinéa, du règlement (CE) n°1234/2007 du Conseil [notifiée sous le numéro C(2010) 8434]. *JOUE L 336 du 21.12.2010, p. 55–59*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32010D0791

Conseil national de l'alimentation, 2001. *Le principe de précaution et la responsabilité dans le domaine alimentaire*. Paris: CNA, 36 p.

Conseil suédois de l'Agriculture, 2013. *La consommation de viande durable : qu'est-ce que c'est ? Comment y parvenir ? qui la possibilité de taxer le consommateur sur chaque type de viande (bœuf, volaille, porc), voire sur tout aliment lié à des émissions élevées de gaz à effet de serre (GES)*: Rapport du Conseil suédois de l'Agriculture du 22 janvier 2013, 82 p. http://www.jordbruksverket.se/download/18.5df17f1c13c13e5bc4f800039403/En+h%C3%A5llbar+k%C3%B6ttkonsumtion.pdf

Costanigro, M.; Deselnicu, O.; McFadden, D.T., 2016. Product differentiation via corporate social responsibility: consumer priorities and the mediating role of food labels. *Agriculture and Human Values*, 33 (3): 597-609. http://dx.doi.org/10.1007/s10460-015-9640-9

Cuq, M., 2016. *L'alimentation en droit international*. Thèse de doctorat en droit public. Université Paris 10, Paris. 702 p.

Dangy, L., 2018. *S'affronter pour réguler : le conflit transatlantique sur le bœuf aux hormones dans l'organisation internationale du commerce agroalimentaire*. Thèse de doctorat. Université Lumière Lyon 2, Lyon.

Darby, M.R.; Karni, E., 1973. Free Competition and the Optimal Amount of Fraud. *Journal of Law & Economics*, 16 (1): 67-88. http://dx.doi.org/10.1086/466756

de-Magistris, T.; Lopez-Galan, B., 2016. Consumers' willingness to pay for nutritional claims fighting the obesity epidemic: the case of reduced-fat and low salt cheese in Spain. *Public Health*, 135: 83-90. http://dx.doi.org/10.1016/j.puhe.2016.02.004

Dekhili, S.; Akli Achabou, M., 2013. Pertinence d'une double labellisation biologique-écologique auprès des consommateurs. Une application au cas des œufs. *Économie rurale*, 336: 41-59. http://dx.doi.org/10.4000/economierurale.4002

Del Cont, V.C.; Friant-Perrot, M., 2011. Quel cadre normatif pour la viande clonée : enjeux sociaux, éthiques et juridiques. *Droit, sciences et techniques : quelles responsabilités*. Lexisnexis, Collection « Colloques et débats », 345-366.

Devine, C.M.; Connors, M.; Bisogni, C.A.; Sobal, J., 1998. Life-course influences on fruit and vegetable trajectories: Qualitative analysis of food choices. *Journal of Nutrition Education*, 30 (6): 361-370. http://dx.doi.org/10.1016/s0022-3182(98)70358-9

Dubuisson-Quellier, S., 2006. De la routine à la délibération. Les arbitrages des consommateurs en situation d'achat. *Réseaux*, 135-136: 253-284.

Dubuisson-Quellier, S., 2018. *La consommation engagée*. Paris: Presses de sciences po, 160 p.

Dubuisson-Quellier, S.; Lamine, C., 2004. Faire le marché autrement. L'abonnement à un panier de fruits et de légumes comme forme d'engagement politique des consommateurs. *Sciences de la société*, 62: 144-167.

Dumont, B.; Dupraz, P.; Aubin, J.; Batka, M.; Beldame, D.; Boixadera, J.; Bousquet-Melou, A.; Benoit, M.; Bouamra-Mechemache, Z.; Chatellier, V.; Corson, M.S.; Delaby, L.; Delfosse, C.; Donnars, C.; Dourmad, J.Y.; Duru, M.; Edouard, N.; Fourat, E.; Frappier, L.; Friant-Perrot, M.; Gaigné, C.; Girard, A.; Guichet, J.L.; Haddad, N.; Havlik, P.; Hercule, J.;

Hostiou, N.; Huguenin-Elie, O.; Klumpp, K.; Langlais, A.; Lemauviel-Lavenant, S.; Le Perchec, S.; Lepiller, O.; Letort, E.; Levert, F.; Martin, B.; Méda, B.; Mognard, E.L.; Mougin, C.; Ortiz, C.; Piet, L.; Pineau, T.; Ryschawy, J.; Sabatier, R.; Turolla, S.; Veissier, I.; Verrier, E.; Vollet, D.; Van Der Werf, H.; Wilfart, A., 2016. *Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Rapport final*, 1032 p.

Edjabou, L.D.; Smed, S., 2013. The effect of using consumption taxes on foods to promote climate friendly diets - The case of Denmark. *Food Policy*, 39: 84-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.12.004

Elias, M.; Saussey, M., 2013. 'The Gift that Keeps on Giving': Unveiling the Paradoxes of Fair Trade Shea Butter. *Sociologia Ruralis*, 53 (2): 158-179. http://dx.doi.org/10.1111/soru.12007

Eymard-Duvernay, F., 1989. Conventions de qualité et formes de coordination. *Revue économique*: 329-359. http://dx.doi.org/10.2307/3502117

Eymard-Duvernay, F., 1993. La négociation de la qualité. *Économie rurale*, 217 (1): 12-17. http://dx.doi.org/10.3406/ecoru.1993.4561

Fonner, R.; Sylvia, G., 2015. Willingness to Pay for Multiple Seafood Labels in a Niche Market. *Marine Resource Economics*, 30 (1): 51-70. http://dx.doi.org/10.1086/679466

Font-i-Furnols, M.; Guerrero, L., 2014. Consumer preference, behavior and perception about meat and meat products: An overview. *Meat Science*, 98 (3): 361-371. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.025

Gangnat, I.D.M.; Mueller, S.; Kreuzer, M.; Messikommer, R.E.; Siegrist, M.; Visschers, V.H.M., 2018. Swiss consumers' willingness to pay and attitudes regarding dual-purpose poultry and eggs. *Poultry Science*, 97 (3): 1089-1098. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex397

Genestier, P., 2006. L'expression « lien social » : un syntagme omniprésent, révélateur d'une évolution paradigmatique. *Espaces et sociétés*, 126 (3): 19-34. http://dx.doi.org/10.3917/esp.126.0019

Godfray, H.C.J.; Aveyard, P.; Garnett, T.; Hall, J.W.; Key, T.J.; Lorimer, J.; Pierrehumbert, R.T.; Scarborough, P.; Springmann, M.; Jebb, S.A., 2018. Meat consumption, health, and the environment. *Science*, 361 (6399). http://dx.doi.org/10.1126/science.aam5324

Grasso, S.; Brunton, N.P.; Lyng, J.G.; Lalor, F.; Monahan, F.J., 2014. Healthy processed meat products - Regulatory, reformulation and consumer challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 39 (1): 4-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.006

Grunert, K.G.; Bredahl, L.; Brunso, K., 2004. Consumer perception of meat quality and implications for product development in the meat sector - a review. *Meat Science*, 66 (2): 259-272. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00130-x

Grunert, K.G.; Hieke, S.; Wills, J., 2014. Sustainability labels on food products: Consumer motivation, understanding and use. *Food Policy*, 44: 177-189. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.12.001

Henchion, M.M.; McCarthy, M.; Resconi, V.C., 2017. Beef quality attributes: A systematic review of consumer perspectives. *Meat Science*, 128: 1-7. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.01.006

Hintermeyer, P., 2007. Cultures du risque. *Revue des Sciences sociales*, 38: 12-19.

Hung, Y.; de Kok, T.M.; Verbeke, W., 2016a. Consumer attitude and purchase intention towards processed meat products with natural compounds and a reduced level of nitrite. *Meat Science*, 121: 119-126. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.06.002

Hung, Y.; Verbeke, W., 2018. Sensory attributes shaping consumers' willingness-to-pay for newly developed processed meat products with natural compounds and a reduced level of nitrite. *Food Quality and Preference*, 70: 21-31. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.02.017

Hung, Y.; Verbeke, W.; de Kok, T.M., 2016b. Stakeholder and consumer reactions towards innovative processed meat products: Insights from a qualitative study about nitrite reduction and phytochemical addition. *Food Control*, 60: 690-698. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.002

Janssen, M.; Rodiger, M.; Hamm, U., 2016. Labels for Animal Husbandry Systems Meet Consumer Preferences: Results from a Meta-analysis of Consumer Studies. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 29 (6): 1071-1100. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-016-9647-2

Kahneman, D., 2011 *Thinking, fast and slow*. New York: Farrar, Straus and Giroux.

Kaur, N.; Singh, D.P., 2017. Deciphering the consumer behaviour facets of functional foods: A literature review. *Appetite*, 112: 167-187. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2017.01.033

Kehagia, O.; Chrysochou, P.; Chryssochoidis, G.; Krystallis, A.; Linardakis, M., 2007. European consumers' perceptions, definitions and expectations of traceability and the importance of labels, and the differences in these perceptions by product type. *Sociologia Ruralis*, 47 (4): 400-416. http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-9523.2007.00445.x

Lagerkvist, C.J.; Hess, S., 2011. A meta-analysis of consumer willingness to pay for farm animal welfare. *European Review of Agricultural Economics*, 38 (1): 55-78. http://dx.doi.org/10.1093/erae/jbq043

Lahteenmaki-Uutela, A.; Grmelova, N., 2016. European law on insects in food and feed. *European Food and Feed Law Review*, 11 (1): 2-8.

Lallement, E., 2010. Ruptures, abandons, déplacements. Ethnologie des pratiques alternatives de consommation et d'échange. *Sociologies pratiques*, 2001/1 (20): 23-36. http://dx.doi.org/10.3917/sopr.020.0023

Lamine, C., 2008. *Les intermittents du bio: pour une sociologie pragmatique des choix alimentaires émergents*. Paris: Quae, 341 p.

Leonard, V., 2010. *Essai de typologie des modes de commercialisation des produits fermiers en circuits courts*. Gembloux: ULG, Observatoire de la consommation alimentaire, 23 p.

Lepiller, O.; Fourat, E.; Mognard, E., 2016. *Evolutions et facteurs socioculturels de la consommation d'aliments d'origine animale en France et en Europe : état des connaissances*. Paris: INRA, Rôles, impacts et services issus des élevages et de leurs produits (Rapport d'expertise collective INRA-DEPE.

Lewis, K.E.; Grebitus, C.; Colson, G.; Hu, W., 2017. German and British Consumer Willingness to Pay for Beef Labeled with Food Safety Attributes. *Journal of Agricultural Economics*, 68 (2): 451-470. http://dx.doi.org/10.1111/1477-9552.12187

Lombardini, C.; Lankoski, L., 2013. Forced Choice Restriction in Promoting Sustainable Food Consumption: Intended and Unintended Effects of the Mandatory Vegetarian Day in Helsinki Schools. *Journal of Consumer Policy*, 36 (2): 159-178. http://dx.doi.org/10.1007/s10603-013-9221-5

Marteau, T.M., 2017. Towards environmentally sustainable human behaviour: targeting non-conscious and conscious processes for effective and acceptable policies. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 375 (2095). http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0371

Martins, N.; Ferreira, I.C.F.R., 2017. Mountain food products: A broad spectrum of market potential to be exploited. *Trends in Food Science & Technology*, 67: 12-18. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.013

Massey, M.; O'Cass, A.; Otahal, P., 2018. A meta-analytic study of the factors driving the purchase of organic food. *Appetite*, 125: 418-427. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2018.02.029

Meyerding, S.G.H.; Gentz, M.; Altmann, B.; Meier-Dinkel, L., 2018. Beef quality labels: A combination of sensory acceptance test, stated willingness to pay, and choice-based conjoint analysis. *Appetite*, 127: 324-333. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2018.05.008

Moreno, M.E.; Berman, J., 2019. Can Nondairy Beverages Be Called Milk? *Scitech Lawyer*, 15 (2): 24-30.

Mundler, P., 2007. Les Associations pour le maintien de l'agriculture paysanne (AMAP) en Rhône-Alpes, entre marché et solidarité. *Ruralia. Sciences sociales et mondes ruraux contemporains*, 20: 25 p. http://journals.openedition.org/ruralia/1702

Nemes, N., 2009. *Comparative analysis of organic and non-organic farming systems: A critical assessment of farm profitability* Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 33 p. http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/011/ak355e/ak355e00.pdf

Newman, C.L.; Turri, A.M.; Howlett, E.; Stokes, A., 2014. Twenty Years of Country-of-Origin Food Labeling Research: A Review of the Literature and Implications for Food Marketing Systems. *Journal of Macromarketing*, 34 (4): 505-519. http://dx.doi.org/10.1177/0276146714529306

Ocejo, R.E., 2014. Show the animal: Constructing and communicating new elite food tastes at upscale butcher shops. *Poetics*, 47: 106-121. http://dx.doi.org/10.1016/j.poetic.2014.10.006

Olmedilla-Alonso, B.; Jimenez-Colmenero, F.; Sanchez-Muniz, F.J., 2013. Development and assessment of healthy properties of meat and meat products designed as functional foods. *Meat Science*, 95 (4): 919-930. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.03.030

Ozer, B.H.; Kirmaci, H.A., 2010. Functional milks and dairy beverages. *International Journal of Dairy Technology*, 63 (1): 1-15. http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-0307.2009.00547.x

Paustian, M.; Reinecke, F.E.; Theuvsen, L., 2016. Consumer preferences for regional meat products. *British Food Journal*, 118 (11): 2761-2780. http://dx.doi.org/10.1108/bfj-01-2016-0002

Peretti-Watel, P., 2010. *La société du risque*. Paris: La Découverte.

Polizer Rocha, Y.J.; de Noronha, R.L.F.; Trindade, M.A., 2019. Understanding the consumer's perception of traditional frankfurters and frankfurters with healthy attributes through sorting task and hard laddering techniques. *Meat Science*, 149: 70-78. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.11.004

Printezis, I.; Grebitus, C.; Hirsch, S., 2019. The price is right!? A meta-regression analysis on willingness to pay for local food. *Plos One*, 14 (5). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0215847

République Française, 1988. Décret n°88-1206 du 30 décembre 1988 portant application de la loi du 1er août 1905 sur les fraudes et falsifications en matière de produits ou de services et de la loi du 2 juillet 1935 tendant à l'organisation et à l'assainissement du marché du lait en ce qui concerne les fromages.

République Française, 2001. Décret n°2001-1097 du 16 novembre 2001 relatif au traitement par ionisation des denrées destinées à l'alimentation humaine ou animale. *JORF n°272 du 23 novembre 2001, p. 18648*.

République Française, 2002. Décret n°2002-256 du 22 février 2002 portant modification du décret n° 88-1206 du 30 décembre 1988, en application de l'article L. 214-1 du code de la consommation et relatif aux fromages. *JORF n°48 du 26 février 2002, p. 3590*.

République Française, 2010. Arrêté du 15 juin 2010 modifiant l'arrêté du 17 mars 1992 relatif aux conditions auxquelles doivent satisfaire les abattoirs d'animaux de boucherie pour la production et la mise sur le marché de viandes fraîches et déterminant les conditions de l'inspection sanitaire de ces établissements.

République Française, 2011. Arrêté du 30 septembre 2011 relatif à la qualité nutritionnelle des repas servis dans le cadre de la restauration scolaire. *JORF n°0229 du 2 octobre 2011*.

République Française, 2012. Décret n°2012-128 du 30 janvier 2012 relatif à l'étiquetage des denrées alimentaires issues de filières qualifiées « sans organismes génétiquement modifiés ». *JORF n°0026 du 31 janvier 2012 p. 1770*.

République Française, 2016a. Arrêté du 28 septembre 2016 fixant les seuils prévus par le décret n° 2016-1137 du 19 août 2016 relatif à l'indication de l'origine du lait et du lait et des viandes utilisés en tant qu'ingrédient. *JORF n°0228 du 30 septembre 2016*.

République Française, 2016b. Décret n°2016-1137 du 19 août 2016 relatif à l'indication de l'origine du lait et du lait et des viandes utilisés en tant qu'ingrédient. *JORF n°0194 du 21 août 2016 texte n° 18*. https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000033053008&categorieLien=id

République Française, 2018a. Décret n°2018-1239 du 24 décembre 2018 relatif à l'indication de l'origine du lait et du lait et des viandes utilisés en tant qu'ingrédient. *JORF n°0298 du 26 décembre 2018*.

République Française, 2018b. Loi n°2018-938 du 30 octobre 2018 pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous. *JORF n°0253 du 1 novembre 2018*.

Rickertsen, K.; Alfnes, F.; Combris, P.; Enderli, G.; Issanchou, S.; Shogren, J.F., 2017. French Consumers' Attitudes and Preferences toward Wild and Farmed Fish. *Marine Resource Economics*, 32 (1): 59-81. http://dx.doi.org/10.1086/689202

Ripoll, F., 2013. Chapitre 6/Forces et faiblesses des amap et dispositifs apparentés. *Résister au quotidien?* : Presses de Sciences Po (PFNSP), 161-188.

Saja, K., 2013. The moral footprint of animal products. *Agriculture and Human Values*, 30 (2): 193-202. http://dx.doi.org/10.1007/s10460-012-9402-x

Sanjuan, A.I.; Khliji, S., 2016. Urban Consumers' Response to the EU Food Mountain Labelling: An Empirical Application in Southern Europe. *New Medit: Mediterranean Journal of Economics, Agriculture and Environment*, 15 (1): 72-80. http://newmedit.iamb.it/static_content,185,185,new-medit.htm

Sanjuan, A.I.; Resano, H.; Zeballos, G.; Sans, P.; Panella-Riera, N.; Campo, M.M.; Khliji, S.; Guerrero, A.; Oliver, M.A.; Sañudo, C.; Santolaria, P., 2012. Consumers' willingness to pay for beef direct sales. A regional comparison across the Pyrenees. *Appetite*, 58 (3): 1118-1127. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2012.03.001

Sans, P.; Olivier-Salvagnac, V.; Montian, G.; Pichon, F.; Monce, T., 2017. Perception par les consommateurs des qualités de l'oeuf de poule produit dans un élevage en agroforesterie. *12. Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*. Tours, np.

Scalco, A.; Noventa, S.; Sartori, R.; Ceschi, A., 2017. Predicting organic food consumption: A meta-analytic structural equation model based on the theory of planned behavior. *Appetite*, 112: 235-248. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2017.02.007

Schleenbecker, R.; Hamm, U., 2013. Consumers' perception of organic product characteristics. A review. *Appetite*, 71: 420-429. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2013.08.020

Schnettler, B.; Ares, G.; Sepúlveda, N.; Bravo, S.; Villalobos, B.; Hueche, C.; Lobos, G., 2019. Are consumers willing to pay more for reformulated processed meat products in the context of the implementation of nutritional warnings? Case study with frankfurters in Chile. *Meat Science*, 152: 104-108. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.02.007

Sirieix, L.; Pernin, J.L.; Schaer, B., 2009. L'enjeu de la provenance régionale pour l'agriculture biologique. *Carrefours de l'Innovation Agronomique*, 4: 401-407.

Steenkamp, J., 1990. Conceptual-model of the quality perception process. *Journal of Business Research*, 21 (4): 309-333. http://dx.doi.org/10.1016/0148-2963(90)90019-a

Strack, F.; Deutsch, R., 2004. Reflective and impulsive determinants of social behavior. *Personality and Social Psychology Review*, 8 (3): 220-247. http://dx.doi.org/10.1207/s15327957pspr0803_1

Strasek, R., 2010. Empirical testing of correlations between the effects of country-of-origin and consumer perceptions. *Worlds Poultry Science Journal*, 66 (1): 39-51. http://dx.doi.org/10.1017/s004393391000005x

Strijbos, C.; Schluck, M.; Bui, T.; de Jong, I.; van Leeuwen, M.; von Tottleben, M.; van Breda, S.G., 2016. Consumer awareness and credibility factors of health claims on innovative meat products in a cross-sectional population study in the Netherlands. *Food Quality and Preference*, 54: 13-22. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2016.06.014

Thow, A.M.; Jan, S.; Leeder, S.; Swinburn, B., 2010. The effect of fiscal policy on diet, obesity and chronic disease: a systematic review. *Bulletin of the World Health Organization*, 88 (8): 609-614. http://dx.doi.org/10.2471/BLT.09.070987

Union Européenne, 2011. Règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, modifiant les règlements (CE) n°1924/2006 et (CE) n°1925/2006 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 87/250/CEE de la Commission, la directive 90/496/CEE du Conseil, la directive 1999/10/CE de la Commission, la directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/67/CE et 2008/5/CE de la Commission et le règlement (CE) n°608/2004 de la Commission Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *JOUE L 304 du 22/11/2011 p. 0018–0063*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32011R1169&qid=1469527903985

Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012R1151

Union Européenne, 2013. Règlement (UE) n°1308/2013 du Parlement européen et du Conseil du 17 décembre 2013 portant organisation commune des marchés des produits agricoles et abrogeant les règlements (CEE) n ° 922/72, (CEE) n ° 234/79, (CE) n ° 1037/2001 et (CE) n ° 1234/2007 du Conseil. *JOUE L 347 du 20/12/2013 p. 671–854*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32013R1308&qid=1469534024402

Union Européenne, 2015. Règlement (UE) 2015/2283 du Parlement européen et du Conseil du 25 novembre 2015 relatif aux nouveaux aliments, modifiant le règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant le règlement (CE) n°258/97 du Parlement européen et du Conseil et le règlement (CE) n°1852/2001 de la Commission (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 327 du 11.12.2015, p. 1-22*.

Union Européenne, 2017. Règlement (UE) 2017/625 du Parlement européen et du Conseil du 15 mars 2017 concernant les contrôles officiels et les autres activités officielles servant à assurer le respect de la législation alimentaire et de la législation relative aux aliments pour animaux ainsi que des règles relatives à la santé et au bien-être des animaux, à la santé des végétaux et aux produits phytopharmaceutiques. *JOUE L 95 du 07.04.2017*.

Vainio, A., 2019. How consumers of meat-based and plant-based diets attend to scientific and commercial information sources: Eating motives, the need for cognition and ability to evaluate information. *Appetite*, 138: 72-79. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2019.03.017

Vainio, A.; Irz, X.; Hartikainen, H., 2018. How effective are messages and their characteristics in changing behavioural intentions to substitute plant-based foods for red meat? The mediating role of prior beliefs. *Appetite*, 125: 217-224. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2018.02.002

Van Wezemael, L.; Caputo, V.; Nayga, R.M.; Chryssochoidis, G.; Verbeke, W., 2014. European consumer preferences for beef with nutrition and health claims: A multi-country investigation using discrete choice experiments. *Food Policy*, 44: 167-176. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2013.11.006

Vanhonacker, F.; Verbeke, W., 2014. Public and Consumer Policies for Higher Welfare Food Products: Challenges and Opportunities. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 27 (1): 153-171. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-013-9479-2

Verain, M.C.D.; Bartels, J.; Dagevos, H.; Sijtsema, S.J.; Onwezen, M.C.; Antonides, G., 2012. Segments of sustainable food consumers: a literature review. *International Journal of Consumer Studies*, 36 (2): 123-132. http://dx.doi.org/10.1111/j.1470-6431.2011.01082.x

Verbeke, W., 2006. Functional foods: Consumer willingness to compromise on taste for health? *Food Quality and Preference*, 17 (1-2): 126-131. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2005.03.003

Viegas, I.; Nunes, L.C.; Madureira, L.; Fontes, M.A.; Santos, J.L., 2014. Beef Credence Attributes: Implications of Substitution Effects on Consumers' WTP. *Journal of Agricultural Economics*, 65 (3): 600-615. http://dx.doi.org/10.1111/1477-9552.12067

Wellesley, L.; Froggatt, A.; Happer, C., 2015. *Changing Climate, Changing diets: Pathways to Lower Meat Consumption*. London: Chatham House, 76 p. https://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/publications/research/CHHJ3820%20Diet%20and%20climate%20change%2018.11.15_WEB_NEW.pdf

Wirsenius, S.; Hedenus, F.; Mohlin, K., 2011. Greenhouse gas taxes on animal food products: rationale, tax scheme and climate mitigation effects. *Climatic Change*, 108 (1-2): 159-184. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-010-9971-x

Yang, W.; Renwick, A., 2018. Consumer Willingness to Pay Price Premiums for Credence Attributes of Livestock Products – A Meta-Analysis. *Journal of Agricultural Economics*, 70 (3): 618-639. http://dx.doi.org/10.1111/1477-9552.12323

Zuliani, A.; Esbjerg, L.; Grunert, K.G.; Bovolenta, S., 2018. Animal Welfare and Mountain Products from Traditional Dairy Farms: How Do Consumers Perceive Complexity? *Animals*, 8 (11). http://dx.doi.org/10.3390/ani8110207

Chapitre 6. Vers des aliments d'origine animale plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs : pistes de réflexion et ouvertures

Auteurs : Véronique Santé Lhoutellier (coordination), Camille Adamiec, Thierry Astruc, Pierre-Etienne Bouillot, Estelle Fourat, Joel Gautron, Laurent Guillier, Bruno Martin, Pierre-Sylvain Mirade, Fabrice Pierre, Sophie Prache, Pierre Sans, Mégane Raulet.

Experts ponctuels : Nathalie Kerhoas (paragraphe Bleu blanc coeur) et Olivier Vitrac (section sur les emballages).

Sommaire

Introduction 908
6.1. Politiques et actions influençant le comportement des consommateurs 908
6.1.1 Agir sur le système réfléchi 909
6.1.2 Agir sur le système automatique/réflexe 912
6.2. Innovations dans les procédés 914
6.2.1. Evolution dans les filières : exemple de la production d'œufs 914
6.2.2. Abattage de proximité 922
6.2.3. Innovations autour des transformations 925
6.2.4 Conditionnement et emballages des produits animaux 930
6.3. Reformulation des produits – « Innovations produits » 934
6.3.1. Pourquoi et comment re-formuler avec un objectif d'amélioration de l'offre et/ou santé 934
6.3.2. Substituts végétaux partiels et totaux dans les produits animaux 939
6.3.3. Reformulation dirigées vers des populations cibles 941
6.3.4. Acceptabilité de reformulation : Vers une évolution du périmètre des arbitrages ? 942
6.3.5. Réglementation européenne par rapport aux innovations dans le domaine de l'alimentation 946
6.4. Innovations au niveau des systèmes de production/transformation 948
6.4.1. Exemples de développement de nouvelles filières 948
6.4.2. Conceptions innovantes 952
6.4.3. Enjeux et limites des approches systèmes centrées sur la santé 955
6.4.4. Limiter les pertes et gaspillage et favoriser la valorisation de la biomasse animale 957
6.5. Conclusions 971
Références bibliographiques 973

Introduction

L'ensemble des chapitres précédents a permis d'aborder les tenants et aboutissants qualifiant et modulant les propriétés des produits animaux depuis leur mode de production jusqu'aux effets santé de leur consommation. Nul ne peut ignorer la part de plus en plus prégnante des qualités d'image dans l'acte d'achat dont les produits sous SIQO sont emblématiques. Même si les produits sous SIQO représentent une part croissante de notre alimentation pour lesquels les engagements de production et de transformation tirent la qualité vers le haut, pour les produits animaux dits « standards », à ce jour majoritaires, ont été identifiées des pratiques d'élevage favorables à la qualité nutritionnelle des produits et à l'environnement qui mériteraient d'être mises en place. Si l'on considère la qualité des produits animaux comme étant la somme et/ou la combinaison de toutes les propriétés la constituant, il faut souligner la part des invariants où les marges de progrès resteraient infimes ; le manque de données fiables et robustes mais pour lesquels les travaux de recherche sont en cours ou identifiés comme manquants ; les initiatives plus ou moins abouties et ce, à différents niveaux, que ce soit auprès des consommateurs, des acteurs de la production, de la transformation et de la distribution. Ce chapitre a pour ambition d'alimenter le débat, de nous questionner et de brosser quelques pistes de réflexion autour d'évolutions possibles pour des aliments plus sains, plus durables et appréciés des consommateurs. Les innovations concernent les consommateurs, les pouvoirs publics, les acteurs des filières et la règlementation.

Regard sur la bibliographie
Ce chapitre prospectif repose sur 446 références. L'essentiel des références bibliographiques (93%) est postérieure à 2002 et 50% ont moins de 5 ans, ce qui souligne l'orientation de ce chapitre vers des pistes de recherche très actuelles voire en devenir. Les articles scientifiques constituent 80% (359/446) des sources, les rapports 6%, surtout des agences de santé. Le champ géographique couvert est majoritairement européen. Par ailleurs on constate que les travaux de l'INRA représentent 20% du corpus cités. L'autocitation des experts représente 8% des références. Les principales revues sont *Meat science* (59 articles) et *Appetite* (14 articles).

6.1. Politiques et actions influençant le comportement des consommateurs

Les décisions d'achat de produits alimentaires sont des actes récurrents qui obéissent en partie à un processus non conscient relevant d'une routine fortement influencée par les émotions ; en effet, la plupart des acheteurs n'ont pas le temps, la motivation ou les capacités leur permettant de faire un choix raisonné. Cependant, ces routines ne gouvernent pas l'ensemble des choix alimentaires d'un individu quel que soit l'environnement dans lequel il se trouve : les valeurs auxquelles il adhère et ses attitudes influencent également ses décisions (voir chapitre 5.2). Dès lors, modifier les comportements suppose à la fois d'agir sur les processus automatiques et d'influencer la construction des attitudes des acheteurs (Stoll-Kleemann et Schmidt, 2017).

S'agissant des produits d'origine animale, et plus particulièrement de la viande, cela n'est pas chose facile. En effet, la viande est souvent perçue comme un produit *Natural, Normal, Necessary and Nice* (Piazza *et al.*, 2015), dont la consommation est associée au plaisir et à la satisfaction (de Boer et Aiking, 2017). Cependant, une forte hétérogénéité entre acheteurs est mise en avant par de nombreux travaux (Apostolidis et McLeay, 2016 ; Niemyjska *et al.*, 2018) ouvrant la voie à des actions ciblées sur certains segments. Une combinaison d'interventions semble nécessaire pour orienter les décisions d'achat vers des produits plus sains et durables. À côté des actions aux effets de moyen-long terme (éducation et information), un ensemble d'actions peut être envisagé. Dans leur méta-analyse des expérimentations de terrain, Cadario et Chandon (2019) proposent de les classer en trois groupes :

- des interventions axées sur la cognition cherchant à influencer ce que les consommateurs savent (p. ex. : étiquetage nutritionnel descriptif ou évaluatif/score) ;

- des interventions axées sur l'affectif/l'émotivité visant à modifier ce que les consommateurs ressentent sur le lieu d'achat, sans forcément modifier ce qu'ils savent (p. ex. : slogans/injonctions à manger sain, visuels attractifs de produits) ;

- les interventions axées sur le comportement cherchant à influencer ce que font les consommateurs (c'est-à-dire leurs réactions motrices), sans nécessairement changer ce qu'ils savent ou ce qu'ils ressentent (p. ex. : amélioration de la praticité

des produits dont on veut promouvoir la consommation, manipulation de la taille des produits pour favoriser une moindre ingestion…).

Ces actions relèvent de ce que la littérature anglo-saxonne dénomme *nudges* (coup de pouce ou incitation douce) à savoir « *toute intervention sur l'architecture des choix qui modifie le comportement des individus d'une manière prévisible sans interdire aucune option ou modifier de façon significative leurs incitations économiques. L'intervention doit être facile et peu coûteuse à éviter* » (Thaler et Sunstein, 2008). Il s'agit donc d'orienter sans contraindre. Dans leur synthèse sur les questions posées par les *nudges*, Marchiori *et al.* (2017) montrent qu'il n'existe pas un consensus sur la façon de les classer : ils peuvent être rattachés au système (automatique par ooposition à réfléchi) qu'il cible ou selon leur caractère plus ou moins intrusif pour l'individu (Reisch *et al.*, 2017).

6.1.1 Agir sur le système réfléchi

6.1.1.1 Education et information au changement de pratiques alimentaires

Comme le souligne l'avis 84 du Conseil national d'almentation ou CNA (2019), l'éducation à l'alimentation « permet d'acquérir les connaissances utiles à chacun pour réaliser ses propres choix constructeurs d'une alimentation favorable à la santé (…). L'éducation à l'alimentation participe aussi au renforcement du lien social et à l'émergence d'une citoyenneté consciente des effets positifs ou négatifs de certains types de consommations sur l'état de notre planète » (Conseil national de l'alimentation, 2019).

Si les gouvernements et industriels tardent à agir en faveur d'une réduction de la consommation des protéines animales (Westhoek *et al.*, 2011), différentes associations tentent des stratégies pour faire la promotion de jours sans viande ou la réduction des portions (Laestadius *et al.*, 2013). D'un point de vue du consommateur, ce choix se heurte à la place de la viande dans la structure traditionnelle des repas (Douglas, 1972) dans la plupart des pays européens. L'adoption de jours sans viande doit naître de l'engagement à un but sociétal en devenant une journée particulière, notamment grâce aux campagnes internationales, comme les lundis sans viande (Euromonitor International, 2011). Quant aux stratégies de réduction des portions de meilleure qualité (Sutton et Dibb, 2013), elles s'accompagnent souvent d'une stratégie de diversification des sources en protéines (Latvala *et al.*, 2012) et activent des choix alimentaires plus qualitatifs et donc stimulants pour le consommateur que de seulement réduire la quantité.

L'efficacité de ces stratégies d'éducation a été testée et analysée par de Boer *et al.* (2014) sur un échantillon national hollandais de 1 083 personnes, afin de connaître les types de consommateurs auxquels elles s'adressent ainsi que leurs préférences. Pour les 23% de l'échantillon qui ne mangent pas de viande plus de 4 jours par semaine, 81% la remplacent par du poisson (76%), des œufs (49%), du fromage (34%) ou d'autres substituts (26%), lentilles, noix, seitan, tempeh et tofu (<20%). La portion préférée moyenne de viande est de 100 g (47%). Même si une part importante de participants combine un nombre élevé de jours avec viande avec des grandes portions, la corrélation entre la fréquence et la taille est faible, ce qui confirme que cela correspond à des choix différents. De même, le nombre de jours avec viande et la taille de la portion sont négativement corrélés aux achats de viande bio ou élevée en plein air, à l'achat de substituts et à la préférence pour les protéines végétales. À la question de vouloir opter pour un ou plusieurs jours sans viande par semaine, 21% répondent déjà le faire, 23% ne veulent pas changer, 41% peut-être et 15% oui. Ces deux dernières catégories correspondent à des individus différents. Ceux qui sont sûrs de vouloir adopter des jours sans viande sont aussi ceux qui ont tendance à réduire les jours avec viande (30%), à acheter des substituts de viande (39%) et ont une préférence pour les protéines végétales (34%). Ils sont familiers avec le sujet (2,67 fois plus) et sont des femmes (2 fois plus). Le nombre moyen de jours avec viande par semaine est de 4,44 pour ceux qui font déjà des jours sans, 4,70 pour ceux qui veulent adopter des jours sans, 5,82 pour ceux qui veulent peut-être, et 5,88 pour ceux qui ne veulent pas, mais qui apparemment le font déjà au moins un jour. Ces derniers se différencient par la consommation de grandes portions et un niveau bas de consommation de viande bio, de substituts et protéines végétales, indépendamment de l'âge ou niveau d'éducation. Au vu de ces résultats, faire la promotion d'un jour végétarien s'avèrerait plus efficace et ciblé car les individus qui ont répondu déjà faire des jours sans viande ne le font pas forcément dans un objectif global de réduction de la consommation des protéines. Ce jour « sans » aurait peut-être même un effet contraire d'augmenter la quantité mangée le lendemain. A l'inverse, les messages « moins mais mieux » ou « moins mais varié » semblent prometteurs parce que les consommateurs avec une préférence pour les petites portions faisaient également le choix de la qualité et des protéines végétales. Cela nécessite des compétences spécifiques et les individus qui achètent des substituts ont un plus haut niveau d'études.

Le type d'information à communiquer pour stimuler le changement a également été exploré. L'efficacité de différents modes de communication sur les conditions d'élevage de la viande de bœuf (le film documentaire, le film d'images, un flyer, tous ayant le même contenu), a été testée auprès de consommateurs allemands (Risius et Hamm, 2018). Sélectionnés à l'entrée du magasin (676 répondants), séparés en groupe selon le mode de communication, ils sont ensuite questionnés sur leurs intentions d'achat. Si la plupart des consommateurs étaient prêts à diminuer leur achat du bœuf bon marché d'élevage industriel, il semblerait qu'une communication objective et rationnelle soit plus efficace qu'une communication émotionnelle. Une enquête qualitative menée auprès de consommateurs australiens (Hoek *et al.*, 2017) recommande d'orienter les politiques et actions sur la santé qui reste le moteur principal pour les individus, davantage que sur l'environnement sur lequel il y a aussi confusion des connaissances, et de maintenir la reconnaissance de la dimension hédonique des choix alimentaires pour ceux qui n'ont pas de moteur idéologique à leur alimentation. Une communication en ce sens doit pouvoir modifier l'association négative entre les allégations de santé et le plaisir gustatif, par une communication adaptée et innovante, au travers de messages scientifiques crédibles et substantiels mais non complexes, et des symboles clairs (Hung *et al.*, 2019). Les campagnes d'information sont à privilégier pour modifier les représentations et les connaissances mais elles ne sont pas efficaces sur le long terme sans les compétences et les outils pour les comprendre (Graziose *et al.*, 2018).

Par ailleurs, l'intention de changement de comportement d'achat a été étudiée dans sa dimension temporelle. Des chercheurs suisses en psychosociologie (Weibel *et al.*, 2019) ont identifié des facteurs facilitant la baisse de consommation de viande selon des phases du changement de pratiques. La phase 1 étant « Je n'ai jamais considéré réduire ma consommation de viande », la phase 2 « J'ai considéré réduire ma consommation de viande mais je n'ai pas encore mis en pratique », la phase 3 « Je consomme moins occasionnellement. Dans le futur, j'ai l'intention de le faire sur une base régulière » et enfin la phase « je consomme moins ou peu de viande ». Une attitude favorable au changement alimentaire est corrélée d'abord à une connaissance (par exemple comment la réduction de viande diminue les émissions de gaz à effet de serre (GES). Le changement de normes sociales (grâce à des leaders d'opinions) et les émotions (positives ou négatives) peuvent influencer le changement pour les individus en phases 1 et 2 ; tandis que le contrôle perçu sur son alimentation semble plus déterminant dans les phases ultérieures en réduisant, par exemple, les perceptions des difficultés à réduire les consommations de viande. Le changement de ces pratiques et l'impact d'une éducation ont également été testés sur une année scolaire auprès d'étudiants américains (Jay *et al.*, 2019). Deux groupes ont été suivis : un groupe d'inscrits au cours intitulé « Food: A Lens for Environment and Sustainability » et un groupe au cours « Evolution of the Cosmos and Life ». Les étudiants étaient libres de remplir le même questionnaire en début d'année scolaire et six mois plus tard. Tandis que les deux groupes avaient les mêmes réponses au départ, à la fin de la période les étudiants du groupe « Food » avaient diminué leur empreinte carbone alimentaire globale de 7%, l'empreinte carbone en bœuf de leur alimentation de 19% et leur consommation de viandes de ruminants de 28%. Ceci est corroboré par une revue de littérature sur plus de deux cents articles (Murimi *et al.*, 2017) ayant mis en évidence que les programmes éducatifs nutritionnels étaient efficaces lorsqu'ils étaient supérieurs à cinq mois et qu'ils donnaient des retours personnalisés sur la santé des individus. Les changements alimentaires ont tendance à se produire sur des temporalités longues. Des sociologues ont montré que les bifurcations des trajectoires de vie constituent des moments particulièrement favorables au passage à une alimentation bio (Lamine, 2008) ou à des pratiques considérées plus durables (Plessz *et al.*, 2016).

6.1.1.2. Nouveaux outils numériques pour accompagner le changement

L'avènement des outils digitaux modifient la façon dont les consommateurs appréhendent leur alimentation et son influence sur leur santé. Ils pourraient constituer des aides à la décision individuelle au service d'une éducation à la nutrition. Des travaux récents en sociologie montrent que leur utilisation est très inégale selon le milieu social et l'intégration des personnes : les foyers les moins favorisés et peu intégrés s'en servant peu même si la présence d'un enfant constitue un facteur favorisant (Regnier et Adamiec, 2019; Regnier *et al.*, 2018). Au-delà de l'influence à moyen et long termes sur les connaissances en nutrition des consommateurs, les applications digitales disponibles sur les smartphones sont susceptibles d'infléchir les choix quotidiens qu'ils effectuent par leurs actes d'achat. Soutjis (2020) analyse le cas de l'application Yuka. Fondée sur la base de données ouvertes Open Food Facts, elle propose un score sur 100 points basé sur 3 critères : la qualité nutritionnelle (60 points), la présence d'additifs préjudiciables à la santé (30 points) et le mode de production (bio ou conventionnel, 10 points). En appliquant cette grille, les produits sont classés de mauvais (0-30 points) à excellents (75-100 points), chacune des classes se voyant attribuée une couleur (de rouge à vert foncé). Une telle application peut être considérée comme un prolongement numérique de l'action des journaux consuméristes : l'information descendante fournie par les

fabricants sur les étiquettes ou dans leur communication est challengée dans les rayons par des tierces-parties (consommateurs ou leurs représentants), ce qui conduit à une modification de la perception de leur qualité par ces derniers. En ce sens, elle participe de ce que Vayre et Cochoy (2019) nomment le processus de « wikization » : « jusqu'à aujourd'hui, ce sont toujours les professionnels (industriels mais aussi régulateurs) qui ont contrôlé la définition et l'affichage des informations concernant les produits, ne laissant aux consommateurs d'autre choix que la « consommation » des items informationnels qu'on veut bien leur présenter […] L'application Yuka qui rassemble aujourd'hui pas moins de huit millions d'utilisateurs, a réussi à donner aux consommateurs l'accès au type d'évaluation des produits que les industriels leur refusaient ». Cette application agit comme un outil de *self-nudging* (ou auto-incitation douce) dans la mesure où, loin de bannir une famille de produits (« ne mangez pas de pizzas… »), elles influencent les choix des consommateurs vers les produits censés être les plus « vertueux » au sein d'une famille, modifiant par là-même l'architecture des choix dans un contexte de consommation engagée. Selon les propos formulés par l'un des fondateurs de cette application, un des objectifs est de pousser les fabricants à modifier la formulation de leurs produits pour les rendre plus favorables à la santé (Soutjis, 2020). Ce mouvement de re-formulation sous la pression de ces derniers a débuté : ainsi, le groupe Intermarché a annoncé en septembre 2019 vouloir retirer 142 additifs de 900 produits commercialisés sous marque distributeur d'ici un an et demi, dans le but d'obtenir une meilleure note sur Yuka. Même s'il est trop tôt pour mesurer l'impact que l'utilisation de ces applications aura sur les comportements d'achat des consommateurs sur le long terme, elle pose la question de la pertinence des critères retenus pour constituer les scores et de leur interprétation par les consommateurs.

6.1.1.3 Utilisation d'incitations économiques : taxation et subvention

Un des moyens d'influencer les comportements de consommation pour les rendre plus favorables à la préservation de l'environnement ou de la santé est de renchérir leur coût d'acquisition. Il s'agit d'internaliser l'externalité négative par le biais du prix donnant ainsi un signal susceptible de modifier les actes d'achat. Ces taxes peuvent porter sur l'ensemble des produits alimentaires ou se focaliser sur ceux considérés comme peu vertueux. Simultanément, il est possible de subventionner les biens dont on veut promouvoir la consommation. Cette action de politique publique peut compléter des mesures qui affectent l'amont des filières telles que l'amélioration de la productivité ou l'innovation technique (p. ex. le soutien aux pratiques d'élevage favorable à la qualité nutritionnelle des produits et à l'environnement).

S'agissant d'impact environnemental, les travaux menés explorent le potentiel de réduction de GES par le biais de la réduction de la consommation de certains produits : à titre d'exemple, Hedenus *et al.* (2014) montrent qu'une substitution de 75% des calories apportées par les viandes de ruminants et de produits laitiers par des calories d'autres viandes (scénario *Carnivore Climate*) ou par celles apportées par des produits végétaux (scénario *Flexitarian*) permet une réduction très substantielle de la production de CO_2 équivalent/an. En donnant une valeur monétaire à l'unité de CO_2 eq, on peut déterminer des niveaux de taxation et mesurer leurs effets en termes de déplacement des choix des consommateurs. Edjabou et Smed (2013) étudient l'effet de différents niveaux de taxes appliqués aux produits alimentaires dans deux configurations : la première se contente d'appliquer une taxe différenciée sur 23 aliments en fonction de leur empreinte carbone (configuration non compensée) ; la seconde couple cette taxe avec une diminution de la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) afin que l'effet en termes de recettes fiscales soit neutre (c'est-à-dire que les revenus globaux de ces impositions n'augmentent pas - configuration compensée). Le scénario le plus efficient en termes de réduction d'empreinte carbone permet de réduire celle-ci de 2,3 à 8,8% pour un ménage moyen à un coût de 0,15 à 1,73 couronne danoise par kg CO_2 équivalent. Par ailleurs, les scénarii de la configuration non compensée conduisent à une diminution de l'énergie quotidienne ingérée à l'inverse de ceux de la configuration compensée. Bonnet *et al.* (2018) complètent ces travaux en utilisant des données désagrégées (achats de ménages français par une méthode de panel) : les auteurs analysent l'effet de plusieurs niveaux de taxes (56 € et 200 €/t/CO_2 eq) affectant différents produits d'origine animale (n=29) sur les habitudes d'achat des ménages (notamment les substitutions s'opérant suite à la modification des prix relatifs, en intégrant une option de sortie vers des produits végétaux). Trois scénarios sont envisagés : taxation de tous les produits animaux (A), taxation des viandes de ruminants (B) et taxation de la viande bovine seule C. Dans les scénarios B et C, la part de marché de la viande bovine décroit fortement (-11% pour une taxe à 56 € t/CO_2 eq et -31% pour une taxe à 200 €/t/CO_2 eq) mais sans que cela ne profite à l'option de sortie (produits végétaux). La taxation ne diminue donc que faiblement les achats totaux de produits d'origine animale. Si le scénario A est celui qui a l'effet le plus positif sur l'empreinte carbone (-6% à 200 €/t/CO_2 eq) et sur les indicateurs nutritionnels, il dégrade sensiblement le bien-être des ménages en conduisant à une augmentation de près de 9% des dépenses en produits d'origine animale. Le meilleur compromis est le scénario C car il permet une diminution de 3,2% de l'empreinte carbone tout en ayant un effet très limité sur le bien-être des ménages.

Une abondante littérature est consacrée à l'effet de la taxation (ou de la subvention) sur la santé [voir par exemple la revue de Thow *et al.* (2014) et la méta-analyse de Afshin *et al.* (2017) consacrée à l'impact de la modification des prix sur l'amélioration du régime alimentaire], peu de travaux portent spécifiquement sur les produits d'origine animale. Une exception est le travail de Springmann *et al.* (2018) visant à déterminer le niveau de taxe optimale à appliquer pour la viande rouge et les produits élaborés (à base de viande) afin de limiter les effets de leur consommation sur la santé. Leur modélisation conclue à un effet différencié selon le niveau de richesse des pays : dans les économies à haut revenu, une taxation de 20% de la viande rouge et de 100% des produits élaborés permettrait de compenser les coûts liés à la prise en charge des pathologies liées à leur consommation. Elle induirait une baisse de 12 g/j de la consommation de ces derniers mais aurait un effet quasi-nul sur celle de la viande rouge en raison de probables substitutions entre les deux familles de produits. Les auteurs qualifient ces changements de « plus faibles qu'attendus compte tenu de l'importance des modifications de prix ».

Un des griefs contre l'adoption de ces mesures de taxation est leur caractère potentiellement inéquitable car le poids de l'alimentation est plus élevé dans le budget des ménages les moins favorisés économiquement. De plus, dans certains pays (dont la France), ces derniers consomment en moyenne plus de produits carnés que les ménages aisés. Cette situation a conduit à s'intéresser aux effets distributifs de ces taxes et aux moyens de compenser (ou de limiter) leurs effets négatifs sur les ménages les moins aisés (Garcia-Muros *et al.*, 2017 ; Sall, 2018). Une étude française récente (Caillavet *et al.*, 2019) compare les effets d'une taxe sur l'émission de GES et la qualité nutritionnelle en appliquant trois scénarii à un niveau désagrégé (achats individuels des ménages) :

A) taxation de tous les produits alimentaires (selon leur niveau de contribution aux GES) ;

B) taxation des 4 groupes de produits animaux les plus contributeurs (viande bovine, autres viandes, viandes cuites, incluant les plats préparés, et fromages) ;

C) scénario fiscalement neutre qui utilise les recettes provenant de la taxation des produits du scénario B pour subventionner deux groupes d'aliments riches en protéines végétales (les fruits et légumes frais d'une part, les féculents - y compris légumineuses – d'autre part). Ce dernier scénario permet d'obtenir des effets positifs conjoints sur l'émission de GES et la qualité nutritionnelle : il permet une décroissance des protéines totales et animales ingérées, une augmentation de la part des protéines végétales tout en n'induisant qu'une faible diminution des calories. Pour produire ces effets, le niveau de taxe doit être élevé (ici 140 €/t CO_2 eq). Par ailleurs, si ce scénario contribue à améliorer la qualité nutritionnelle des ménages les plus défavorisés, il profite surtout à ceux qui consomment le plus de produits subventionnés (soit les ménages plus aisés pour les fruits et légumes frais). Enfin, la question de l'acceptabilité sociale de telles mesures se pose.

6.1.2 Agir sur le système automatique/réflexe

À côté des interventions focalisées sur les choix conscients et réfléchis d'achat - dont l'efficacité est parfois questionnée (Brambila-Macias *et al.*, 2011 ; de Batz *et al.*, 2016) - des actions portant sur l'environnement dans lesquels ils sont faits peuvent conduire à les orienter vers les options souhaitées. Cette modification de l'architecture des choix qui sollicite le système automatique s'appuie sur l'utilisation d'interventions de nature diverse à deux niveaux : le macro-environnement et le micro-environnement. Pour le premier, il s'agit de modifier des conditions d'accès au produit, par exemple par une raréfaction des points de vente proposant les produits non souhaités (ou une plus grande facilité d'accès à ceux dont on veut promouvoir la consommation). L'effet attendu est une baisse de la consommation des biens non désirés en raison d'une augmentation de l'effort à consentir pour se les procurer. Dans le second cas, les interventions portent sur l'environnement physique d'achat : la position des produits dans les linéaires ou sur un menu, les conditions de leur exposition (décor, lumière…), les modalités d'achat (libre–service en restauration ou portions prédéterminées) ou de paiement, les étiquettes utilisées (allégations, couleurs utilisées…) sont autant d'actions pouvant être mises en œuvre pour orienter les achats.

L'essentiel de la littérature porte sur les interventions au niveau du micro-environnement. Trois revues ont analysé l'effet de tout ou partie des outils utilisables sur les choix des acheteurs (Bucher *et al.*, 2016; Campos *et al.*, 2011 ; Skov *et al.*, 2013). Campos *et al.* (2011), analysant 120 articles – majoritairement issus d'études menées aux Etats-Unis - portant sur l'usage de l'information nutritionnelle figurant sur les étiquettes des produits pré-emballés, concluent à l'efficacité de cet outil pour orienter les achats vers des biens plus favorable à la santé. Les auteurs insistent cependant sur l'hétérogénéité de l'usage de

ces informations notamment en fonction du niveau d'éducation et de l'intérêt pour la nutrition. Le fait que certaines cibles concernées (enfants, adolescents ou personnes âgées en situation d'obésité) utilisent moins ces informations ou doutent de leur véracité (par exemple lorsque les allégations émanent des fabricants) amènent les auteurs à préconiser l'usage de nouveaux formats ou contenus qui rendraient les informations plus accessibles et compréhensibles. Les récentes initiatives d'affichage de scores nutritionnels promus par les pouvoirs publics (Nutri-Score en France) ou l'apparition d'applications utilisant des bases de données participatives relatives à la composition des aliments (Open Food Facts, Yuka) peuvent être rapprochées de cette recommandation. Skov *et al.* (2013), s'appuyant sur une revue de 12 études relatives à des situations de libre-service en restauration hors-domicile menées entre 1984 et 2012, concluent à l'efficacité de l'information et de l'étiquetage nutritionnel sur le point de vente mais relèvent que la diminution de la taille des assiettes ou couverts n'a pas d'effet net sur les volumes consommés. Enfin, Bucher *et al.* (2016) analysent 18 études, publiées entre 1976 et 2014, portant sur l'influence d'une modification de la place des produits – définie comme l'intervention sur l'ordre de présentation ou la distance à parcourir pour les atteindre dans un micro-environnement d'achat donné – sur les choix des consommateurs. Seize études (sur 18) concluent à un effet positif de la manipulation se traduisant par une baisse des achats des produits ciblés. Cependant, très peu de publications s'intéressent aux phénomènes de compensation, c'est-à-dire aux substitutions opérées par les acheteurs (quels produits achètent-ils lorsqu'ils se détournent de ceux sur lesquels portent la manipulation ?). Coucke *et al.* (2019) abordent cette question sur le cas des produits carnés : les auteurs ont augmenté la place dédiée aux viandes de volailles d'un rayon boucherie traditionnelle d'un supermarché (passant de 1,3 m à 1,85 m soit 27 portions exposées contre 19) en diminuant celle allouée aux produits à plus fort impact environnemental (viandes de ruminants et charcuterie), sans modifier la taille totale du rayon pendant une période de 4 semaines. Un autre supermarché, sans modification de l'offre, a été suivi sur la même période, en tant que contrôle. Les quantités achetées et le chiffre d'affaires des rayons des deux magasins ont été suivis sur une période de 12 semaines (4 semaines pré-intervention, 4 semaines d'intervention, 4 semaines de post-intervention). Les quantités de viande de volailles achetées augmentent significativement (+13%) dans le magasin objet de l'intervention et décroissent lorsque cette dernière cesse. Cependant, on n'observe pas de modification significative de la quantité totale de produits carnés achetés par jour, donc pas de diminution notable des produits dont l'exposition a diminué. Cette étude montre que si le *nudge* utilisé a l'effet escompté sur les produits considérés comme vertueux, il ne suffit pas à modifier profondément l'architecture des choix. En dépit de ce résultat mitigé, cette étude souligne le rôle majeur que peuvent jouer les offreurs, et notamment les circuits dominants de distribution, dans la modification des choix. Gravely et Fraser (2018), constatant que les grandes surfaces canadiennes sont peu impliquées dans la promotion de la vente des protéines alternatives (aux produits carnés), formulent des recommandations opérationnelles : placement des alternatives dans les mêmes rayons que les viandes et dans des zones de fort trafic, augmentation de leur exposition dans les linéaires, développement de nouvelles stratégies d'information mettant en avant leurs bénéfices pour l'environnement et la santé, élaboration de fiches recettes pour faciliter leur usage dans des plats confectionnés au domicile, travail conjoint avec les fabricants pour développer des produits à forte valeur ajoutée faciles à cuisiner.

L'utilisation croissante des *nudges* s'accompagne d'un débat sur la démonstration de leur efficacité réelle et de leur légitimité (Hollands *et al.*, 2013 ; Marchiori *et al.*, 2017 ; Sunstein, 2018).

Si l'efficacité de court terme est avérée (avec des effets différents selon la nature de l'outil utilisé), la capacité de ce type d'intervention à modifier durablement les comportements d'achat reste à explorer. Par ailleurs, l'étude de l'effet relatif des différentes catégories de *nudges* ainsi que la variation de l'efficacité d'un type donné pour différentes cibles ou contextes d'utilisation sont largement inconnus (Marchiori *et al.*, 2017). Cette situation résulte pour partie d'une insuffisance de caractérisation des *nudges* qui conduit à une controverse sur ce que recouvre précisément cet ensemble (Sunstein, 2018) et sur l'absence d'une typologie consensuelle (Hollands *et al.*, 2013). Enfin, les mécanismes psychologiques expliquant l'efficacité (ou non) de tel ou tel *nudge* ne sont pas précisément connus. Quant à la contestation de la légitimité de l'usage de ces outils d'intervention, elle relève de la perte de libre-arbitre du consommateur, de la manipulation inconsciente de ses choix, de l'exploitation de son irrationalité ou de sa rationalité limitée (installation de routines) ou du caractère « gadget » de ces instruments qui ne suffiraient pas à influencer en profondeur les comportements. Leurs promoteurs limitent la portée de ces critiques en pointant les malentendus sur ce que sont les *nudges* (Sunstein, 2014) et en s'appuyant sur une série de contre-exemples : ainsi, à la critique concernant l'exploitation de la rationalité limitée des acheteurs, ils avancent que certains *nudges* ciblent le système réfléchi car ils ont une visée éducative. Ils réaffirment l'importance de limiter la définition de ce groupe d'instruments à ceux qui préservent réellement la liberté de choix : « *Les nudges sont des initiatives privées ou publiques qui amènent les gens à des directions particulières mais qui leur permettent aussi de suivre leur propre voie. Un rappel est un nudge, tout comme un avertissement […] ; une règle par défaut, qui inscrit automatiquement les gens à un programme, est un nudge […]. Pour être considérée comme un encouragement, une initiative ne doit pas imposer d'incitations matérielles importantes (y compris des mesures dissuasives). Une subvention n'est pas un nudge ; une taxe n'est*

pas un nudge […]. Pour compter comme tel, un nudge doit préserver la liberté de choix. Si une intervention impose des coûts matériels importants aux sélectionneurs, elle peut bien sûr se justifier, mais ce n'est pas un nudge. Certains nudges fonctionnent parce qu'ils informent les gens ; d'autres fonctionnent parce qu'ils facilitent certains choix ; d'autres encore fonctionnent à cause de la puissance de l'inertie et de la procrastination » (Sunstein, 2018).

6.2. Innovations dans les procédés

6.2.1. Evolution dans les filières : exemple de la production d'œufs

L'œuf de consommation est un bon exemple de problématique de changements importants dans la filière suite aux évolutions des demandes sociales. Il existe actuellement une forte pression du consommateur pour une alimentation en produits animaux sains, de qualité et prenant en compte le bien-être animal. La prise en compte de la dimension éthique dans cette filière s'est traduite par des évolutions fortes en son sein afin de répondre aux demandes sociétales. Les principales évolutions concernent l'abandon progressif des systèmes d'élevage en cage et l'allongement de la période de production, qui se traduit par une diminution du nombre d'animaux abattus chaque année et un moins grand nombre de poules sur un territoire donné pour une même quantité d'œufs produits. Par conséquent, ce mode de production est moins impactant en termes d'environnement et d'utilisation des ressources.

Une autre problématique importante au sein de cette filière est la destinée des poussins mâles issus de lignées pondeuses. Les poules et les poulets appartiennent à l'espèce *Gallus gallus*. Toutefois, les lignées qui produisent des œufs de consommation transforment principalement leur aliment en œuf et le poids vif de l'animal ne permet pas de le commercialiser en tant que production pour la viande. De ce fait, la moitié des poussins qui naissent sont des mâles non commercialisables. Seul un nombre très limité est élevé pour permettre la reproduction des futurs descendants. De ce fait, des millions de mâles qui naissent en France et dans le monde chaque année, sont inutilisables et n'ont pas de valeur commerciale. Aussi, ils sont éliminés à la naissance. Cet aspect de la production, qui était encore inconnu il y a quelques années, fait l'objet d'un questionnement éthique de plus en plus important. De nombreux programmes de recherche sont menés pour essayer de trouver une alternative à la destruction des mâles. La première approche consiste à conserver les mâles pour produire de la viande. La croissance des mâles issus de lignées pondeuses, ne permet pas d'obtenir de la viande de qualité et à un coût compétitif (Gremmen *et al.*, 2018 ; Koenig *et al.*, 2012). Le développement de souches à double fin avec des femelles produisant des œufs et des mâles produisant suffisamment de chair pour être commercialisés est actuellement développée, mais si la viande ainsi produite est comparable avec celle des lignées chair, la production reste moins compétitive en terme économique, mais aussi en termes de ressources et de rejets dans l'environnement (Koenig *et al.*, 2012). Il y a un besoin de recherche et développement pour évaluer la productivité de ce système en conditions de production, la qualité des produits (œufs et viandes), le comportement de ces souches nouvelles dans les différents systèmes d'élevage et dans différentes conditions environnementales, ainsi que les conséquences en termes de santé et de coûts.

Une autre approche est le sexage *in ovo* avant l'éclosion du poussin, avec le développement récent de nombreuses méthodes de sexage. Toutefois, l'étape d'industrialisation du sexage suffisamment rapide, à un coût raisonnable et sans conséquence sur le nombre de femelles à éclore, n'est toujours pas réalisé, même si cet objectif semble atteignable dans un délai raisonnable.

Il est à noter qu'un programme européen PPILOW coordonné par INRAE et commencé en 2019 sur une durée de 5 ans traitera pour partie de ces sujets. Un groupe de travail de ce programme porte sur les alternatives à l'élimination des poussins mâles issus de pondeuses avec 3 tâches consacrées à ces problématiques « Task 5.1: Evaluation of dual-purpose production potential in different environment (month 1 to month 50), Task 5.2: Evaluation of dual-purpose genotypes on organic farms (month 24 to month 60), Task 5.3: Early sex determination using *in-ovo* methods (month 1 to month 54).

Le 13 janvier 2020 a eu lieu un séminaire franco-allemand sur l'alternative à l'alimination des poussins mâles issus de lignées pondeuses. Ce séminaire réunissait les ministres français et allemand de l'agriculture, les associations de défense des animaux, les acteurs de la filière avicole, les industriels et le monde de la recherche. Les ministres français et Allemand ont exprimé leur ressenti par rapport à cette problématique et l'urgence qu'il y avait d'en finir avec cette pratique. Ils ont mentionné que depuis plusieurs années, de l'argent public avait été engagé pour trouver des solutions. Ils souhaitent mettre une barrière de limite de temps (fin 2021) à partir de laquelle, cette pratique serait interdite dans nos pays. Ils ont bien conscience des difficultés et du besoin de temps exprimés, mais ils maintiennent cette date butoir, arguant du fait que si aucune contrainte n'est indiquée, les choses n'avanceront pas. Une plateforme commune partagée entre les pays va être mise

en place. Des réunions avec les ministres auront lieu tous les 6 mois pour faire un état des lieux des avancées, avec bien entendu du travail technique en amont.

6.2.1.1 Evolution du système de production des œufs de poules en cage ou ayant accès à l'extérieur

Dans le chapitre 2, sont décrits les modes de productions actuels conformes aux 5 libertés du bien-être animal, dont l'expression des comportements naturels. Toutefois, parmi ces 4 modes de production autorisés, on assiste à une défiance grandissante des consommateurs pour les œufs issus de poules en cages (code 3), qui s'est traduite par une forte segmentation des marchés. En 1996, les systèmes alternatifs à la cage représentaient 8% des effectifs de pondeuses de l'UE, 30% en 2009 et 46% en 2017 (80% des poules pondeuses étaient en cages en 2003, 63% en 2017). La proportion de poules élevées en systèmes alternatifs est en forte augmentation actuellement, même si celle-ci reste très hétérogène en Europe (de moins de 10% en Espagne, Pologne à plus de 90 % aux Pays-Bas, en Allemagne et en Autriche).

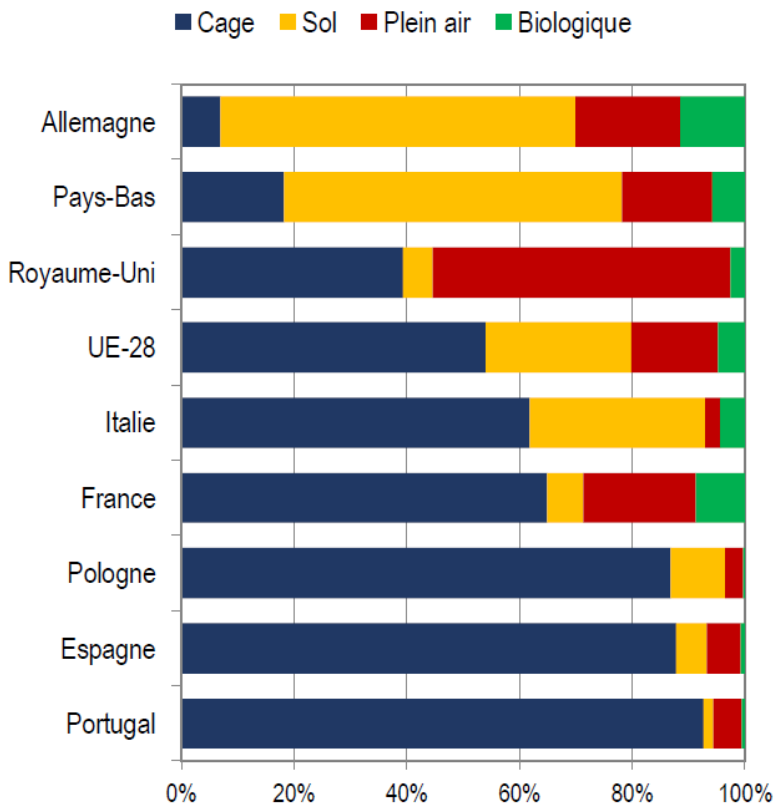


Figure 6.1 : Répartition des effectifs de poules pondeuses par système de production dans divers pays de l'union européenne en 2017 (ITAVI, 2019).

La production française se diversifie de plus en plus depuis la fin des années 1990. Les effectifs de poules pondeuses en système alternatif étaient de 19% en 2008 et sont estimés à 42% en 2018. La consommation d'œufs était de 214 œufs par an et par habitant, qui inclue 38,2% d'ovoproduits. La part des achats d'œufs en coquille pour la consommation à domicile est de 48%.

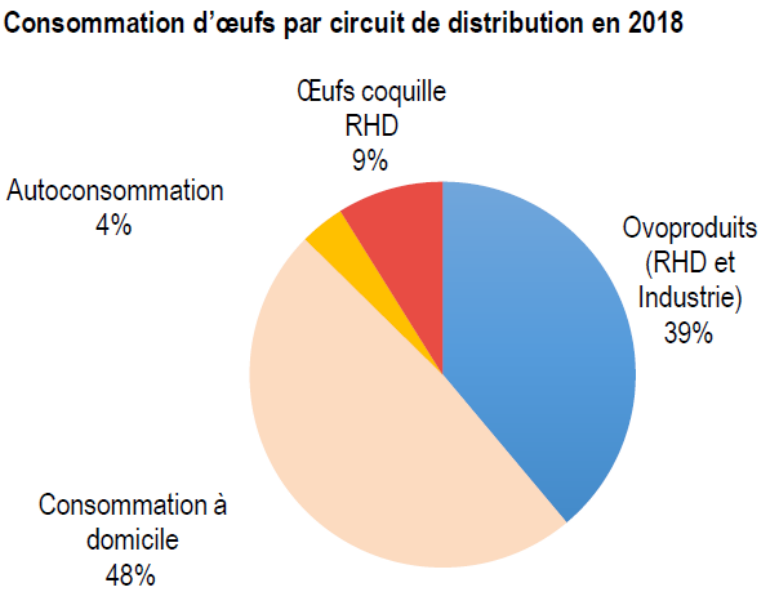


Figure 6.2 : Consommation d'œufs par circuit de distribution. (Source : ITAVI, 2019)

Les grandes et moyennes surfaces, attentives aux campagnes de presse des ONG sur le bien-être des poules pondeuses, ont toutes communiquées sur un arrêt de la commercialisation des œufs issus de cages dans les 2-5 ans à venir. Le 18 février 2018, le ministre de l'Agriculture Stéphane Travert a confirmé que le gouvernement prendrait des mesures pour interdire les œufs en cages. « *A l'horizon de 2022 nous souhaitons que les œufs-coquilles soient issus d'élevages en plein air ou que dans tous les cas, ils ne soient plus issus d'élevages en cage* »[1]. Mais cette interdiction ne devrait concerner que les œufs-coquilles, ce qui exclut ceux utilisés dans la confection de produits transformés dits ovoproduits. En France, le nombre d'œufs produits en cages était de 63% en 2017 et la part d'œufs en cages vendus en coquille dans les magasins était de 49%. De manière à gérer ces excédents de production d'œufs en cages, une part d'entre eux est utilisée comme ovoproduits, mais là aussi, on assiste à une augmentation de la demande en ovoproduits issus d'œufs provenant des systèmes avec parcours. En effet, les annonces de la grande distribution ont été suivies par celles des transformateurs industriels pour leurs produits utilisant des œufs. On peut penser qu'à échéance brève, il y aura un déséquilibre entre l'offre et la demande.

	Aldi	Auchan	Carrefour	Casino	Cora	ITM	Leclerc	Lidl	U
MDD	2025	2022	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
MN	pas de ventes	2025	2025	2020	2025	2025	2025	pas de ventes	ND

Tableau 6.1 : Année de l'arrêt annoncé des œufs en cages par les enseignes[2]

Le médiateur des relations commerciales agricoles, souligne dans son rapport de 2017 que « *le refus de commercialiser des œufs produits par des poules en cage…. Est en passe de devenir la norme indépendamment de toute évolution réglementaire* »

[1] Stéphane Travert confirme la fin de l'élevage en batterie pour la production d'œufs-coquilles : https://www.sciencesetavenir.fr/animaux/animaux-d-elevage/stephane-travert-confirme-la-fin-de-l-elevage-en-batterie-pour-la-production-doeufs_121347

[2] Médiateur des relations agricoles commerciales, Rapport sur la filière œufs (2018) : https://agriculture.gouv.fr/telecharger/89657?token=9c3db59f414fc45b4d68ba8a8d364ab5

Il indique aussi : « *la question de la reconversion des producteurs d'œufs-cage reste incontournable et à réaliser d'ici 2025* »

Ces changements sont à l'origine de difficultés importantes pour les producteurs. Pour plus de 2/3 des bâtiments équipés de cages aménagées, l'échéance de remboursement de la mise aux normes de 2012 se situe entre 2022 et 2026 selon les résultats de l'enquête conduite dans le cadre de l'étude « Avenir des élevages de pondeuses ». Malgré cela, la transformation du parc standard est déjà entamée (20% à fin 2019 d'après les premières estimations) et se fait essentiellement vers du code 2. Le coût de conversion varie alors entre 16 et 20 €/place auquel il faut rajouter le coût du foncier pour un élevage plein air (Chenut, 2018). Le médiateur a aussi estimé que « *le besoin financier pour rembourser…. les emprunts résiduels des producteurs pouvaient atteindre 90 millions d'euros ».*

Pour répondre aux annonces des enseignes, la production d'œufs-cage à convertir au mode plein-air serait équivalente à 2 fois la production actuelle d'œufs produits en plein air. L'institut techhnique ITAVI et le médiateur estiment que cet objectif n'est pas réalisable économiquement et matériellement d'ici fin 2020 et même 2025. En conséquence, il y aura des ruptures en approvisionnement et une augmentation importante des importations intra-européennes. En effet, les pays d'Europe du nord ont converti leur production plus tôt, ce qui leur permet d'exporter des œufs plein-air. Beaucoup de ces pays du nord, tels que l'Allemagne, ont supprimé les cages au profit de productions au sol, soit en parcours extérieur, soit en claustration (code 2). Toutefois, il est à noter que le code 2 est très peu consommé en France (2% des achats en œufs coquille) et que les consommateurs préfèrent les œufs issus d'élevages plein-air. La conversion en élevage sur parcours extérieur imposerait des réserves foncières qui, le plus souvent, ne sont pas disponibles. Un élevage code 1 nécessite 4 à 5 m^2 de parcours extérieur par poule, soit 4 à 5 ha pour un élevage de 10 000 pondeuses. À terme, ces changements rapides vont déséquilibrer la filière qui a mis en place un plan à 5 ans[3] . Il s'agit de répondre à la demande des consommateurs tout en renforçant les relations tout au long de la filière, de l'amont jusqu'au consommateur final. En effet, ces changements sont à l'origine d'investissements importants pour les producteurs qui doivent être garantis en termes d'achats à long terme par les grandes et moyennes distributions, pour ne pas se retrouver dans une situation comme aujourd'hui. L'objectif étant d'atteindre 50% de poules pondeuses en élevages alternatifs d'ici 2022, cela implique l'arrêt de production de 9 millions de poules élevées en cages. Les filières sous signes officiels de qualité ont pour objectif une augmentation de 50% des poules bio et 20% des labels rouge d'ici 2022.

6.2.1.2. Allongement de la période de production

Actuellement, les poules pondeuses commencent à pondre vers 18 semaines et le pic de ponte est obtenu à 22 semaines (5 mois et demi d'âge). Les œufs sont bien valorisés à partir de 25 semaines, lorsque le poids de l'œuf a atteint une valeur seuil (voir chapitre 1). Les poules sont ensuite éliminées lorsque le taux de ponte et le taux d'œufs déclassés, ainsi que lorsqu'une forte variabilité de la qualité de l'œuf atteint un seuil correspondant à une production où moins de 75% environ des œufs sont commercialisables. En 2016, ce seuil se produisait à 72 semaines d'âge en moyenne, soit au bout d'une année de production (Bain *et al.*, 2016). Par ailleurs, une étude belge indique que la fin de production variait de 74 à 92 semaines avec un taux de ponte de 79% (Molnar *et al.*, 2016). La reproduction chez les oiseaux est contrôlée par l'hypothalamus en fonction de différents stimuli environnementaux et endocriniens. Lors du vieillissement de la poule, les cellules de l'hypothalamus deviennent moins efficaces (Dunn *et al.*, 2009). La conséquence est une perte de poids et de fonctionnalité de l'oviducte qui entraine des accroissements des jours de pause (sans ponte) et d'œufs défectueux (Solomon, 2002). Toutefois, on observe clairement dans les troupeaux de poules âgées, des individus capables de maintenir des taux de pontes élevés avec des qualités de coquille maintenues (Molnar *et al.*, 2016). Ceci permettrait d'initier une sélection d'animaux sur la persistance et le maintien de la qualité des œufs à un âge avancé (Bain *et al.*, 2016). À terme, les sélectionneurs indiquaient dès le début des années 2010, qu'ils voulaient sélectionner des souches de poules pondeuses pondant jusqu'à 100 semaines d'âge, pour une production totale de 500 œufs (au lieu des 320 actuels) à l'horizon 2020 (Bain *et al.*, 2016). Bain *et al.* (2016) indiquent qu'une production supplémentaire de 25 œufs par poule, pourrait potentiellement réduire le troupeau de poules de 2,5 millions en Grande-Bretagne. Cet effet cumulatif est obtenu comme montré sur la figure ci-dessous, du fait de la structure pyramidale de la production dans la filière. Une augmentation de 10 semaines de production préserverait 1 g d'azote par douzaine d'œufs produits (Molnar *et al.*, 2016).

3 Plan de filière à 5 ans : garantir des oeufs français en phase avec la demande du marché : https://oeuf-info.fr/infos-filiere/plan-de-filiere-a-5-ans-garantir-des-oeufs-francais-en-phase-avec-la-demande-du-marche/

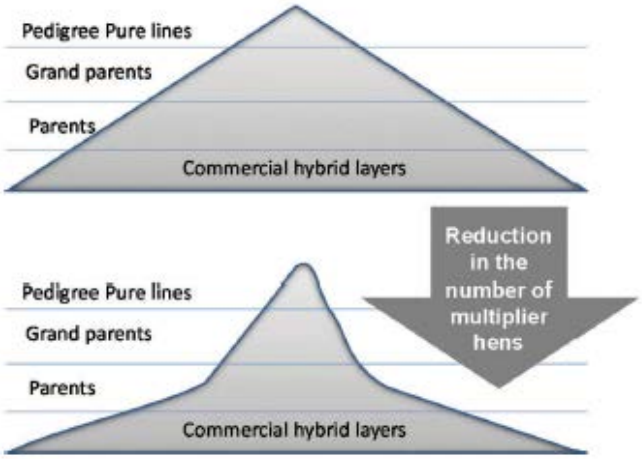


Figure 6.3 : Représentation schématique de l'effet de l'accroissement du cycle de ponte à 90-100 semaines d'âge, sur la réduction du nombre de multiplicateur de poules et sur la modification de la pyramide de production (Bain *et al.*, 2016).

Toutefois, toute amélioration de la persistance de ponte doit se faire avec une qualité de l'œuf constante. Le poids de l'œuf augmente de 70 mg par semaine avec l'âge de la poule (entre 60 et 80 semaines (Molnar *et al.*, 2016). Alors que les autres compartiments de l'œuf restent constants, on observe une diminution de l'épaisseur de coquille (-0,23 µm par semaine) et une diminution de la résistance à la rupture avec l'âge de la poule. Les unités Haugh sont un indicateur de la qualité du blanc de l'œuf. Elles mesurent la hauteur de blanc qui décrit la structure du gel colloïdal du blanc de l'œuf. Ce gel assure une fonction de défense essentielle au maintien de la qualité hygiénique de l'œuf. Or ces indicateurs sont également diminués au cours de la période de production (Bain *et al.*, 2016; Molnar *et al.*, 2016). Par ailleurs, il est essentiel de maintenir une bonne qualité osseuse de la poule en ponte et principalement lorsque la poule devient âgée. Une poule pondeuse nécessite entre 2 et 2,5 g de calcium journalier pour la fabrication de sa coquille journalière. Environ 2/3 de ce calcium est fourni par l'aliment, le 1/3 restant provenant de la déminéralisation de l'os médullaire. Ce calcium provenant de l'os médullaire est nécessaire en seconde partie du processus de minéralisation de la coquille. En effet, ce dernier se produit la nuit, lorsque la poule n'a pas accès à l'aliment. L'os médullaire dans ce cas est capable d'une absorption et d'un renouvellement rapide (Whitehead, 2004). Cet effet est limité par des apports optimisés en calcium (teneur et particules). Malgré cette alimentation parfaitement contrôlée, la déminéralisation médullaire est un phénomène naturel qui peut aussi atteindre l'os structurel engendrant de l'ostéoporose. Cette pathologie, pouvant être très présente chez de vieilles poules, aboutit à des fragilités osseuses et des fractures spontanées. La qualité osseuse et les fractures chez ces poules constituent actuellement un enjeu majeur de la filière œuf de consommation (Sandilands, 2011). On observe facilement dans un troupeau des poules avec des œufs très fragiles ou très solides et idem pour les os. Cependant, il est difficile de savoir si les poules qui présentent des défauts osseux sont celles qui pondent les œufs aux coquilles fragiles ou solides. De manière à résoudre cette question et d'autres sur la physiologie, la nutrition et le bien-être de la poule âgée, de nombreux programmes de recherche sont conduits actuellement par INRAE en partenariat avec les acteurs de la filière et de la nutrition animale.

6.2.1.3. Détection du sexe in ovo

Il y a une corrélation fortement négative entre la capacité d'engraissement et les performances de ponte chez les oiseaux, qui a abouti à des lignées spécialisées chez le poulet. Alors que les mâles et les femelles sont élevés pour produire la viande en lignée chair, seules les femelles sont productives en filière ponte. Par conséquent, le poussin mâle issu de lignée pondeuse est éliminé à un jour, ce qui pose des interrogations en termes de bien-être animal et d'éthique de la production.

Chez les oiseaux, contrairement aux humains et mammifères, les mâles sont homozygotes et portent 2 chromosomes Z identiques, alors que la femelle est hétérozygote et portent 2 chromosomes sexuels différents (chromosomes Z et W). Pour éviter toute naissance de mâle, il faudrait donc faire un tri des gamètes femelles, ce qui est rendu impossible du fait que ce gamète est dans le jaune d'œuf (Krautwald-Junghanns *et al.*, 2018). Krautwald-Junghmans *et al.* (2018) ont revu les différentes approches effectuées pour influencer le sex-ratio. Des essais à différentes températures ont été réalisés, mais aucun résultat notable n'a pu être obtenu chez la poule. De même des mesures morphologiques des œufs n'ont pas permis de différencier les mâles des femelles. L'engraissement des mâles issus de lignées pondeuses n'est pas assez productif pour

permettre une commercialisation. La quantité d'aliment et le temps d'élevage nécessaires sont fortement augmentés. Par ailleurs, les carcasses produites ne correspondent pas aux attentes des consommateurs et nécessitent des préparations culinaires adaptées (Koenig *et al.*, 2012).

La détermination du sexe *in ovo* avant la naissance du poussin est la méthode de choix qui génère beaucoup d'intérêt actuellement. Au cours de ces dernières années, plusieurs approches ont été conduites pour obtenir une méthode utilisable en pratique dans les couvoirs. Il y a de nombreux prérequis pour permettre la réalisation d'une méthode de sexage opérationnelle à un niveau industriel. L'analyse doit être rapide, peu coûteuse, hautement précise et sans conséquence sur le taux d'éclosion des poussins, leur santé et leur performance (Kaleta et Redmann, 2008). Par ailleurs, cette détermination devra avoir lieu avant que l'embryon ne ressente la douleur, soit environ 7 jours avant que la nociception soit possible (Eide et Glover, 1995). Si avant 9 jours, il semble y avoir un consensus pour dire que le sexage est sans douleur pour l'embryon, il existe une zone « grise » pour la période allant jusqu'à 15 jours avec des avis contraires. Ce point est important car il ne s'agit pas de développer une méthode à 13 jours par exemple et ensuite de dire, qu'elle ne sera pas acceptée. Il y a donc urgence à trancher cette réponse et de solliciter les personnes ressources pour avoir une réponse claire ou conclure en l'absence d'évidences et au besoin de recheche pour aider à la décision. Des méthodes de sexage par PCR ont été mises au point, mais nécessitent un minimum de 15 minutes et ne sont utilisables qu'à l'échelle du laboratoire (Clinton *et al.*, 2016).

Les méthodes les plus prometteuses sont celles utilisant des méthodes hormonales et physiques de détermination du sexe *in ovo*. Ainsi Weissmann *et al.* (2013) décrivent une méthode qui permet de mesurer des hormones sexuelles dans le liquide amniotique avant 9 jours. Le sexe est prédit à 98% avec des réductions de l'éclosabilité entre 3,5 et 12,7%. C'est cette méthode qui est la plus avancée actuellement avec des prototypes et un début de commercialisation (voir ci-après, projet Slegt). Toutefois, ce n'est toujours pas applicable à de très haut-débits. Différentes autres méthodes spectroscopiques sont décrites. Pan *et al.* (2016) (cités par (Krautwald-Junghanns *et al.*, 2018)) ont utilisé de l'imagerie hyperspectrale, mais n'arrivent qu'à une prédiction d'environ 80% du sexe de l'embryon. Gohler *et al.* (2017) décrivent une méthode optique non destructive de détermination du sexe chez des lignées présentant de l'emplument différent entre mâles et femelles. Cette méthode efficace à 97% entre 11 et 14 jours de développement embryonnaire, ne peut pas s'appliquer aux lignées commerciales, pour lesquelles les mâles et les femelles présentent des plumages identiques. La méthode la plus détaillée dans les publications consiste en l'utilisation de la spectroscopie Raman (Galli *et al.*, 2018; ~~Galli *et al.*~~, 2016 ; 2017). Ces auteurs utilisent la différence de taille des chromosomes sexuels, mesuré dans les globules rouges sanguins qui sont nucléés chez les oiseaux. Après une ouverture de 12 mm de la coquille, la spectroscopie Raman est utilisée sur des vaisseaux et permet de différencier à plus de 90% les mâles et les femelles dès le 4ème jour d'incubation. Après sexage, la fenêtre est refermée avec un adhésif et les œufs sont remis en incubation. D'après les auteurs, cette technique n'a pas d'effet sur le poussin né, mais par contre diminue de 10 % environ le taux d'éclosabilité. Si cette méthode optique est sans dommage pour le poussin, elle est toutefois invasive, car elle nécessite l'ouverture d'une fenêtre dans la coquille pour accéder aux vaisseaux sanguins. C'est pourquoi ces auteurs ont développé la même méthode en enlevant uniquement la partie minéralisée de la coquille et en préservant l'intégrité de la membrane coquillière (Galli *et al.*, 2018).

La littérature publiée ne reflète qu'une partie de l'ensemble des projets en cours. En effet, de nombreux *consortia* ont vu le jour afin d'élaborer des appareillages complets et répondant aux critères nécessaires à une exploitation commerciale. La compétition est forte, car le potentiel économique est important pour la société qui sera la première et par la suite, pour celle qui se positionnera comme leader.

La revue en ligne « Poultry world » en date du 27 juin 2018, a publié un état des lieux des différents projets de *consortia* visant à une application industrielle de ce procédé[4]. Au vu de cet article, une solution commerciale semble imminente. Les *consortia* rapportés se sont développés en Allemagne, Pays-Bas, Israël, Canada et France. Ils sont décrits et remis à jour ci-après :

SELEGGT – Hormonal testing (http://www.seleggt.com/) (Allemagne)

Le test est effectué à 9 jours d'incubation, avec un petit trou de 0,3 mm dans la coquille pour collecter de l'allantoïde, fluide dans l'une des poches de l'embryon de l'oiseau. Le trou effectué est suffisamment petit pour ne pas être rebouché. La goutte d'échantillon recueilli est placée sur un marqueur breveté et le taux d'œstrone sulfate qui n'est présent que dans les embryons femelles est ensuite visible par colorimétrie sur l'échantillon recueilli.

[4] https://www.poultryworld.net/Eggs/Articles/2018/6/Egg-sexing-close-to-market-301797E/

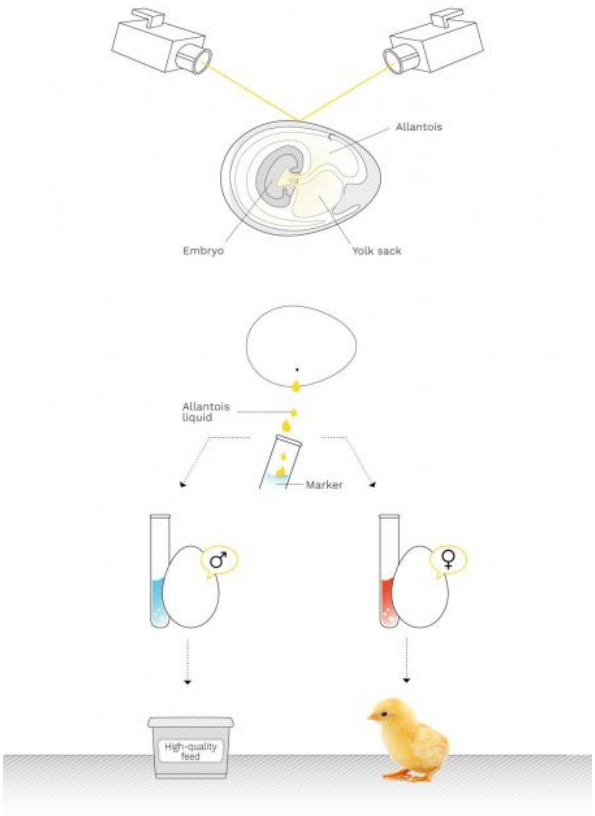


Figure 6.4 : Schéma explicatif fourni par la société © Seleggt (*Sciences & Avenir*, 03/01/2019)

Cette société a été fondée en mars 2017, bénéficiant de soutien du gouvernement allemand et différents investisseurs dont REWE (grand distributeur allemand), la firme des couvoirs hollandais (Hatch Tech) et l'université de Leipzig. Elle est issue directement des travaux de Weissmann *et al.* (2013). A. Einspanier, dernière auteure de cet article est membre fondateur de cette société.

La commercialisation est fortement engagée avec déjà 5 500 magasins offrant des œufs issus de poules sexées selon le plan REWE selon le site https://unitedegg.com/seleggt-announces-breakthrough-for-in-ovo-sexing/. Le procédé breveté devrait être disponible pour les couvoirs allemands dès 2020 d'après ce même site. Sur le site de SELEGGT, il est indiqué que « jusqu'à ce jour, 100 000 œufs ont éclos après utilisation de ce procédé. La précision du sexage est de 98%. Il est aussi indiqué que le coût par œuf pour le consommateur serait de 1 à 2 centimes, sans indication plus importante du business plan et de qui va supporter les investissements. Si on s'en tient à ce prix-là, et sachant qu'une poule pond environ 350 œufs, on peut penser que le surcoût engendré serait de 3,5 à 7 € par poule. Il faut bien comprendre que l'accouveur qui va supporter le coût d'un tel sexage, devra le répercuter chez l'éleveur qui sera obligé de le répercuter sur le prix de l'œuf. Ce qui constitue une augmentation entre 5 et 10% du coût de l'œuf qui reste modeste et on peut donc penser que ce surcoût ne sera pas un frein à l'achat.

In ovo – Biomarker detection (https://inovo.nl/solutions/in-ovo-egg-sexing/) (Pays-Bas)

Le test est applicable à partir de 9 jours d'incubation. Un échantillon de fluide est prélevé à l'intérieur du fluide allantoïque de l'œuf avec une seringue. Le test est basé sur une mesure des hormones spécifiquement mâles et femelles par un simple test colorimétrique en plaque. Selon le sexe de l'embryon, une couleur bleu ou rouge se développe.

In ovo est une jeune société fondée en 2013 par Wil Stutterheim and Wouter Bruins. Elle a été créée dans un seul but, prévenir l'abattage des poussins d'un jour. La commercialisation est envisagée, mais difficile de savoir à ce jour, le coût de revient. Le principe du test semble proche de celui développé par SELEGGT

EggXYt – Genetic alteration (https://www.eggxyt.com/) (Israël)

Le test est applicable dès la ponte de l'œuf. Pour cette technique, la société propose d'utiliser des souches éditées avec CRISPR-Cas9. Seuls les mâles seraient édités. Les femelles ne subissent pas de modifications géniques, ce qui rend cette solution acceptable aux yeux de leurs fondateurs. En dehors du fait que ces animaux subissent des manipulations génétiques, les lignées de reproductrices doivent être manipulées génétiquement, entraînant une dépendance certaine de la part de la filière. La fiabilité est de 100%. Son état d'avancement du développement commercial est au niveau du prototype 3.0 qui n'apparait pas encore suffisamment rapide pour des éclosoirs à grand débit. Le surcoût par œuf est annoncé à 1-3 centimes, sans savoir si ce coût inclut la machine. Ce coût serait donc de 3,5 à 10,5 € par poule entrant en production.

Spectroscopy – Analysis of fluorescence signals (tu-dresden.de) (Allemagne)

Il s'agit ici du prototype du test décrit par Galli *et al.* à l'université de Dresde (2018; 2016 ; 2017). Il repose sur une analyse d'un signal fluorescent sur les vaisseaux sanguins. Les vaisseaux sont illuminés avec un laser dans le proche infrarouge. Une bande de fluorescence est observée à 910 nm spécifiquement chez le mâle. Ce test serait applicable dès le 3ème jour d'incubation.

L'équipe fondatrice est dirigée par Roberta Galli and Gerald Steiner de l'université de technologie de Dresde. Il n'y pas de donnée actuelle sur l'état d'avancement en termes de commercialisation.

Hypereye – Hyperspectral imaging (Pas de site web) (Canada)

Cette technologie utilise une technologie hyper spectrale pour acquérir une signature spécifique au travers d'algorithmes mathématiques, pour déterminer s'il s'agit d'un embryon mâle ou femelle. Cette technologie serait applicable dès le jour de ponte.

Cette technologie est le fruit de travaux de recherche de Michael Ngadi, de l'université McGill (Montreal, CAN). Elle a reçu l'aide et le soutien financier du conseil des industriels de l'aviculture de l'Ontario, des fermiers de l'Ontario et d'un institut appelé "Livestock Research Innovation Corporation »

La commercialisation tarde à voir le jour. Plusieurs annonces avaient été faites sur le net (https://www.canadianpoultrymag.com/research/welfare/in-ovo-sexing-innovations-30458 , https://www.wattagnet.com/articles/28977-canadian-in-ovo-sexing-technology-prototype-expected-in-spring). Un prototype avait été annoncé pour 2018, avec un débit de 50 000 œufs par heure pour un surcoût d'environ 1 à 5 centimes de dollars canadien par œuf.

SOO – Méthode physique non invasive (France)

En 2016, le projet SOO a été retenu comme lauréat des projets agricoles et alimentaires d'avenir. La somme avait été intégralement allouée en 2017 au projet SOO, piloté par la société Tronico (La Roche-sur-Yon) en collaboration avec le Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Le projet SOO, avait pour objectif de mettre en place un système fiable et non invasif de prédiction du sexe du poussin avant éclosion de l'œuf. Deux techniques de laboratoire complémentaires ont été étudiées. Elles visent à atteindre une fiabilité de la prédiction de 90% du sexage *in ovo* à 9 jours d'incubation. Différence de taille avec la méthode Seleggt, la technique française devait être non invasive et basée sur deux techniques complémentaires : la spectroscopie (réponse à une impulsion lumineuse) et l'utilisation de biocapteurs. La durée estimative du projet était de deux ans et 7 mois jusqu'à la fin de la phase de test du prototype en accouvoir. En 2016, une étude de faisabilité était envisagée en vue de retenir l'une des deux méthodes testées, tandis que le développement du prototype devait être réalisé en 2017.

Depuis l'échéance annoncée a été repoussée à la fin 2019. Selon les propos rapportés par le magazine « Que choisir ? »[5], « les délais devraient vraisemblablement être tenus », selon Patrick Collet, directeur général de Tronico, qui précise que « le projet initié bien après celui de Seleggt tend à s'adapter à la réalité du marché, où les principaux couvoirs mondiaux produisent non pas des dizaines de milliers d'œufs par semaine mais par heure ! ». Le groupe français espère donc développer une technique à la fois plus rapide et moins chère que celle de son concurrent allemand pour proposer le sexage à tout type d'élevage, du bio à la cage.

5 Bien-être animal Une technique pour éviter le broyage des poussins mâles, Que-Choisir, 17 avril 2019 : https://www.quechoisir.org/actualite-bien-etre-animal-une-technique-pour-eviter-le-broyage-des-poussins-males-n65939/

6.2.1.4. Lignée de poules à double finalité (dual purpose)

Le principe du « dual purpose » correspond au développement de souches à double fin avec des femelles produisant des œufs et des mâles produisant suffisamment de chair pour être commercialisés est actuellement développée.

6.2.1.5. Vers un élevage plus éthique : l'exemple de Poulehouse

Dans cette partie, nous allons décrire un mode de production récent qui se veut éthique. Ce mode de production éthique est un exemple d'initiative actuelle. Il est à noter qu'il est encore très marginal en termes de production et n'est pas le modèle de production dominant et nul ne sait si ce mode de production se développera ou restera un marché de niche dans le futur.

Poulehouse est une société fondée par Fabien Saullman, Elodie Pellegrain et Sébastien Neuch. Le slogan de cette société est « *l'oeuf qui ne tue pas la poule* ». Ils se définissent comme « *Un mode de production responsable. Ethique. Innovant. De la production à l'assiette* ». Habituellement les poules sont abattues à 70-80 semaines lorsque leur productivité devient insuffisante. Poulehouse propose un mode d'élevage où la poule est maintenue en vie jusqu'à sa mort naturelle qui peut survenir à 7-12 ans d'âge. Les poules produisent des œufs en coquille de suffisante bonne qualité pendant environ 3 ans qui sont vendus à un prix d'environ 1 euro par œuf, soit 3 fois plus cher que les œufs bio. Le prix de vente des œufs permet ainsi de loger et de nourrir les poules jusqu'à leur mort naturelle.

Ce mode de production engendre un certain nombre de contraintes zootechniques telles que la maîtrise de la mue. En effet, une poule après 15-16 mois de production effectue une mue qui se caractérise par une regénération des tissus reproducteurs. Un mois après le début de la mue, la poule va pondre de nouveau des œufs de bonne qualité, mais la durée de ponte va diminuer rapidement au fur et à mesure des cycles. Cette mue peut être provoquée par une diminution de la lumière et des stratégies de rationnement énergétique de l'aliment. L'objectif de Poulehouse est de réaliser 3 mues séparées par des périodes de production de 9-12 mois. Pour le moment, le plus ancien troupeau a 3-4 ans. La gestion sanitaire des troupeaux âgés sera également un challenge lorsque les troupeaux seront en fin de vie.

Poulehouse produit des œufs de type bio (code 0), mais aussi des œufs de type fermier (code 1). Poulehouse a initié une collaboration avec la *start-up* allemande Seleggt, qui a mis au point une technique pour détecter le sexe du poussin dans l'oeuf et ainsi ne couver que les femelles (voir paragraphe 6.2.1.3). Deux de leurs élevages produisent déjà des oeufs qui ne tuent ni la poule ni le poussin mâle. A terme, ils souhaitent généraliser ce processus pour produire des « *œufs qui ne tuent pas la poule, ni le poussin mâle* »

La société Poulehouse a entamé de nombreuses campagnes de marketing de manière à promouvoir leurs produits. Il s'agit encore d'un marché de « niche », mais il reflète bien une tendance de producteurs pour aller vers des consommateurs souhaitant une consommation de produits en accord avec leurs convictions.

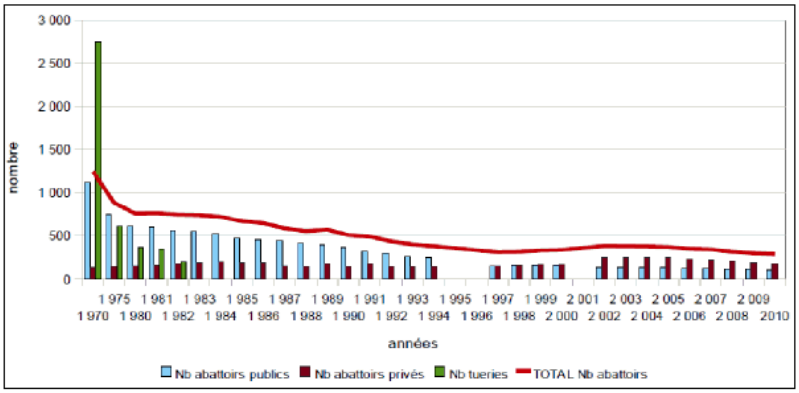
6.2.2. Abattage de proximité

Contexte actuel de l'abattage

Le nombre d'abattoirs de boucherie (bovins, ovins, caprins, porcins, équins) est passé d'environ 1 200 en 1970 (Commission d'enquête parlementaire sur les conditions d'abattage des animaux de boucherie dans les abattoirs français ; (Falorni et Caullet, 2016)) à 265 en 2018 (Les abattoirs en France : Questions – Réponse, 07/11/2018[6]). En 2015, 76 abattoirs de volailles et de lagomorphes de plus de 2,5 millions de têtes étaient en activité.

[6] https://agriculture.gouv.fr/les-abattoirs-en-france-questions-reponses

Figure 6.5 : Evolution du nombre d'abattoirs en France (Falorni et Caullet, 2016)



D'une façon générale, les étapes de pré-abattage industriel (chargement des animaux, transport, déchargement, hébergement et attente à l'abattoir, changement d'environnement, etc.) sont des sources de stress qui dégradent le bien-être animal et les qualités des viandes (Adenkola et Ayo, 2010 ; Njisane et Muchenje, 2017 ; Tarrant, 1990 ; Terlouw, 2018 ; Terlouw *et al.*, 2007; Terlouw *et al.*, 2015).

Des études expérimentales ont démontré l'avantage d'un abattage de proximité pour une meilleure préservation du bien-être animal (Astruc *et al.*, 2005 ; Eriksen *et al.*, 2013) et des qualités des viandes (Eriksen *et al.*, 2013). De plus, ce type d'abattage semblait mieux convenir à certaines catégories de consommateurs (Hoeksma *et al.*, 2017). C'est ce constat qui a incité des collectifs de producteurs (Association « Quand l'abattoir vient à la ferme » ; Association en faveur de l'abattage des animaux dans la dignité ou AFAAD) à faire pression sur les pouvoir publics en vue de pouvoir abattre à la ferme.

Le collectif « Quand l'abattoir vient à la ferme »[7] est né à l'automne 2015, à l'initiative de Jocelyne Porcher, directrice de recherches à l'INRAE et de Stéphane Dinard, éleveur en Dordogne. Différentes régions sont représentées dans ce collectif avec les départements de Loire-Atlantique, Gers, Dordogne et Mayenne, afin de promouvoir les solutions d'abattage à la ferme, de fédérer les éleveurs et faire émerger des projets.

Evolution de la réglementation

En 2018, l'article 73 de la loi Agriculture et Alimentation (République Française, 2018) a ouvert la voie à une expérimentation de quatre ans des abattoirs mobiles en France :

« À titre expérimental et pour une durée de quatre ans à compter de la publication du décret prévu au dernier alinéa du présent article, des dispositifs d'abattoirs mobiles sont expérimentés dans l'objectif d'identifier les éventuelles difficultés d'application de la réglementation européenne. L'expérimentation fait l'objet d'une évaluation, notamment de sa viabilité économique et de son impact sur le bien-être animal, dont les résultats sont transmis au Parlement au plus tard six mois avant son terme. Cette évaluation établit des recommandations d'évolution du droit de l'Union européenne ».

Un décret en Conseil d'État paru le 1er mai 2019 a précisé les modalités d'application (République Française, 2019).

Sur le plan sanitaire et environnemental, les abattoirs mobiles doivent respecter les règlements européens 853/2004 (Commission européenne, 2004) et 2017/625 (Union européenne, 2017) et l'arrêté du 8 juin 2006 modifié[8]. Une inspection *ante* et *post-mortem* devront être réalisées par un vétérinaire officiel ou un agent vétérinaire agissant sous contrôle d'un vétérinaire officiel. Une organisation doit être trouvée entre l'abattoir mobile et la Direction départementale de la protection des populations (DDPP) du département pour libérer un technicien vétérinaire d'un abattoir pérenne afin qu'il se rende sur l'exploitation en vue de l'abattage.

[7] https://abattagealternatives.wordpress. com/

[8] https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000023138831

Sur le plan environnemental, la législation sur les Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) devra être respectée pour obtenir l'agrément d'abattage. Or, un problème technique pour la récupération et la gestion des déchets (sang, eaux usées, têtes, viscères, cuirs) risque d'être complexe à résoudre au-delà d'un certain volume d'abattage. Par ailleurs, l'abattoir devra être totalement nettoyé et désinfecté entre deux exploitations agricoles.

Sur le plan de la protection animale, tous les opérateurs œuvrant à la mise à mort de l'animal devront être titulaires de leur certificat de compétence (article 7 et 21 du règlement UE 1099/2009 (Commission européenne, 2009b)).

Solutions techniques pour l'abattage à la ferme

Des équipements ont été développés pour répondre aux besoins de l'abattage sur le site de production.

Les caissons d'abattage

Il s'agit de structures légères transportables sur semi-remorque mais qui ne permettent que l'abattage et la saignée à la ferme. La carcasse doit être rapidement transportée dans un abattoir pour y être transformée au plus tard 1 h après la saignée ou 2 h si l'animal a été éviscéré. Règlementairement, l'utilisation des tels caissons doit émaner d'abattoirs de proximité fixes (le caisson étant considéré comme un prolongement de l'abattoir).

Les camions abattoirs mobiles

Ce sont des camions totalement autonomes qui disposent de tout l'équipement disponible dans un abattoir classique.

Exemples : Camion suédois « Hälsingestintan » https://abattagealternatives.wordpress.com/le-camion-suedois-halsingestintan/ utilisé en Suède.

Camion allemand « Metzger » https://abattagealternatives.wordpress.com/le-mobiler-metzger/ qui circule en Allemagne, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie sur le district de Cologne.

Camion autrichien « Schwaiger » https://abattagealternatives.wordpress.com/le-camion-autrichien-schwaiger/ utilisé en Hongrie, en Californie et en Argentine.

Ces abattoirs multi-espèces permettent d'assurer toutes les étapes de l'abattage et le transport réfrigéré depuis la ferme. Ils peuvent parcourir plusieurs centaines de kilomètres et opérer de fermes en fermes.

En France, Emilie Jeannin est à l'initiative de la construction d'un camion abattoir qui ira de ferme en ferme pour abattre les bêtes directement chez les éleveurs, comme cela se pratique déjà en Suède. Le camion sera soumis aux mêmes règles sanitaires qu'un abattoir traditionnel et devrait être terminé d'ici quelques mois. La demande d'agrément sanitaire sera ensuite examinée par les services concernés avant sa mise en fonction. Voir http://www.boeuf-ethique.com

Risques associés au développement de l'abattage à la ferme

La perspective de développement de l'abattage sur le site d'élevage n'est pas sans risque pour la filière. Les acteurs du développement de cet abattage alternatif sont généralement des militants en faveur de la préservation du bien-être animal. Néanmoins, la généralisation de ce type d'abattage pourrait conduire à des dérives chez des producteurs plus sensibles à l'aspect pratique et à l'image positive de l'abattage à la ferme qu'à la dimension du bien-être animal. Le caractère itinérant de l'abattage sur site de production complique également le contrôle de l'abattage par les agents de la DDPP.

Des études prospectives suggèrent que l'abattage de proximité serait bien perçu par le consommateur (Carlsson *et al.*, 2007 ; Hoeksma *et al.*, 2017). Cependant, même si l'abattage est réalisé dans des conditions qui respectent le bien-être animal par des agents titulaires de leur certificat de compétences tel que stipulé par l'article 7 et 21 du règlement UE 1099/2009, la maîtrise de la technologie d'abattage et les compétences requises pour garantir la qualité de la viande est plus aléatoire (Commission européenne, 2009b). La réglementation et les contrôles sont stricts pour le contrôle bactériologique et la qualité sanitaire. Un point de vigilance devra être apporté à la formation des agents d'abattage sur les liens entre la technologie-conduite d'abattage et les qualités sensorielles et technologiques des viandes. On peut citer en exemple le risque d'apparition de pétéchies si l'étourdissement électrique est défaillant ou mal appliqué ou encore la production de viande dure si la carcasse n'est pas refroidie selon une cinétique correcte et adaptée à l'espèce (contracture au chaud ou contracture au froid).

6.2.3. Innovations autour des transformations

6.2.3.1. Adapter les procédés à la variabilité de la matière première

Depuis plusieurs années, des travaux de recherche ont été impulsés sur des méthodes physiques pour améliorer les qualités gustatives des viandes et notamment la viande bovine, comme cela a été présenté dans les chapitres 1 et 2. Les australiens estiment que seulement 10% de la carcasse génère de la viande à griller (steaks tendres) (Polkinghorne *et al.*, 2008), ce qui signifie que le reste (90%) peut potentiellement bénéficier de procédés technologiques permettant d'améliorer la texture de la viande. Parmi les méthodes physiques figurent le champ électrique pulsé (en anglais, *pulsed electric fields ou* PEF), le traitement à hautes pressions (en anglais, *High Pressure Processing* ou HPP) ou, les ondes de choc et ultrasons, la cuisson sous vide à basse température et l'utilisation d'enzymes exogènes.

Le champ électrique pulsé (PEF) est une technologie qui implique l'application d'un champ électrique, sous la forme de courtes impulsions. Il conduit à la formation de pores au niveau de la membrane cellulaire lorsque le potentiel transmembranaire induit dépasse une valeur critique de 1 volt, déclenchant ainsi la formation permanente ou temporaire de pores voire la désintégration des cellules (Toepfl *et al.*, 2007). Dans le passé, ce traitement a été appliqué principalement à des fins de conservation des aliments pour le lait, les œufs et les jus de fruits. Récemment, il y a eu un regain d'intérêt pour les applications de PEF pour modifier la structure des aliments, et en particulier pour l'attendrissage de la viande, notamment bovine. Les changements ultrastructuraux qui s'opèrent au sein du tissu musculaire dépendent du niveau d'intensité électrique appliqué. En effet, les travaux de Khan *et al.* (2017) ont montré que de hautes intensités de PEF avaient un impact négatif sur l'oxydation des lipides et les pertes en eau. À l'inverse, les travaux relatifs à l'utilisation de faibles intensités de PEF ont souligné son intérêt dans le processus d'attendrissage de la viande de bœuf (Chian *et al.*, 2019). Ces auteurs ont objectivé les modifications structurales par des études au microscope électronique : longueur des sarcomères supérieure, dégradation des stries Z et des bandes I, Suwandy *et al.* (2015) ont identifié les protéines structurales impliquées, à savoir la troponine T et la desmine. Des études *in vitro* ont montré que le traitement au PEF augmentait la digestibilité des protéines (Chian *et al.*, 2019). L'action du PEF sur la matrice extracellulaire montre que le collagène devient plus soluble dès une température de cuisson basse (60°C ; (Alahakoon *et al.*, 2017)). Par ailleurs, ce traitement appliqué à des viandes de gibier reste sans effet notable (Bhat *et al.*, 2019). Il semble que le temps *post mortem* auquel ce traitement est appliqué montre une variabilité de résultats et nécessitera d'être optimisé à l'avenir si ce traitement était appliqué en routine et couplé à d'autres traitements technologiques comme la cuisson sous vide ou la congélation (Alahakoon *et al.*, 2019; Arroyo *et al.*, 2015 ; Faridnia *et al.*, 2015).

L'utilisation des HPP pour améliorer la texture fait partie des développements technologiques possibles. Le traitement HPP agit principalement par effets entropiques pour déstabiliser les protéines, et fonctionne donc par un mécanisme différent du chauffage, qui est principalement enthalpique. De ce fait, seules les liaisons non covalentes sont affectées, en particulier les interactions hydrophobes et ioniques. L'utilisation des HPP conduit généralement à une dénaturation des protéines, des agrégations voire une gélification, en fonction du système protéique, de la pression appliquée, de la température et la durée du traitement sous pression. Dans le secteur de la viande, la gamme de pression est généralement comprise entre 200 et 600 MPa. Les travaux récents de Kaur *et al.* (2016) ont montré que la désorganisation myofibrillaire observée allait de pair avec une meilleure digestibilité des protéines évaluée in vitro. Ce résultat serait à relier à un degré supérieur de dénaturation, d'extractibilité et de solubilisation des protéines à 600 MPa. Par contre, la viande traitée à 600 MPa ressemble en termes de couleur et de texture à de la viande cuite.

La cuisson sous vide à basse température est une méthode de cuisson dans laquelle les aliments sont scellés sous vide dans un sachet en plastique, puis placés dans un bain-marie pour obtenir une cuisson uniforme. Dans l'industrie de la viande, la température de cuisson peut varier de 55 à 80 °C pour des durées allant de 6 à 48 h (Baldwin, 2012). L'agence alimentaire américaine, l'USDA, recommande une température de 55 °C pour des rôtis de paleron et des durées de 24 à 48 h pour une solubilisation efficace du collagène.

L'utilisation d'enzymes exogènes comme l'actinidine provenant du kiwi a fait l'objet de travaux pour améliorer la texture de la viande (Toohey *et al.*, 2011), notamment en Australie et en Nouvelle-Zélande car ces pays sont d'importants producteurs de kiwis. Un des verrous liés à l'utilisation de cette enzyme réside dans la difficulté de contrôler son inactivation (Zhu *et al.*, 2018a). Les travaux des chercheurs néo-zélandais ont couplé le pré-traitement enzymatique avec une cuisson sous vide (Zhu *et al.*, 2018b). Les résultats montrent que cette action couplée permet de réduire la durée de cuisson sans affecter négativement les attributs sensoriels de la viande.

L'utilisation des ultrasons a été investiguée pour tenter d'améliorer la qualité de la viande. D'après certaines études scientifiques, l'application d'US améliore la texture des viandes et les propriétés fonctionnelles des émulsions, facilite les transferts de matière, réduit les développements bactériens sans dégrader les autres attributs de la qualité (Alarcon-Rojo *et al.*, 2015). Néanmoins, les effets des US sur la texture des viandes restent très controversés et des études scientifiques supplémentaires sont indispensables pour identifier les paramètres de fréquence et de puissance les plus efficaces et comprendre les mécanismes sous-jacents aux effets des US sur la structure et la physico-chimie des muscles (Warner *et al.*, 2017).

L'application d'ondes de choc (pression hydrodynamique) à des pièces de viande permet de réduire jusqu'à 25% la force de cisaillement des morceaux et donc d'en améliorer la tendreté (Bolumar *et al.*, 2013). L'onde de choc aurait un effet mécanique direct sur la déstructuration du tissu musculaire et accélérerait la maturation des viandes (Ha *et al.*, 2017). Cependant, les mécanismes associés à ces évolutions de texture restent mal compris (Bolumar *et al.*, 2014 ; Warner *et al.*, 2017). Les ondes de choc génèrent une augmentation des pertes d'eau à la cuisson et peuvent affecter la couleur de la viande (Ha *et al.*, 2017). Cette technologie n'est cependant pas encore appliquée dans l'industrie de la viande car les premiers tests utilisaient des explosifs et les résultats présentaient une trop grande variabilité. Des équipements utilisant une décharge électrique sont aujourd'hui disponibles, facilitant les expérimentations sur le sujet.

6.2.3.2. Impression 3D alimentaire

L'impression 3D (ou fabrication additive - FA) offre une énorme liberté de conception, de fabrication et d'innovation dans un grand nombre de domaines industriels, y compris dans l'alimentaire. Ce procédé permet de fabriquer des aliments de géométrie complexe, de texture élaborée et de qualité nutritionnelle élevée (Godoi *et al.*, 2016).

Description du procédé :

Le principe est similaire à celui d'une imprimante traditionnelle : l'imprimante 3D pour aliments chauffe les ingrédients avant de les déposer sur un support, couche après couche (technologie de dépôt de matière fondue). Une autre technologie, moins répandue et proche de l'impression 3D par frittage, utilise des ingrédients sous forme de poudre sèche, qui sont ensuite solidifiées par l'imprimante 3D alimentaire. Dans les deux cas, les imprimantes 3D procèdent à partir d'un fichier numérique conçu au moyen d'un logiciel de Conception assistée par ordinateur. Selon Le Tohic *et al.* (2018), pendant le procédé de dépôt de matière fondue, le produit est soumis à deux types de contraintes : i) un traitement thermique correspondant à la fusion du produit et ii) un cisaillement lors de l'extrusion au travers de la buse d'impression. Le procédé va donc influer sur les molécules constituant le produit alimentaire et modifier ses propriétés. La plupart des études portant sur des applications de FA au niveau de molécules d'intérêt, ont été réalisées sous l'aspect « imprimabilité » ; l'imprimabilité d'un matériau se définissant comme l'ensemble des propriétés permettant à celui-ci d'avoir une stabilité dimensionnelle suffisante pour supporter son propre poids (Godoi *et al.*, 2016).

Application à l'impression de produits animaux :

Relativement peu de produits riches en protéines d'origine animale, comme la viande, ont été étudiés en vue d'une application en FA (Dick *et al.*, 2019). Néanmoins, certaines études comme celle de Wang *et al.* (2018) sont très instructives sur les difficultés liées à ce type de matrices. En effet, ces auteurs ont étudié l'imprimabilité d'un gel de surimi, et se sont aperçus que celle-ci était meilleure avec une concentration en NaCl de 1,5%. Ce résultat concorde avec ceux de Severini *et al.* (2016) qui ont constaté une meilleure imprimabilité de préparations à base de viande de bœuf lorsque les protéines myofibrillaires étaient solubilisées, du fait de l'ajout de NaCl. Des observations en microscopie électronique ont montré que l'addition de NaCl avait entraîné des réticulations au niveau des protéines myofibrillaires, en permettant la liaison d'acides aminés libres aux protéines, en réduisant les espaces vides et en changeant la structure globale du gel en un réseau à brins fins (Wang *et al.*, 2018). L'impression de protéines est donc régie par les propriétés de ces dernières, et notamment par leur agrégation qui, elle-même, dépend du point isoélectrique. Godoi *et al.* (2016) affirment qu'il serait possible de créer de nouvelles textures en intercalant des couches de protéines alimentaires avec des couches de polysaccharides (p. ex. : alginate) ou en appliquant un stress thermique ou mécanique, ou en utilisant des ingrédients acides ou basiques pendant le procédé de FA pour agir sur l'agrégation. Enfin, Liu *et al.* (2017) avancent que, pour imprimer correctement des structures 3D à partir d'aliments, l'ajout d'agents texturants comme les hydrocolloïdes ou des protéines solubles capables de gélifier sont nécessaires. Ceci a été confirmé par Yang *et al.* (2018) pour l'impression de produits à base de viande de dinde. Afin d'obtenir des géométries complexes à partir de produits carnés, Lipton *et al.* (2015) ainsi que Godoi *et al.* (2016) préconisent l'utilisation de transglutaminase, une enzyme qui permet d'obtenir de nouvelles matrices protéiques en créant des liaisons covalentes entre des résidus lysine et glutamine, lors d'une réaction calcium-dépendante, ce qui forme des hydrogels

autoportants. Cependant, l'utilisation de ce type d'additif, bien que très intéressante du point de vue des effets sur les propriétés mécaniques résultantes, est en contradiction avec la tendance actuelle d'un retour à plus de naturel dans les aliments. Aussi, un produit développé par un tel procédé pourrait être mal accueilli par les consommateurs, sans parler de problèmes de règlementation dans certains pays. Le principal problème pour l'impression d'aliments reste donc l'obtention d'une texture adéquate, permettant une tenue en bouche agréable. Il reste donc à élaborer des stratégies d'impression permettant d'obtenir des structures maîtrisées, sans, si possible, utiliser d'additifs texturants.

Sécurité sanitaire et durabilité du procédé d'impression 3D :

De nombreuses équipes, à travers le monde, s'intéressent à la conception/fabrication d'aliments par FA, mais peu se sont focalisées sur les aspects sanitaires en lien avec ce nouveau procédé. Cette question se pose pour la phase d'impression, mais aussi pour la phase de conservation, aussi bien d'un point de vue microbiologique (bactéries pathogènes et d'altération, champignons) que chimique (oxydation, génération de composés néoformés). La plupart des imprimantes actuelles ayant été développées en laboratoire, ne sont pas conçues pour être facilement nettoyées et décontaminées. Les futures imprimantes alimentaires devront donc être fabriquées en acier inoxydable et répondre à des normes (Lipton *et al.*, 2015) afin de limiter les contaminations croisées entre aliments et minimiser le temps d'exposition à l'air libre du produit imprimé. Dans leur étude très récente analysant les applications potentielles de l'impression 3D pour la conception d'aliments à base de viande, Dick *et al.* (2019) ont conclu qu'une imprimante 3D devait être spécifiquement développée pour les produits carnés ; cette imprimante devrait être de type extrudeuse, composée d'un convoyeur à vis ou d'un système de seringue, et être dotée d'un contrôle continu de la température tout au long du circuit d'impression, depuis le système d'alimentation jusqu'à la plate-forme d'impression afin de réduire les risques liés à la sécurité alimentaire et de bien contrôler la rhéologie du produit pendant l'impression. Nous pouvons, aussi, citer les travaux très prometteurs d'une équipe de l'université de Columbia (travaux non publiés, diffusés par CNN Tech)[9]. Dans cette étude, les aliments sont imprimés puis cuits au moyen d'un laser placé directement dans l'imprimante. Cette approche est intéressante puisqu'elle permettrait de cuire les aliments couche par couche, et, de ce fait, de détruire les microorganismes directement au cœur de l'aliment.

Un certain nombre d'études traitant essentiellement de la fabrication d'objets, et non d'aliments, s'intéressent aux impacts de la FA sur l'environnement, ou tout du moins tentent d'investiguer ses impacts potentiels avant une industrialisation à grande échelle (Burkhart et Aurich, 2015 ; Jackson *et al.*, 2016). Ceci se traduit par une évaluation de la consommation énergétique (électricité) ou bien par une estimation de l'économie en matières premières (Huang *et al.*, 2013). Même si le gain en matière première inhérent à l'ajustement de la géométrie (Jin *et al.*, 2017) semble largement partagé, la question de la consommation électrique est plus problématique. Selon Kellens *et al.* (2017), l'énergie nécessaire par unité de fabrication est une à deux fois plus élevée pour la FA que pour un usinage conventionnel ou un moulage par injection, voire même jusqu'à cent fois (Yoon *et al.*, 2014). Les méthodes de FA n'étant, pour l'instant, que peu exploitées en conditions industrielles, il est donc difficile de quantifier les effets dans le cas d'une production de masse. À notre connaissance, seuls les travaux de Lupton et Turner (2016) et de Lupton (2017) évoquent le fait que des aliments issus de la technologie 3D pourraient avoir un impact positif sur l'environnement, en permettant de réduire les déchets, de réduire la part du transport avec une fabrication locale, de réutiliser des aliments classés comme non-consommables, d'utiliser des aliments de substitution ou bien encore de développer des emballages comestibles. Un procédé bien maîtrisé, associant impression et emballage, pourrait permettre de conserver l'aliment à température ambiante, ce qui pourrait réduire considérablement la consommation d'énergie, et serait fort utile dans les pays chauds.

Populations cibles :

Au vu du développement rapide de l'impression 3D en alimentaire, plusieurs auteurs (Derossi *et al.*, 2018 ; Kousani *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017 ; Severini *et al.*, 2018 ; Sun *et al.*, 2015a ; Wegrzyn *et al.*, 2012) s'accordent pour dire que la personnalisation de l'alimentation est une voie d'avenir dans ce domaine, qui pourrait être boostée par une large diffusion d'imprimantes culinaires domestiques. Liu *et al.* (2017) donnent, d'ailleurs, un aperçu des différentes applications de la personnalisation d'aliments : populations souffrant de pathologies, militaires, astronautes, femmes enceintes…, et des difficultés inhérentes : précision d'impression pour des structures délicates et complexes, vitesse d'impression… Parmi les populations concernées, la plus citée dans la littérature est celle des personnes âgées souffrant de sarcopénie ou de dysphagie. Il est estimé que les personnes de plus de 60 ans seront 1,4 milliard en 2030 et 2,1 milliards en 2050 à l'échelle mondiale (dont 202 millions de personnes de plus de 80 ans en 2030 et 434 millions en 2050) ; or, il n'existe pas de

[9] www.3dnatives.com/impression-3d-en-video-04022018/

dispositif thérapeutique efficace contre la sarcopénie. Une des stratégies thérapeutiques consiste à apporter les nutriments essentiels au travers de l'alimentation (Luo *et al.*, 2017). C'est à ce niveau que la FA alimentaire peut intervenir en proposant de nouveaux aliments à la composition maîtrisée et aux saveurs adaptées. Concernant la dysphagie dont souffrent 15 à 25% des seniors (Sun *et al.*, 2015b), le réflexe de déglutition étant altéré, la texture des aliments doit être adaptée sous la forme de purées ou de liquides épaissis (Kousani *et al.*, 2017). La texture de l'aliment est donc au centre des préoccupations pour les pathologies liées au vieillissement de la population. La conception d'aliments par impression 3D permettrait à ces populations de pouvoir consommer plus facilement des aliments riches en protéines animales, sans que ceux-ci ne soient forcément réduits en purée, en jouant sur la texture lors de l'impression.

Dans leur étude, Derossi *et al.* (2018) soulignent la difficulté qu'ont certaines personnes à respecter les recommandations nutritionnelles concernant la prise de cinq fruits et légumes par jour, étant donné que seulement 10% de la population italienne suivraient ces recommandations. En conséquence, certains enfants et adolescents souffrent de carences en vitamines et en minéraux, notamment en fer et en calcium. La personnalisation par impression 3D pourrait permettre de mettre au point des aliments ou des compléments d'aliments nutritionnellement adaptés à cette population, en jouant sur les saveurs et les textures. Derossi *et al.* (2018) ont proposé un snack composé des ingrédients suivants de façon à couvrir les besoins recommandés : banane (pour l'appétence), champignons déshydratés, haricots blancs, lait écrémé déshydraté, jus de citron, acide ascorbique et 11% de pectine pour la consistance et éviter la séparation de phases. Tous ces ingrédients ont été mixés, puis imprimés selon une géométrie définie, en contrôlant la vitesse et le débit d'impression. Malgré certaines difficultés d'impression, notamment rhéologiques, cette étude a prouvé qu'il était possible d'imprimer des aliments à fonctionnalités ciblées pour des enfants/adolescents.

Pour Lipton (2017), dans les populations occidentales, il existe deux raisons principales pour l'utilisation de la FA en alimentaire : la santé et les préférences des consommateurs. Cet auteur prend l'exemple de la population américaine, où 4% des personnes présentent des allergies alimentaires, où une fraction importante de la population a des problèmes de digestion (intolérance au lactose…), où 60 à 70 millions d'américains sont concernés par un régime alimentaire lié à différentes pathologies (maladie de Crohn, syndrome du côlon irritable…) et où 69% de la population est en surpoids ou obèse. Lipton (2017) pense que la personnalisation de masse de l'alimentation contrôlée par ordinateur permettrait, non seulement de faciliter la vie de certains malades, mais également d'abaisser la probabilité de contamination par un allergène ou d'exclure totalement un ingrédient.

Acceptabilité des consommateurs :

Une des voies d'application potentielle de la FA alimentaire est la fabrication de tissu musculaire à partir de cellules souches. Dans leurs études, Siegrist et Sutterlin (2017), ainsi que Carocho *et al.* (2015) ont montré que, sur ce point, les consommateurs étaient à la recherche d'aliments les plus naturels possibles, et que la production traditionnelle de viande était mieux perçue que la viande *in vitro*, même si cette dernière apparaît plus respectueuse de l'environnement et du bien-être animal. Néanmoins, ces travaux soulignent également que les consommateurs s'appuient sur des informations symboliques, mais à fort impact, pour évaluer un aliment. En réalisant une enquête auprès de 2 047 personnes, Brunner *et al.* (2018) ont constaté que les connaissances en matière d'impression 3D alimentaire étaient faibles. Néanmoins, ces auteurs ont pu tester l'effet positif d'informations ciblées sur les consommateurs, en mettant en avant que la technologie pourrait les soutenir dans la préparation de repas sains et individualisés, tout en ajoutant une dimension ludique. Lupton (2017) a confirmé ce résultat, en affirmant que pour être accepté, une nouvelle technologie ou un nouvel aliment doit convaincre les consommateurs de son potentiel et de sa valeur, tout en les rassurant. Or aujourd'hui, la conception d'un aliment par FA peut difficilement s'affranchir de l'emploi d'additifs (Hamilton *et al.*, 2018), notamment pour faciliter sa texturation, surtout dans le cas des produits carnés. Evans *et al.* (2010) ont mis en évidence que les consommateurs étaient aussi plus réticents aux modifications chimiques d'un aliment qu'aux modifications physiques. Or, pour l'instant, la FA cumule ces deux types de transformation. Tout l'intérêt est donc de poursuivre les recherches dans le domaine, de façon à limiter au maximum l'ajout d'additifs, tout en améliorant le procédé afin que les aliments conservent un côté « naturel » (Lupton et Turner, 2016). Cette vision permettra aux consommateurs de préserver le côté affectif associé à la nourriture et de passer outre l'aspect transgressif de la technologie. Cette étude montre aussi que, si la perception des aliments fabriqués par FA est orientée sur des aspects nutritionnels/santé, ou sur la lutte contre la malnutrition, alors la technologie pourra devenir un atout et non un frein à la consommation de produits imprimés. Les marchés de niche, la gestion des ressources naturelles, la sécurité alimentaire ou la créativité culinaire sont donc autant de facteurs qui permettront d'adopter ce type de procédé.

L'impression 3D alimentaire pourrait avoir toute sa place en tant que nouveau procédé, et ne serait pas plus révolutionnaire, dans la conscience collective, que l'utilisation du four à micro-ondes, à son époque. La génération Z (personnes nées à partir

de 2000), rien qu'en France, représentera demain, 75% des actifs. Cette génération va bouleverser les habitudes alimentaires que nous connaissons actuellement par l'utilisation des outils numériques et des réseaux sociaux, qui seront omniprésents, ce qui fera émerger de nouvelles façons de se nourrir, et où la FA trouvera assurément toute sa place. D'ailleurs, selon plusieurs études prospectives, une personne sur deux dans la catégorie des 18-24 ans serait prête à utiliser une imprimante 3D alimentaire dans l'avenir (The NPD Group, 2017[10] ; Kantar TNS, 2017[11]). Selon *The Nielsen Company* (2015)[12], quatre catégories de « Millennials », personnes nées entre 1980 et 2000 (ou génération Y), vont coexister : des consommateurs soucieux de l'environnement et de l'impact environnemental des procédés liés à l'alimentation, des personnes attirées par la haute technologie, des personnes soucieuses de leur pouvoir d'achat, et des personnes à la fois sensibles aux innovations, mais souhaitant conserver certaines valeurs traditionnelles. Une autre catégorie de personnes, cette fois multigénérationnelle, pourra avoir une forte influence sur la façon de consommer, en particulier les produits carnés : ce sont les adeptes du flexitarisme, chez lesquelles la consommation en produits carnés est modérée, réduite, voire fortement réduite, mais encore présente dans l'alimentation. Alors que les végétariens représentent moins de 2% de la population française et les végétaliens 0,5%, les flexitariens représentent 34% des foyers, avec 19% des flexitariens ayant moins de 35 ans (Kantar WorldPanel, 2016[13]). Cette population, convaincue des problèmes écologiques qui existent, pourrait être sensible à des arguments relatifs à la valorisation de coproduits et à la limitation du gaspillage alimentaire. Les flexitariens pourraient également être une cible privilégiée pour la conception de nouveaux aliments à base de différentes sources de protéines. Sur ce point, l'étude de Noort *et al.* (2017) est intéressante. En effet, ces auteurs, en plus d'avoir développé un pilote imprimant 60 repas à l'heure, ont procédé à des tests d'enrichissement d'un produit initial. En travaillant sur des produits végétaux, ils ont conservé 80% de l'ingrédient principal, et ajouté 20% de protéines, de matières grasses, de micronutriments et d'agents gélifiants. Ceci montre qu'il est possible d'imprimer des aliments comportant différentes sources de protéines ou d'autres macromolécules. Il est donc tout à fait envisageable d'utiliser une approche similaire pour les produits animaux, en adoptant une démarche de développement durable dans laquelle des produits carnés, des matières grasses et des protéines d'origine végétale, ou provenant d'algues, de champignons ou d'insectes pourraient être combinés.

6.2.3.3. La bio-préservation des aliments

La préservation de la qualité et la sécurité des produits alimentaires fermentés repose sur l'activité des micro-organismes. La bio-préservation s'inspire de ce principe, elle consiste à appliquer sur un aliment des souches bactériennes sélectionnées, de manière à inhiber la flore pathogène et d'altération qui pourrait s'y trouver, sans modifier les propriétés organoleptiques et sensorielles de cet aliment (Le Fur *et al.*, 2013). La bio-préservation de distingue donc de la fermentation pour laquelle l'activité des flores entraîne une modification importante des caractéristiques organoleptiques des matières premières.

L'utilisation de la bio-préservation dans le domaine industriel est relativement récente, les premiers développements et applications aux produits de la mer datent d'une dizaine d'années. Comme pour la fermentation, la bio-préservation utilise essentiellement des bactéries lactiques (Champomier-Verges *et al.*, 2001 ; Ghanbari *et al.*, 2013 ; Leroi *et al.*, 2015). La bio-préservation est principalement appliquée aux produits réfrigérés faiblement préservés et à durée de vie courte. Elle est utilisée en complément à d'autres mesures de maîtrise (comme une « barrière » supplémentaire) (Wiernasz *et al.*, 2017) comme le conditionnement sous-vide ou sous atmosphère protectrice. Les premières études ont porté sur la lutte contre les bactéries pathogènes, avec l'utilisation de bactéries productrices de bactériocines à spectre d'action limité. Plus récemment, la bio-préservation a vu son spectre d'utilisation étendu à la lutte contre l'altération (Zagorec *et al.*, 2015). Au-delà de l'inhibition par des molécules inhibitrices comme les bactériocines (Galvez *et al.*, 2007) ou les acides organiques (Zagorec *et al.*, 2015), la bio-préservation repose sur des mécanismes de compétition pour les nutriments (Fall *et al.*, 2010) et pour l'espace (Saraoui *et al.*, 2017).

---

[10] The NPD Group (2017). Millenials : les 18-34 ans redessinent la restauration de demain www.npdgroup.fr

[11] Kantar TNS (2017). FoodTech: les Millenials révolutionnent l'alimentation www.mbanmci.com. (https://mbamci.com/foodtech-millenials-et-alimentation/)

[12] The Nielsen Company (2015). Zoom sur les Millenials www.nielsen.com

[13] Kantar Worldpanel (2016). A la découverte des « flexitariens » : Qui sont ces foyers qui souhaitent réduire leur consommation de protéines animales ? Newsletter n°48. https://www.kantarworldpanel.com/fr/A-la-une/Newsletter-48

Bio-préservation des produits de la mer

Les flores utilisées pour la bio-préservation sont souvent sélectionnées des flores lactiques retrouvées chez des poissons parmi les genres *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Lactobacillus, Lactococcus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Streptococcus, Vagococcus* et *Weissella* (Leroi, 2010). Les bactéries lactiques issues de produits marins sont idéales pour développer une méthode de bio-préservation (Podeur, 2014). Elles sont en effet adaptées à la croissance à basse température et sont compatibles avec l'environnement des produits de la mer (utilisation d'atmosphère modifiée, concentration en sel ou présence d'additif). Plusieurs études ont porté sur le saumon (Leroi *et al.*, 2015) et la crevette (Saraoui *et al.*, 2017) ainsi que sur les produits riches en histidine (Podeur, 2014).

Bio-préservation des viandes

La bio-préservation des viandes repose généralement sur les bactéries lactiques isolées de ces produits (Vermeiren *et al.*, 2004). Elle trouve son application dans les viandes fraîches (Castellano *et al.*, 2008), les viandes cuites (Jacobsen *et al.*, 2003) et même le jambon sec (Andrade *et al.*, 2014).

Développements futurs

Les études scientifiques sur la bio-préservation trouvent dès aujourd'hui leur place sur le marché industriel (*cf.* par exemple https://www.chr-hansen.com/fr/food-cultures-and-enzymes/meat-and-seafood/safepro ou http://www.bioceane.com/fr/bio-preservation). Cependant des perspectives s'ouvrent avec l'avènement des méthodes de séquençage à haut débit qui donnent l'opportunité de de mieux connaître les communautés bactériennes présentes dans les aliments (Zagorec *et al.*, 2015). Plusieurs études ont ainsi permis de mettre en évidence des espèces jusque-là inconnues ou inattendues dans le contexte des aliments (Chaillou *et al.*, 2015). L'étude des dynamiques des différentes genres ou espèces bactérienne au cours de la durée de vie des produits a permis de mettre en évidence des mécanismes d'interactions complexes et de remettre en cause les rôles précédemment décrits de ces flores (Chaillou *et al.*, 2015 ; Kergourlay *et al.*, 2015 ; Rouger *et al.*, 2017). L'apport des méthodes de séquençage pourrait à terme participer à une meilleure utilisation de la bio-préservation (Ferrocino et Cocolin, 2017).

6.2.4 Conditionnement et emballages des produits animaux

6.2.4.1. L'emballage est indispensable pour la conservation des produits animaux

Les emballages et, plus généralement, les matériaux au contact des aliments accompagnent l'évolution des pratiques industrielles de transformation des produits carnés et des modes de consommation. L'éloignement des lieux d'abattage et de consommation rendent indispensable l'utilisation de matériaux d'emballage, non seulement pour sa conservation, mais aussi sa transformation. Face au risque microbiologique, il n'y a pas d'alternatives. Dans les sociétés traditionnelles où les carcasses (les poissons) sont manipulées et stockées avec un minimum de réfrigération, une rotation rapide doit être assurée. La viande abattue ou les poissons pêchés la nuit ou le matin sont consommés le jour même. La viande ou les poissons frais ne sont pas emballés ou simplement dans du papier ou des feuilles. La viande et les poissons conservés après séchage sont parfois emballés dans des paniers, des poteries, des sacs en lin pour les protéger de la saleté et des insectes (FAO *et al.*, 1990).

Dans nos sociétés modernes, les produits carnés préemballés sont distribués et achetés par les consommateurs et les métiers de bouche. Ils bénéficient d'une durée de conservation allant de plusieurs jours à plusieurs mois, voire années pour les produits stérilisés. Le conditionnement offre de nombreux avantages : individualisation des parties comestibles, valorisation des bas morceaux par leur incorporation dans des recettes, traçage des matières premières avant mélange, support d'information pour les conditions de conservation et d'utilisation. Une date limite de consommation est apposée dès qu'il y a un risque microbiologique ; une date limite d'utilisation optimale est indiquée dans les autres cas (p. ex. conserves). Les matériaux ont évolué depuis les travaux pionniers d'Appert (1810), mais l'enjeu de salubrité perdure comme le montre l'inventaire présenté dans le tableau ci-après. On peut retenir quelques grands principes (Maheswarappa *et al.*, 2016). La surgélation permet de conserver tous les types de produits (solides, semi-solides, liquides) en vrac ou non (Leygonie *et al.*, 2012). Les contraintes sur les matériaux d'emballage sont faibles aux températures de surgélation (-30 °C à -18 °C) : ne pas être fragile pour les corps creux et être caoutchoutique pour les films. Les cartons sont utilisables. Aux températures de réfrigération (2 à 4°C) et en l'absence de stabilisation thermique préalable, une action bactériostatique complémentaire est requise pour prévenir le développement de la flore végétative au-delà de quelques jours (Koutsoumanis *et al.*, 2006 ; Zhou *et al.*, 2010). L'emballage permet ainsi de moduler la composition de l'atmosphère autour de l'aliment : sous-vide, atmosphère enrichie ou contrôlée en oxygène, atmosphère enrichie en dioxyde de carbone (CO_2) (Jeremiah, 2001). L'enrichissement en CO_2 au-delà de 10% et le conditionnement sous vide permettent d'inhiber la croissance de la flore

aérobie psychrophile. Leurs effets peuvent être complétés par des systèmes intelligents (Mohebi et Marquez, 2015) ou actifs (McMillin, 2017).

Aperçu des différents types de conditionnement des produits animaux en fonction des traitements thermiques appliqués et des conditions de conservation.

TRAITEMENT DE STABILISATION	CONDITIONS DE STOCKAGE	PRODUITS TYPES	EMBALLAGES TYPES	COMMENTAIRES
aucun	congelé pendant quelques mois	carcasse découpée, viande en vrac, poissons	cagettes en PS expansé ou PP, films en PEBD, cartons	produits avec une DLUO.
aucun	réfrigéré pendant quelques jours	viande et poisson découpés	barquettes en polystyrène thermoformées, films PEBD ou de PET biorienté	produits avec une DLC.
aucun	Réfrigéré pendant quelques semaines	viande découpée sous atmosphère modifiée	films complexes incluant une couche de PET ou de PP biorienté avec un dépôt d'aluminium sous vide, une couche EVOH ou PVDc	produits avec une DLC.
aucun	température ambiante pendant quelques semaines	œufs frais	boîte à œufs en carton recyclé, PS thermoformé	produit avec une DLC.
cuisson	Congelé pendant plusieurs mois	plats prêts à manger à base de viande ou de produits de la mer	films en LDPE	produit avec une DLUO.
fermentation, séchage	température ambiante pendant une année	jambons, saucisses, saucissons	films PP, barquette en PET	les durées de vie sont modulées par l'activité de l'eau, le pH et la présence de nitrites. Produit avec une DLC.
fermentation, séchage et découpé	Réfrigéré pendant quelques semaines	jambons, saucisses, saucissons	barquettes en PET	produit avec une DLC
Saumures acides ou salées avec cuisson préalable	Réfrigéré pendant un an	produits cuits conservés dans l'huile, le vinaigre	pots en verre	produit avec une DLC ou DLUO
Cuisson sous vide (60°C)	réfrigéré, quelques jours (si pas de pasteurisation préalable) à semaines (si pasteurisé)	plats cuisinés	sacs en LDPE ou complexe	produit avec une DLC
Pasteurisation (68°C-82°C), semi-conserves	stockage à 2-4°C (sans interruption) pendant 3 à 6 mois	plats cuisinés	sacs en LDPE, barquettes PP, poches laminées collées, bocaux en verre	un traitement thermique entre 82°C et 100°C à cœur permet d'inactiver la flore végétative, mais pas les spores des bacilles et des clostridiums. Produit avec une DLC
Cuisson jusqu'à 100°C à cœur	un an si stocké à moins de 10°C	cuisson dans la matière grasse, plats cuisinés	barquettes PP, pots en verre	produit avec une DLC
Conserve (température >110°C)	3 ans	jambon cuit, saucisses avec jus, préparation avec sauce bolognaise, bœuf salé, émincés de porc, viande hachée, bœuf en sauce, poulet avec du riz, soupes contenant à base de viande de poulet ou de bœuf, plat prêt-à-manger, etc.	conserve métallique (acier, aluminium), en verre ou en PP, poches laminées collées	produit avec une DLUO. La flore végétative et sporulée est détruite.

Les premiers comprennent des indicateurs de l'apparition de produits de dégradation (Pacquit *et al.*, 2007) ou de toxines (Ghaani *et al.*, 2016), des indicateurs plus globaux de de la qualité des produits (Heising *et al.*, 2014), des intégrateurs temps-température (Gregor-Svetec, 2018; Kerry *et al.*, 2006). Les systèmes actifs sont généralement inclus dans l'emballage et diffusent de manière passive ou active des substances antimicrobiennes. Pour les produits animaux, les bactériocines produites les bactéries lactiques (Aymerich *et al.*, 2008 ; Calo-Mata *et al.*, 2008 ; Leroi, 2010) sont les plus étudiées, car elles sont classées GRAS (en anglais, *Generally Recognized As Safe*) par la *Food and Drug Administration* (FDA) américaine. La nisine (Mauriello *et al.*, 2005; Siragusa *et al.*, 1999) est la plus fréquemment citée. Les autres substances antimicrobiennes incorporables aux emballages incluent les huiles essentielles (Chouliara *et al.*, 2007 ; Karabagias *et al.*, 2011), le chitosane, le lysozyme (Zhou *et al.*, 2010), le dioxyde de chlore (Cooksey, 2005) et les ions argent (Fernandez *et al.*, 2009). Ces développements ne se substituent toutefois pas aux approches de prévention des risques de type HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point* ou Analyse des dangers et points critiques pour leur maîtrise - Cutter, 2002). Le choix de l'emballage semble par ailleurs sélectionner une certaine flore au détriment d'autres germes initialement présents (Labadie, 1999).

6.2.4.2. Des technologies d'emballage sophistiquées pour les produits animaux

Il est recommandé de considérer les étapes de conditionnement, stabilisation avec son emballage et de conservation comme une seule opération unitaire qui requiert une ingénierie appropriée (Brody *et al.*, 2008). Le conditionnement aseptique est de loin l'opération la plus complexe à mettre en œuvre et la plus risquée (Ansari et Datta, 2003). Les opérations de traitement thermique doivent tenir compte des propriétés de transfert et de l'inertie thermique des matériaux. Les matériaux plastiques seuls ou en complexes (p. ex. : poches pour les produits semi-liquides, briques pour le lait) ont favorisé le développement des traitements thermiques temps courts à ultra-haute température qui préservent mieux les qualités nutritionnelles et organoleptiques (Al-Baali et Farid, 2006). Leurs performances techniques tiennent notamment à la présence d'une couche d'aluminium qui favorise l'uniformisation du traitement thermique et la rapidité du chauffage (Lamberti et Escher, 2007). De la même manière, l'effet inhibiteur des atmosphères enrichies en CO_2 sur les flores aérobies Gram négatif dépend fortement du design de l'emballage : volume de l'espace de tête, cinétique de dissolution du CO_2 dans l'aliment, prise en compte du risque de collapse de l'emballage (Simpson *et al.*, 2009). De manière générale, les matériaux choisis doivent être barrières aux gaz et thermoscellables. Cela comprend les mono matériaux (barquette épaisse en polypropylène (PP) ou PET, film en PP ou PET biorienté), les complexes lamellés-collés (avec une couche ou un dépôt d'aluminium, complexe polyéthylène-polyamide), les matériaux avec un couchage de PVDc sur la face extérieure (Doyle et Buchanan, 2012) ou une couche d'Éthylène-alcool vinylique (EVOH) interne (Troy et Kerry, 2010). Il est important de remarquer que les contraintes de barrière dépendent très fortement du rapport surface sur volume de l'aliment emballé. Les contraintes techniques sont beaucoup plus élevées pour les découpes en filets que pour toutes les autres géométries. La viande fraîche dans un emballage transparent requiert une pression partielle en oxygène suffisante pour conserver sa couleur rouge vif, sinon elle prendra rapidement une couleur brunâtre qui lui donnera un aspect cuit. Le changement de couleur est contrôlé par l'état d'oxydation de la myoglobine (oxy- ou met- myoglobine) et le métabolisme résiduel du muscle ; il se produira rapidement si le volume d'espace de tête est trop réduit et/ou si la durée de conservation dépasse quelques jours. Les solutions techniques utilisées seules ou en combinaison comprennent l'enrichissement de l'atmosphère autour du produit en oxygène, le conditionnement directement sur le site de distribution ou de vente, le choix d'un matériau relativement perméable à l'oxygène (Hotchkiss, 1994 ; McMillin, 2008). Pour les durées de conservation courtes, les films de PE-BD ont remplacé les films de PVC (polychlorure de vinyle) plastifiés, sources de phtalates (Page et Lacroix, 1995). Les machines de conditionnement pour les produits animaux réfrigérés à défilement horizontal, ou vertical pour plus de compacité, ont intégré progressivement les différentes contraintes techniques : aseptisation des matériaux, prévention des contaminations aériennes (surpressions, flux laminaire), contrôle des pressions et de la composition de l'atmosphère, scellage et détection des fuites (McMillin et Belcher, 2012). Outre le maintien de la sécurité microbiologique de l'aliment, l'emballage doit protéger aussi les produits animaux gras de l'oxydation (Campo *et al.*, 2006 ; Gomez-Estaca *et al.*, 2014; Jensen *et al.*, 1998). Des compromis doivent être trouvés dans le cas de l'utilisation d'atmosphères modifiées enrichies en oxygène (Camo *et al.*, 2008; Insausti *et al.*, 2001). Des travaux pionniers ont considérés que c'était l'intégrité cellulaire dans son ensemble qui devait être protégée par l'emballage et le conditionnement (Stanley, 1991). Les aliments mixtes comprenant, par exemple, une garniture à base de produits animaux (exemple du sandwich au pâté) doivent être considérés comme des produits animaux avec les mêmes contraintes microbiologiques et de durée de vie (Smith *et al.*, 2004).

6.2.4.3 Les matériaux d'emballage source d'innovation pour les produits animaux

Le conditionnement aseptique permet de réduire l'énergie nécessaire à la stabilisation des aliments, la complexité de l'emballage et finalement les coûts de distribution (Karel et Lund, 2003). L'emballage en plastique accompagne également tous les procédés athermiques de stabilisation des aliments en étant transparent aux rayonnements ionisants, à la lumière

pulsée, aux champs électriques pulsés, aux champs magnétiques, aux décharges électrostatiques, et en transmettant la pression hydrostatique et les ultrasons de l'extérieur vers le contenu (Aymerich *et al.*, 2008 ; Morris *et al.*, 2007). La pression hydrostatique revêt un intérêt tout particulier pour minimiser l'endommagement des tissus au cours de la congélation et décongélation. Suivant le principe de Le Chatelier, la température de congélation est abaissée de 0°C à 0,1 MPa à -21°C à 210 MPa. Il est ainsi possible de congeler et de décongeler instantanément les produits animaux à des températures négatives en déplaçant la pression hydrostatique (Cheftel *et al.*, 2000). Les hautes pressions entre 600 et 800 MPa ont été également proposées pour stériliser les aliments faiblement acides avec des températures modérées sans induire d'effet de cuisson (températures de 30 à 90°C, durées d'exposition inférieures à 5 min) (Bermudez-Aguirre et Barbosa-Canovas, 2011).

A la différence des autres produits, les solutions d'emballages pour les produits animaux s'appuient essentiellement sur les polymères de grande diffusion. Les matériaux biosourcés restent encore peu étudiés pour la distribution de produits réfrigérés (McMillin, 2017). Le cahier des charges des matériaux d'emballage pour les produits animaux varie de spécifications simples (prévenir la perte de poids et le séchage, l'apparition de défauts d'odeurs ou goût, fournir de l'information) à très contraignantes (maintenir la couleur de la viande, augmenter la durée de vie, améliorer la qualité sensorielle, résister à des traitements thermiques humides) en passant des prérequis plus ou moins facilement atteignables en fonction des propriétés de surface, de la cristallinité et de la température de transition vitreuse des polymères considérés (films étirables, scellables, imprimables) (Maheswarappa *et al.*, 2016). Les emballages comestibles offrent une piste supplémentaire pour les produits animaux qui a encore été trop peu explorée (Majid *et al.*, 2018).

6.2.4.4 Les impacts environnementaux des aliments animaux emballés

Les consommateurs sont de plus sensibles aux impacts environnementaux de l'emballage des aliments consommés. De manière erronée, ils pensent que l'emballage à des impacts supérieurs aux produits animaux qu'ils contiennent (Tobler *et al.*, 2011). Les matériaux plastiques parce qu'ils sont légers offrent les meilleures performances environnementales pour les produits animaux (Hospido *et al.*, 2006). L'emballage et les moyens pour contrôler le respect de la chaîne du froid permettent de réduire les pertes alimentaires dues à une mauvaise conservation (Poyatos-Racionero *et al.*, 2018). On notera toutefois que le nombre de brevets sur les emballages actifs et intelligents dépasse très largement le nombre d'applications industrialisées actuellement, pour des raisons de coût notamment (Holman *et al.*, 2018).

Construire une sécurité sanitaire qui repose exclusivement sur le respect de la chaîne de froid a un coût énergétique important et est un pari particulièrement risqué quand plusieurs conditions critiques sont rencontrées : éloignement des zones de production et de consommation, climat chaud, charge microbienne initiale importante, pays en voie de développement. L'emballage et les actions correctrices après conditionnement (p. ex. : remplissage à chaud, traitement de stabilisation) et avant consommation (p. ex. : réchauffage, cuisson) doivent alors être imaginés comme un tout. Les traitements peu énergivores (irradiation, champs électriques ou lumière pulsée, emballages actifs) sont probablement des pistes à approfondir pour concilier à la fois des objectifs environnementaux et de durée de conservation des produits animaux.

6.2.4.5 Les matériaux d'emballage sont une source de contamination chimique pour les produits animaux

Les matériaux d'emballage au contact des aliments ou non sont la première source de contaminants chimiques dans les aliments (Groh *et al.*, 2019), dont des perturbateurs endocriniens (Hahladakis *et al.*, 2018). La réglementation européenne est extrêmement stricte pour les matériaux en plastiques utilisés en contact avec les aliments (Commission européenne, 2011). Des règles similaires existent aux États-Unis (21 CFR 175-19) et plus récemment en Chine (GB 9685-2016). Les crises sanitaires sont le plus souvent associées aux matériaux qui ne sont pas réglementés spécifiquement. Les produits animaux n'ont pas été épargnés. La contamination du lait infantile par les photo-initiateurs issus des encres d'impression des emballages en brique est la plus emblématique (Aparicio et Elizalde, 2015 ; Lago *et al.*, 2015), car elle a mis en évidence une mauvaise compréhension des mécanismes de transferts de contaminants et des moyens pour les contrôler (Gillet *et al.*, 2009). La crise du bisphénol A et de ses variants (Hengstler *et al.*, 2011) a également touché plusieurs produits animaux suivant que la molécule était utilisée comme monomère dans les biberons en polycarbonate (Russo *et al.*, 2018) ou comme un agent réticulant dans les vernis éxpoxyphénoliques des boîtes de conserve de poisson (Liao et Kannan, 2014). La contamination des viandes et poissons par les composés perfluorés issus des papiers et cartons utilisés dans les fast-foods a également été mise en évidence (Tittlemier *et al.*, 2007). Les emballages en carton recyclé sont un réservoir considérable de molécules cancérigènes, appelées de manière générique huiles minérales aromatiques (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, 2012). Dans le cadre du règlement européen 2023/2006 (Commission européenne, 2006), seules de bonnes

pratiques ont été mises en place pour gérer ce risque (CEPI, 2012). En l'état actuel des connaissances, l'agence fédérale de veille sanitaire allemande déconseille l'utilisation des emballages et articles contenant des matériaux fibreux recyclés à haute température (Bundesinstitut für Risikobewertung, 2019). Les travaux de l'Inra (Nguyen *et al.*, 2017) ont montré que la contamination pouvait se produire sans contact via la phase gazeuse y compris aux températures de réfrigération.

Le recyclage des matériaux augmente les risques de contamination secondaire des matériaux d'emballage (Geueke *et al.*, 2018). Le danger réel est plus lié à l'exposition à un cocktail de substances aux effets similaires plutôt qu'à l'exposition chronique à une seule substance (Kortenkamp, 2007 ; Lee, 2018).

6.2.4.6 Conclusions

La conservation, la transformation et la distribution des produits animaux sont indissociables de l'emballage et de ses évolutions. La sécurité microbiologique atteinte aujourd'hui est très élevée, mais elle s'est faite sans prendre en considération les impacts environnementaux et les risques de contamination chimique associés aux matériaux. Il y a un besoin de plus d'intégrations. Sans être spécifiques aux produits animaux, des méthodes très haut débit d'écoconception et de conception sûre d'emballages ont été développées à l'Inra (Guillard *et al.*, 2017; Nguyen *et al.*, 2013 ; Zhu *et al.*, 2019). Ces approches doivent être étendues pour intégrer les conditions de stabilisation de l'aliment et des capacités de microbiologie prédictive. Dans une logique d'éco-efficience, les circuits courts combinés à des emballages optimisés pour des traitements thermiques brefs, un réchauffage et un refroidissement rapides devraient ouvrir le champ à de nouveaux produits peu formulés et stables aux températures positives. L'étude des matériaux biosourcés pour les produits animaux doit être renforcée. Il s'agit notamment de mieux maîtriser la sécurité des emballages cellulosiques primaires (emballages jetables) et secondaires (cartons utilisés tout le long de la filière). L'utilisation des polymères biosourcés thermoplastiques doit être encouragée. Après une maîtrise des contraintes de réhydratation et développement microbien, les polymères comme l'acide polylactique et le polyhydroxyalcanoates (PLA et PHA) ou les films protéiques peuvent offrir une alternative aux matériaux de synthèse.

Il faut relancer également la recherche de procédés alternatifs aux traitements thermiques traditionnels potentiellement plus efficients (Zhang *et al.*, 2019) (lumière pulsée, ultrasons, irradiation, plasma froid, hautes pressions, champs électriques pulsés) en prenant en compte l'aide offerte par l'emballage lui-même (emballage actif, intelligent, atmosphère modifiée). Le chauffage ohmique (Goullieux et Pain, 2014), diélectrique (Orsat et Raghavan, 2014) ou par induction offrent de nouvelles alternatives pour la préparation finale des produits animaux et à leur leur réchauffage en restauration collective. Le refroidissement sous vide, la congélation assistée par hautes pressions ou ultrasons sont d'autres pistes potentielles, où une fois encore l'emballage est indispensable.

6.3. Reformulation des produits – « Innovations produits »

6.3.1. Pourquoi et comment re-formuler avec un objectif d'amélioration de l'offre et/ou santé

Dans un contexte global d'amélioration des choix alimentaires, deux types d'interventions sont possibles :

- sensibiliser les consommateurs à la relation entre l'alimentation et la santé, par des campagnes d'information et d'éducation, c'est-à-dire définir des recommandations nutritionnelles. Si les analyses de ces politiques publiques montrent qu'elles ont des effets, leurs portées ne sont pas toujours importantes.
- faciliter les choix sains au travers une reformulation des produits mis sur le marché. La reformulation correspond à une réduction (sel, sucre par exemple) voire suppression (acides gras trans par exemple), ou à l'inverse augmentation (fibres par exemple) de certaines composantes des aliments afin d'améliorer la qualité nutritionnelle sans impacter les caractéristiques du produit que sont la saveur et la texture, par exemple.

Dans plusieurs pays, les agences de santé publique ont mis en place des partenariats avec l'industrie alimentaire afin d'améliorer la qualité nutritionnelle des aliments mis sur le marché. En France, l'Observatoire de la qualité de l'alimentation (Oqali) a fait en 2016 une l'évaluation des interventions visant à améliorer l'offre alimentaire, dans le cadre d'engagements volontaires formulés au sein des chartes du PNNS ou des accords collectifs du Programme national pour l'alimentation (PNA). Pour illustrer l'impact de la reformulation, l'exemple de la teneur en sel et acides gras trans des chips est très représentatif avec, grâce à cette politique de reformulation, une très forte diminution sur ces deux composantes (Spiteri et Soler, 2018).

Concernant les produits étudiés dans l'ESCo, les produits ciblés par des engagements sont principalement les charcuteries avec des reformulations visant à diminuer leurs teneurs en lipides et/ou sodium. Pour beaucoup, les produits ciblés avaient avant reformulation des teneurs en sodium et/ou lipides supérieur à la moyenne de la gamme choisie et ne sont pas des produits hauts de gamme mais sont en général des produits accessibles au consommateur (Spiteri *et al.*, 2016).

En parallèle de ces démarches déjà appliquées dans les filières pour améliorer la qualité nutritionnelle des produits mis sur le marché par réduction en sel et/ou sodium, des travaux de recherche sont en cours pour identifier des solutions innovantes permettant de substituer les matières grasses des produits carnés par des matières végétales (principe de *fat substitute*) ou des solutions permettant de limiter l'impact de la consommation de viandes de boucheries hors volailles et charcuteries sur le risque de cancer :

- Les *fat-substitute*

La simple réduction de la teneur en matière grasse animale dans le saucisson sec entraîne inévitablement une perte d'arôme, souvent difficilement acceptée par le consommateur. Olivares *et al.* (2010) ont déterminé que la limite entre l'acceptabilité et le rejet par les consommateurs de saucissons secs fermentés à teneur réduite en matière grasse correspondait à une teneur initiale en matière grasse de 16%. Plusieurs études font état de travaux visant à substituer une partie de la matière grasse animale par des gels de cellulose dérivés de la fibre de maïs, ou par du glucomannane, un polysaccharide extrait du konjac, une plante originaire du sud-est asiatique. Campagnol *et al.* (2012) ont montré qu'il était possible de remplacer 50% de la graisse de porc par un gel de cellulose sans nuire à la qualité des saucissons et de fabriquer des produits dont les taux de gras et de cholestérol étaient, respectivement, réduits de 45% et 15%. Malgré quelques différences de texture, les produits fermentés, dans lesquels 50% et 80% de la graisse de porc avaient été remplacés par du konjac ont été jugés acceptables par un jury de dégustateurs (Ruiz-Capillas *et al.*, 2012). Récemment, Alejandre et al. (2016) ont mis au point, avec succès, une émulsion gélifiée de carraghénane à haute teneur en AG n-3 comme substitut de matière grasse animale afin d'améliorer la composition en acides gras des saucissons secs fermentés. Ils ont montré que le taux de remplacement des matières grasses animales pouvait atteindre 32,8% sans causer de défauts importants en termes de couleur, de goût et de jutosité des produits finis.

De nombreuses études ont également cherché à quantifier l'effet de l'ajout de fibres, souvent d'origine végétale, en tant qu'ingrédient fonctionnel, sur le plan sensoriel et la sécurité microbiologique de saucissons fermentés à teneur réduite en matières grasses animales. García *et al.* (2002) ont investigué l'effet de l'ajout de fibres provenant de fruits (pêche, pomme et orange) et de céréales (blé et avoine), à des concentrations de 1,5% et de 3%, sur les propriétés sensorielles de saucissons fermentés ne contenant, initialement, que 6% et 10% de graisse de porc. Les meilleurs résultats sensoriels ont été obtenus dans le cas de produits fabriqués avec 10% de graisse de porc et 1,5% de fibres d'orange. Le même type de résultat a été obtenu pour des saucissons contenant jusqu'à 50 g/kg d'albédo de citron cru déshydraté ou 75 g/kg d'albédo de citron cuit déshydraté (Aleson-Carbonell *et al.*, 2004). Mendoza *et al.* (2001) ont testé l'incorporation d'inuline en poudre et ont démontré la faisabilité d'un tel procédé pour fabriquer des charcuteries sèches fermentées, avec 40 à 50% de gras de porc en moins et 30% de calories en moins, mais enrichies de 10% de fibres alimentaires. L'ajout de fibres issues de carottes est une autre alternative, à condition que la concentration n'excède pas 3%, pour éviter des problèmes de fermentation, et donc de texture (Eim *et al.*, 2008). Récemment, Sanchéz-Zapata *et al.* (2013) ont étudié l'effet de l'ajout de fibres de noix de tigre (de 1% à 2%), seules ou combinées à de l'huile de noix (2,5% - 5%), sur certains paramètres physiques, chimiques, microbiens et sensoriels de saucissons secs, démontrant ainsi l'utilité de l'incorporation de fibres de noix de tigre, riches en composés antioxydants, pour contrôler l'augmentation de l'oxydation lipidique qui survient suite à l'ajout d'huile de noix. Enfin, Salazar *et al.* (2009) ont montré que l'ajout de fructo-oligosaccharides à chaîne courte, à des concentrations initiales de 2%, 4% et 6%, ne modifiait pas les qualités sensorielles des produits, tout en permettant de réduire de 58% la teneur en matière grasse et d'incorporer, dans le produit fini, jusqu'à 8,7% de fibres.

L'incorporation d'huiles végétales, de poissons ou de micro-algues constitue également une voie technologique prometteuse pour améliorer le profil lipidique des saucissons secs, en augmentant le taux d'acides gras insaturés au détriment du taux d'acides gras saturés. Parmi les huiles testées, on peut citer l'huile de lin à 3,3% (Ansorena et Astiasaran, 2004), l'huile d'olive jusqu'à 20% (Muguerza *et al.*, 2002 ; Utrilla *et al.*, 2014), l'huile de soja à 20% (Muguerza *et al.*, 2003), l'huile de poisson désodorisée jusqu'à 30% (Josquin *et al.*, 2012) et des huiles issues de micro-algues, jusqu'à 15% (Valencia *et al.*, 2007). La plupart de ces huiles ont été incorporées sous forme d'émulsions, voire micro-encapsulées, afin de faciliter le mélange avec la viande de porc hachée. Récemment, Lorenzo *et al.* (2016) ont fabriqué du *salchichón* espagnol présentant un meilleur profil lipidique, en substituant partiellement jusqu'à 75% du gras de bardière de porc par de l'huile de poisson micro-encapsulée dans une matrice de glucomannane de konjac. Cependant, bien que cette reformulation ait été

technologiquement réalisable, la plupart des propriétés sensorielles des produits, ainsi que l'oxydation lipidique, ont été négativement affectées. En règle générale, lorsque les concentrations d'huile et les taux de substitution excèdent une certaine limite, des défauts inacceptables surviennent lors de la fabrication des charcuteries sèches. Lorsque le taux d'incorporation est modéré, les saucissons secs fabriqués présentent une augmentation très significative de leurs fractions d'acides gras insaturés, une réduction marquée du taux de cholestérol, et donc une amélioration sensible de leurs qualités nutritionnelles (Muguerza *et al.*, 2004). Cependant, il faut veiller à ce que l'ajout d'huile ne contribue pas à augmenter l'oxydation des lipides. Des antioxydants sont donc souvent associés à cette incorporation d'huile. La tendance actuelle consiste à ajouter des antioxydants naturels extraits de plantes, bien qu'ils semblent moins efficaces que des antioxydants synthétiques tels que le butylhydroxyanisol (BHA) et le butylhydroxytoluène (BHT), suspectés de favoriser la formation de certains cancers. García-Iñiguez de Ciriano *et al.* (2009) ont démontré avec succès l'aptitude d'extraits de feuilles de bourrache, à une concentration de 340 ppm par kg, à retarder l'oxydation dans des chorizos de Pamplona enrichis en acides gras polyinsaturés n-3, suite à la substitution de 25% de la graisse de porc par une émulsion d'huile de lin. Plus récemment, Ba *et al.* (2016) ont étudié les effets antioxydants et antibactériens d'extraits de sous-produits de shiitake dans des saucissons secs pendant leur stockage jusqu'à 30 jours, à 15 °C. L'analyse de leurs résultats montre clairement que cet extrait, ajouté à un taux de 0,6%, a permis de limiter l'augmentation de l'oxydation des lipides lors du stockage des produits, ainsi que la croissance de bactéries pathogènes tels que *Staphylococcus aureus, Listeria monocytogenes et Escherichia coli O 157* (Ba *et al.*, 2016). Enfin, l'incorporation de carotène au travers de l'ajout de poudre de peau de tomate (jusqu'à un taux de 1,2%) dans des saucisses sèches fermentées s'est avérée être un moyen efficace pour limiter l'oxydation lipidique, tout en exploitant de manière rentable un coproduit industriel (Calvo *et al.*, 2008).

Jusqu'à ces dernières années, très peu d'études avaient investigué les effets d'une réduction du sodium et de la matière grasse animale dans les produits de charcuteries sèches, sans doute parce que ces deux réductions combinées entraînent une perte très marquée de l'arôme et du goût typique de ce type de produits. Il convient de citer les travaux de Beriain *et al.* (2011) qui ont montré que la substitution de 50% de la matière grasse animale par une émulsion d'eau, d'huile d'olive et d'alginate, avec ou pas de l'inuline, combinée à une substitution de 58% du chlorure de sodium par 20% de chlorure de potassium et 38% de chlorure de calcium, n'impactaient pas trop négativement le procédé de fabrication de chorizos de Pampelune : aucune différence dans la cinétique de pH ou sur les évolutions des populations microbiologiques n'a été détectée. Les chorizos contenant de l'alginate étaient, toutefois, plus brillants et plus durs que les traditionnels, à l'exception de ceux contenant 6% d'inuline. Lors de la fabrication de saucissons secs fermentés, Safa *et al.* (2015) ont montré qu'une réduction combinée des teneurs en sel et en matière grasse animale augmentait l'acidification, les pertes de poids des produits ainsi que l'activité de l'eau finale, amplifiait la protéolyse et réduisait la lipolyse, ainsi que les oxydations de protéines et de lipides, altérant ainsi probablement les attributs sensoriels des produits finis. Ces mêmes auteurs ont quantifié les effets d'une substitution partielle combinée de NaCl par du KCl et du gras de bardière par de l'huile de tournesol sur les principaux paramètres physiques, chimiques et biochimiques, ainsi que sur la couleur et la texture des produits en fin de séchage, tout en évaluant l'acceptabilité par le consommateur de ces nouvelles charcuteries. Ces auteurs ont montré que les teneurs en sodium et en acides gras saturés pouvaient être réduites jusqu'à 30% et 60%, respectivement, sans impacter négativement les propriétés texturales finales et la couleur des saucissons secs, ainsi que l'acceptabilité par le consommateur (Safa *et al.*, 2016). Le même type d'étude a été réalisé dans le cas de saucisses fermentées de petit calibre par Mora-Gallego *et al.* (2016), qui ont constaté qu'une réduction des teneurs en NaCl et en matière grasse, de 2,5% à 1,5% et de 33,2% à 15,1%, respectivement, combinée à l'ajout de 0,64% de KCl et de 1,5% d'huile de tournesol, contribuaient à accroitre l'acceptabilité des consommateurs.

Plusieurs études ont donc été menées, ces dernières années, pour améliorer le profil nutritionnel des charcuteries sèches fermentées (saucisses, saucissons, salamis…), et donc améliorer leur qualité d'image, en modifiant le profil lipidique ou en incorporant des fibres alimentaires ou des antioxydants naturels. Des saucissons secs auxquels des probiotiques ont été ajoutés ont même été produits avec succès (Klingberg *et al.*, 2005 ; Mutbukumarasamy et Holley, 2006). Plusieurs revues traitent donc de ce sujet (De Vuyst *et al.*, 2008 ; Drosinos et Paramithiotis, 2012 ; Jimenez-Colmenero, 2007 ; Muguerza *et al.*, 2004; O'Shea *et al.*, 2012 ; Toldra et Reig, 2011 ; Zhang *et al.*, 2010)). Cependant, chaque fois qu'un nouvel ingrédient est incorporé ou chaque fois que les teneurs en sodium ou en matière grasse animale sont diminuées, il est essentiel d'évaluer les conséquences de ces modifications sur les qualités organoleptiques, sanitaires et sensorielles des nouveaux produits.

- *Limitation de l'association positive entre consommation de viandes de boucherie hors volailles et charcuteries sur le risque de cancer*

L'association positive entre consommation de viandes de boucherie hors volailles, charcuteries et risque de cancer a été expliquée, pour tout ou partie, par l'effet de plusieurs produits néoformés pendant la cuisson ou la digestion : dans les produits carnés, les amines hétérocycliques issus de la cuisson ; pendant la digestion les alcénals issus de la peroxydation lipidique endogène induite par le fer héminique et les composés N-nitrosés issus de la nitrosation endogène induite par le fer héminique et facilitée par la présence de nitrites et ou nitrates dans les charcuteries (*cf.* chapitres 2 et 3).

Sur cette base, plusieurs travaux ont évalué la possibilité de limiter la formation de ces composés néoformés (Corpet, 2011) :

- limitation de la formation des amines hétérocycliques :

Les antioxydants naturels contenus dans les épices et les herbes ont été étudiés en tant qu'inhibiteurs de la formation d'amines hétérocycliques dans les viandes soumises à un traitement thermique. Dès 2007, Gibis *et al.* (2007) ont évalué les effets de l'application de marinades à l'huile avec de l'ail, de l'oignon et du jus de citron sur la formation d'amines aromatiques hétérocycliques dans du bœuf frit. Ils ont démontré une réduction significative et croissante des amines hétérocycliques dans le bœuf en fonction de l'ajout de quantités d'ail et d'oignon dans les marinades. Une teneur plus élevée en jus de citron dans les marinades n'avait à l'inverse entraîné qu'une réduction marginale. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs études, dont l'étude de Sepahpour *et al.* (2018) avec une réduction optimale de la formation des amines hétérocycliques dans le bœuf grillé par une marinade curcuma/citronnelle.

Si ces études ont évalué précisément l'impact sur la formation des composés néoformés dans la viande, elles n'ont toutefois pas évalué les conséquences sur le risque. D'autres types de stratégies ont été étudiés avec une analyse des conséquences sur le risque associé

- limitation de la peroxydation lipidique et de la nitrosation :

Une fois ce lien proposé entre la peroxydation lipidique / nitrosation endogène induites par le fer héminique et la promotion de la carcinogenèse colorectale par les viandes de boucherie hors volaille et charcuteries, un levier de prévention nutritionnelle apparaît possible. En effet, il semble possible de limiter alors cet effet promoteur en limitant la peroxydation et nitrosation endogène. Dans ce sens, l'ajout de calcium (participe à la chélation du fer héminique) ou d'antioxydants (vitamine E par exemple) dans le régime des modèles animaux de carcinogenèse colorectale a été suffisante pour limiter la peroxydation luminale hème-induite et en parallèle l'effet promoteur de la viande bovine (Pierre *et al.*, 2008) et de la viande transformée (Pierre *et al.*, 2013 ; Santarelli *et al.*, 2013). A terme, ces travaux démontrant que la supplémentation du régime alimentaire peut être efficace pour limiter l'effet promoteur, devrait permettre l'établissement de nouvelle recommandation du type « Mangez un produit laitier riche en calcium ou un produit riche en antioxydant lors de la consommation de viande rouge et/ou de charcuterie ».

En parallèle à l'établissement d'une recommandation nutritionnelle, la reformulation des charcuteries mises sur le marché a été testée. Ces travaux ont permis de démontrer que l'ajout de vitamine E (acétate de D-alpha-tocophérol) ou de polyphénols pendant la fabrication de la viande transformée était suffisant pour limiter la peroxydation lipidique endogène et l'effet promoteur de la carcinogenèse dans un modèle animal (Bastide *et al.*, 2017; Pierre *et al.*, 2013). Deux études ont permis d'évaluer l'efficacité chez l'homme de ces stratégies basées sur l'enrichissement en antioxydant : i) validation de la limitation de la formation des produits néoformés endogène chez des volontaires sains et ii) évaluation de l'effet protecteur des antioxydants au sein de la cohorte E3N. Chez les volontaires sains, ces travaux ont permis de démontrer que l'ajout de vitamine E dans la charcuterie pendant sa fabrication était suffisant pour limiter, comme chez le rat, la peroxydation lipidique et la nitrosation endogène au niveau du côlon (Pierre *et al.*, 2013). Enfin, les travaux récents sur la cohorte E3N ont permis de démontrer qu'un statut antioxydant élevé du régime protége contre l'association positive entre le fer héminique et le risque d'adénomes coliques (Bastide *et al.*, 2011). D'autres travaux, sans aller jusqu'à l'évaluation des effets physiopathologiques dans des modèles animaux de carcinogenèse colorectale, ont abordé la question de la reformulation des produits en suivant l'impact sur la formation des alcénals et les composés *N*-nitrosés dans le produit. En ce sens, Demeyer et de Smet, dès 2010, soulignaient la nécessité d'investir dans la recherche d'alternatives aux nitrites pour limiter la formation des composés N-nitrosés (Demeyer et de Smet, 2010). En parallèle, l'ajout d'épices antioxydantes (acide rosmarinique) pendant la cuisson des produits carnés a ainsi fait baisser les niveaux d'adéhydes issus de la peroxydation hème-induite dans la viande ainsi que dans le plasma et l'urine après ingestion par des volontaires sains (Li *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2010). L'ajout de polyphénols végétaux dans la production des saucisses séchées a été aussi associée à des niveaux inférieurs de TBARS, un marqueur de peroxydation lipidique, et de *N*-nitrosamines dans le produit (Li *et al.*, 2013). Sur la base de travaux proposant un possible

effet protecteur contre la carcinogenèse colorectale du calcium, des antioxydants et des acides gras polyinsaturés oméga-3, l'enrichissement des charcuteries pendant la fabrication en antioxydants végétaux, en calcium et en AGPI n-3 à longue chaîne avait aussi été testé du point de vue technologique sans en évaluer toutefois les conséquences biologiques après consommation (de Ciriano *et al.*, 2013; Doolaege *et al.*, 2012 ; Raes *et al.*, 2004). Pris ensemble, ces travaux apportent la preuve du concept de l'efficacité biologique de la reformulation et montrent ainsi que la reformulation des charcuteries est une solution pour limiter le risque de cancer associé à leur consommation. Toutefois des travaux complémentaires sont nécessaires pour une application directe dans la filière.

Parallèlement, la solution des marinades des viandes bovines efficace pour limiter la formation des amines hétérocycliques dans les viandes bovines cuites (*cf.* ci-dessus) a aussi été testée quant à sa capacité à inhiber l'effet de la consommation de viande boucherie hors volailles sur le risque de cancer via la limitation de la peroxydation endogène. Martin *et al.* (2018) ont démontré que, sans effet néfaste sur la qualité organoleptique de la viande, la marinade aqueuse raisin/olive a normalisé les biomarqueurs de peroxydation lipidique endogène dans deux modèles animaux de carcinogenèse colorectale et chez les volontaires sains et limité significativement la promotion de la carcinogenèse dans les deux modèles animaux.

- modifier le profil lipidique des produits carnés ou du régime associé.

Le remplacement des acides gras saturés alimentaires par des acides gras polyinsaturés (AGPI), en particulier les acides gras n-3, présenterait un bénéfice santé, particulièrement pour les fonctions cardiovasculaires (Clifton et Keogh, 2017). En ce sens, les stratégies d'élevage ou de production visant à enrichir les produits animaux en AGPI sont particulièrement d'intérêt (Ponnampalam *et al.*, 2018). Toutefois, les AGPI, en particulier les acides gras n-3 ayant un indice de double liaison élevé, sont sujets à l'oxydation par des oxydants alimentaires comme le fer héminique, donnant lieu à des composés terminaux de peroxydation lipidique tels que les aldéhydes. Ces aldéhydes, largement utilisés comme biomarqueurs systémiques de l'oxydation lipidique et du stress oxydatif, sont associés à l'effet promoteur des produits carnés sur le risque de cancer du côlon (I. chapitre 3 ; Bastide *et al.*, 2015). Donc, dans un objectif global d'amélioration de la santé humaine, l'enrichissement des produits animaux en AGPI peut également augmenter la formation de ces aldéhydes, en particulier dans le cas d'un régime déséquilibré pro-oxydant/antioxydant. En ce sens, les travaux de Guéraud *et al.* (2015) ont montré que chez le rat, le fer héminique alimentaire catalyse plus fortement la formation de ces aldéhydes dans un régime alimentaire riche en AG n-3 en comparaison à un régime riche en AG n-6 ou riche en graisse saturée. Ainsi si l'enrichissement des produits animaux en AGPI est une stratégie d'intérêt pour atteindre des objectifs santé chez le consommateur, il semble important d'évaluer finement les conséquences sur la formation des aldéhydes lors de la consommation en particulier en fonction de l'équilibre oxydant/antioxydant du régime.

- changement de la quantité de nitrites (réduction ou retrait) ou de la forme de l'apport en nitrites (« nitrites fermentaires ») :

Bien que les taux résiduels de nitrate et de nitrite présents dans les charcuteries sèches ne présentent pas vraiment de problème, sauf si accident de fabrication, une forte pression existe dans l'opinion publique afin de réduire au maximum, voire même de supprimer, l'emploi de nitrites dans les charcuteries. Dans ce sens, dès 2010, des travaux conduits avec un modèle animal de carcinogenèse colorectale proposait que le couple fer héminique plus nitrites expliquait tout ou partie de l'effet promoteur des produits charcutiers et montraient que produire une charcuterie modèle sans nitrites permettait de limiter le risque de carcinogenèse colorectale dans ce modèle animal (Santarelli *et al.*, 2010). Toutefois, sur le plan technologique, la réduction, voire la suppression du nitrate/nitrite, ne va pas sans poser des problèmes, du fait des nombreuses réactions générées par la mise en contact du nitrite avec les différents composants de la matrice carnée. Du fait de la complexité du système réactionnel, Jiménez-Colmenero *et al.* (2001) précisent même qu'il est impossible de trouver un composé unique capable de remplacer l'ensemble des fonctions du nitrite. Seule une combinaison de plusieurs composés pourrait supplanter les effets positifs sur la couleur et sur l'arôme et le rôle antimicrobien et antioxydant joué par le nitrite. Pichner *et al.* (2006) ont confirmé que la suppression pure et simple du nitrate et du nitrite dans le cas de salamis, sans suffisamment de connaissance technologique permettant de corriger le procédé, conduisait à des produits de très mauvaise qualité sensorielle (décoloration au centre des produits) et microbiologique (survie de bactéries Gram-). Un moyen de réduire l'ajout direct de nitrite et de nitrate est d'incorporer des poudres de légumes (céleri, betterave, poireau…) qui sont riches en nitrate. Cela impose d'ajouter des flores microbiennes pour assurer la réduction du nitrate en nitrite. Tsoukalas *et al.* (2011) ont montré que l'ajout de 0,84% de poudre de poireau, fournissant 75 mg/kg de nitrate, associé à 75 ppm de nitrite ne modifiait nullement les étapes de fermentation et de séchage et permettait de conserver les mêmes qualités organoleptiques et sensorielles, lors de la fabrication de saucissons secs. Cet ajout a permis de réduire de 50% l'emploi de nitrite et d'éliminer l'emploi de nitrate « chimique ». A partir d'un essai réalisé avec un dosage échelonné de nitrate, Schlüchter *et al.* (2010) ont montré que, lors de la fabrication de salamis, le salpêtre, source de nitrate, pouvait être partiellement remplacé par de la

poudre de légumes, sans problème microbiologique particulier. Cependant, des teneurs élevées en poudre de légumes ont réduit l'aptitude au pelage et augmenté la consistance des salamis. Une étude de l'institut technique du porc, l'IFIP, a montré que le nitrite produit à partir de nitrate d'un bouillon de légumes fermenté possédait les mêmes propriétés de conservation du jambon cuit que le sel nitrité (https://www.ifip.asso.fr/sites/_default/files/pdf-documentations/fiche_2017_041.pdf). L'utilisation d'extraits de plantes riches en nitrate et non de nitrate/nitrite comme additif peut ainsi apparaître comme une alternative. Cependant, ce n'est en fait qu'une « pseudo solution » puisque le risque lié aux résidus de nitrites est le même (Talon *et al.*, 2015). Outre le fait de réduire directement la quantité de nitrate ou/et de nitrite ajoutée lors de la fabrication, une autre voie possible serait d'intervenir directement sur la chaîne de réactions conduisant à la formation des nitrosamines, en utilisant des antioxydants : vitamine C, polyphénols, ascorbate, erythorbate (Jimenez-Colmenero *et al.*, 2001 ; Toldra et Reig, 2011).

S'agissant du sujet nitrate/nitrite dans les charcuteries, il convient de parler de la fabrication du jambon de Parme qui semble paradoxale, dans la mesure où seul du chlorure de sodium est ajouté lors de sa fabrication, sans qu'aucun problème microbiologique, ni défaut de coloration, ne surviennent. En effet, aucun nitrate ni nitrite n'est ajouté au chlorure de sodium et pourtant, la coloration du jambon de Parme est d'un rouge brillant, très stable. Wakamatsu *et al.* (2004) ont suggéré que cette couleur proviendrait de la protoporphyrine-zinc IX (ou ppz), dans laquelle l'atome de fer de l'hème est remplacé par un atome de zinc, dont la viande de porc est riche. L'enzyme zinc-chelatase semble être impliquée dans cette réaction, en catalysant la substitution du fer par le zinc ; l'activation de cette enzyme serait accrue par la présence de sel et nécessite une durée d'affinage allongée, puisque la fabrication du jambon de Parme dure 2 ans environ (Benedini *et al.*, 2008). En 2007, Wakamatsu *et al.* (2007) ont précisé qu'il s'agissait plutôt de l'insertion d'un atome de zinc directement dans la protoporphyrine. Récemment, Wakamatsu *et al.* (2010) ont mis en évidence que l'ajout de nitrite dans les charcuteries, par la formation d'oxyde nitrique (NO), inhibait la formation de protoporphyrine IX, précurseur du complexe protoporphyrine-zinc IX. Ce mécanisme expliquerait pourquoi le complexe ppz n'existerait qu'en faible quantité dans les produits de salaison dans lesquels du nitrite a été incorporé, à la différence du jambon de Parme (Adamsen *et al.*, 2006). En plus du chlorure de sodium, il semble que l'ajout d'ascorbate améliore la formation de ppz. Ce mécanisme offre donc une piste intéressante pour obtenir des produits de charcuteries sèches qui soient colorés, sans ajout de nitrite.

L'utilisation de nitrate/nitrite dans la fabrication des charcuteries reste donc très controversée. Faut-il interdire l'usage de ces substances, compte tenu de la toxicité du nitrite ? Ou faut-il continuer à autoriser leur usage en quantité très limitée, compte tenu des nombreux effets positifs sur les qualités sensorielles et sanitaires des charcuteries ? Ce qui est certain c'est que de nouvelles études sont nécessaires pour élucider tous les mécanismes mis en jeu dans la chimie des nitrites et dans ses interactions avec les composants de la matrice de viande, à la fois lors de la fabrication des produits de charcuterie, mais aussi lors de la digestion dans le tube digestif, car les charcuteries sont couramment consommées, lors d'un repas, avec de l'eau, des fruits et des légumes (Safa *et al.*, 2017). Pour exemple, le projet Adduits (2018-2021), associant la FICT, l'Inra, l'IFIP, l'ADIV et de nombreux professionnels de la filière charcuterie, va étudier le devenir des nitrites et des composés hème-nitrosylés lors de la digestion et visera à apporter des solutions pour réduire le recours aux additifs et aux conservateurs ou pour éliminer leurs effets potentiellement négatifs suite à leur utilisation, tout en maintenant la sécurité sanitaire des produits (FICT, 2018). Dans ce projet les différentes solutions évoquées ci-dessus seront testées quant à leur impact sur (i) la formation des composés toxiques associés au risque et (ii) sur le risque de carcinogenèse colorectale : la réduction des nitrites, le retrait des nitrites et l'ajout d'antioxydants.

Les nitrites jouent un rôle important dans la maitrise des flores microbiennes. La réduction en nitrite modifie l'inhibition des flores pathogènes et d'altération (Perea-Sanz *et al.*, 2019). Les nitrites ont un rôle particulièrement important dans la maitrise de *Clostridium perfringens* (Redondo-Solano *et al.*, 2013) et *Listeria monocytogenes* (Christieans *et al.*, 2018). Afin de palier ces modifications, l'utilisation d'autres barrières aux développements des flores indésirables peuvent être utilisées. Les solutions de bioprotection (Nikodinoska *et al.*, 2019) avec des antimicrobiens naturels (Sojic *et al.*, 2019) et l'optimisation des procédés (Bombrun, 2013) sont d'ores-et-déjà envisagées.

6.3.2. Substituts végétaux partiels et totaux dans les produits animaux

6.3.2.1. Pourquoi et comment intégrer protéines et graisses végétales dans les produits animaux ?

L'incorporation de protéines végétales dans les viandes préparées n'a pas d'intérêt particulier en terme nutritionnel. Les protéines végétales étant de qualité nutritionnelle inférieure aux protéines animales leur incorporation ne pourra que

diminuer la qualité nutritionnelle du produit. Par contre, cette incorporation peut se justifier sur le plan de l'image et sur le plan économique. Sur le plan de l'image, une substitution partielle des protéines animales par des protéines végétales permet de réduire la production de viande et ses potentiels effets néfastes pour la planète. Il existe ainsi sur le marché différentes préparation de viandes hachées incorporant jusqu'à 50% des protéines de soja. Les protéines de soja sont de plutôt bonne qualité nutritionnelle, mais de tels niveaux d'incorporation réduisent significativement l'apport en minéraux et vitamines de la viande. Pour une portion de 100 g le bénéfice nutritionnel ne sera donc pas le même. Le bénéfice économique pour le transformateur est, lui, indéniable. On retrouve la même approche avec les produits laitier en incorporant des protéines végétales dans le lait avant sa fermentation. Le challenge technologique est plus important (stabilité des produits, goût…) et finalement il y a peu de produits sur le marché. Comme pour les viandes, il n'y a pas d'intérêt particulier sur le plan nutritionnel. L'intérêt repose sur l'image du produit (moins de production animale). À moins de présenter un avantage hédonique incontestable pour le consommateur, ces produits ont peu de chance de s'imposer car ils ne répondent pas aux attentes des populations végétariennes ou végétaliennes et le consommateur potentiel (préoccuper par l'impact environnemental de l'élevage) préférera manger moins souvent le produit de référence plutôt que d'avoir recours à ce type de produits.

6.3.2.2. Substitut totaux

Viande de synthèse

Au début des années 2000, deux projets ont été menés pour produire des tissus à des fins alimentaires : l'un par un groupe universitaire financé par la Nasa (Benjaminson *et al.*, 2002), et un autre par une équipe de bio-artistes dans le projet culture et art tissulaires (Catts et Zurr, 2008)

Les productions animales, à l'échelle mondiale, sont l'objet de préoccupations environnementales, éthiques et humaines en raison de l'ampleur de ses impacts sur la santé (Scollan *et al.*, 2011). Ces préoccupations, associées aux prévisions selon lesquelles la demande de protéines va augmenter dans le futur (Gerber *et al.*, 2013), ont conduit vers des méthodes de production d'analogue de protéines « plus durables, plus nutritives et soucieuses du bien-être animal ». Dès 2008, Hopkins et Dacey (2008) soulignaient l'intérêt naissant de la biotechnologie de la culture tissulaire à de la production de viande cultivée *in vitro*. Jusque-là cette biotechnologie avait des applications médicales. Ce qui sous-tendait cet intérêt était la promesse de cultiver *in vitro* de la viande sans tuer les animaux. Désormais cette approche vise à séduire un consommateur désireux de manger de la viande en ayant le souci d'assurer la sécurité alimentaire mondiale, un régime alimentaire adéquat et réduire le fardeau environnemental des productions animales. Des travaux hollandais ont débuté sur culture de cellules souches adultes et embryonnaires provenant de porc. Un soutien financier du cofondateur de Google, Sergey Brin, médiatisé, a conduit à la production du premier Burger de bœuf de culture, cuit et mangé lors d'une conférence de presse à Londres en 2013 (http://culturedbeef.net/event/, Post, 2014 ; (O'Riordan *et al.*, 2017)).

La technologie consiste à développer des cellules souches puis à les différencier en cellules musculaires. Ceci est généralement fait en utilisant un milieu de culture cellulaire et des stimulations chimique, biologique etmécanique (Orzechowski, 2015). Dans la technologie actuelle, le développement de la production de viande artificielle à partir de cellules souches implique un certain nombre de principes majeurs, chacun présentant des limitations techniques. Le premier concerne la co-culture de cellules musculaires, adipeuses et de la matrice extracellulaire dont la complexité reste un défi à surmonter. Le deuxième concerne la formulation de milieux de culture pour assurer un taux de croissance élevé des cellules. De nombreux nutriments (glucides, acides aminés, lipides, vitamines…), des facteurs de croissance (TGFβ, FGF, IGF) et des hormones (insuline, hormones thyroïdiennes et/ou hormone de croissance) sont requis pour cultiver les cellules et leur permettre de proliférer et de se différencier. Actuellement, les cellules souches sont classiquement cultivées dans un milieu contenant des nutriments et du sérum de veau fœtal bovin ou nouveau-né. Le troisième principe concerne l'utilisation d'un support de culture pour permettre l'alignement cellulaire. Enfin, il est de plus attendu que la viande de culture ressemble de la vraie viande. Une récente étude (Fraeye *et al.*, 2020) a établi un parallèle entre les mécanismes mécaniques et biochimiques déterminants les propriétés sensorielles d'une viande de culture vs « traditionnelle ». Pour la texture, seul un modèle de produits carnés type viande hachée (burger) ou émulsion se rapproche d'une viande « traditionnelle ». Cependant les propriétés technofonctionnelles réduites des protéines myofibrillaires (isoformes de myosines différentes) de viande culture nécessite l'ajout d'ingrédient pour corriger cette faiblesse. En termes de couleur, la viande bovine est rouge en raison de sa richesse myoglobine et fer héminique. À ce jour, la technologie de viande cultivée nécessiterait l'addition externe de myoglobine ou autres colorants à un stade ultérieur de la production. L'intérêt nutritionnel de la viande cultivée interroge car

l'intérêt de la viande rouge réside dans l'apport en fer biodisponible. La FDA (en anglais, *Food and Drug Administration* ; Agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux) a récemment rendu un avis positif quant à l'incorporation de léghémoglobine de soja, produit par une levure génétiquement modifiée, dans un burger à base de plantes. De même concernant la vitamine B12, qui devrait être ajoutée. La production de viande de culture ressemblant à de la viande fraîche et non transformée est encore un défi en matière de texture, couleur, saveur ainsi que la composition nutritionnelle.

Si la production à petite échelle pourrait être réalisable, la production à grande échelle semble irréalisable notamment en raison du coût des milieux de culture. Des questions qui relèvent de l'éthique et de l'acceptabilité se posent - voir section 6.3.4.2. (Bryant et Barnett, 2018; Laestadius, 2015). À ce jour, son acceptation sociale est potentiellement limitée en raison d'un profond désir de naturalité pour une partie des consommateurs (Hocquette, 2016). Même si les consommateurs sont sensibilisés à l'impact environnemental de la production de viande, leur comportement vis-à-vis de la consommation de viande en termes de réduction ou de substitution de viande (par exemple, en mangeant des insectes ou des substituts de viande) fait l'objet de peu d'études (Hartmann et Siegrist, 2017).

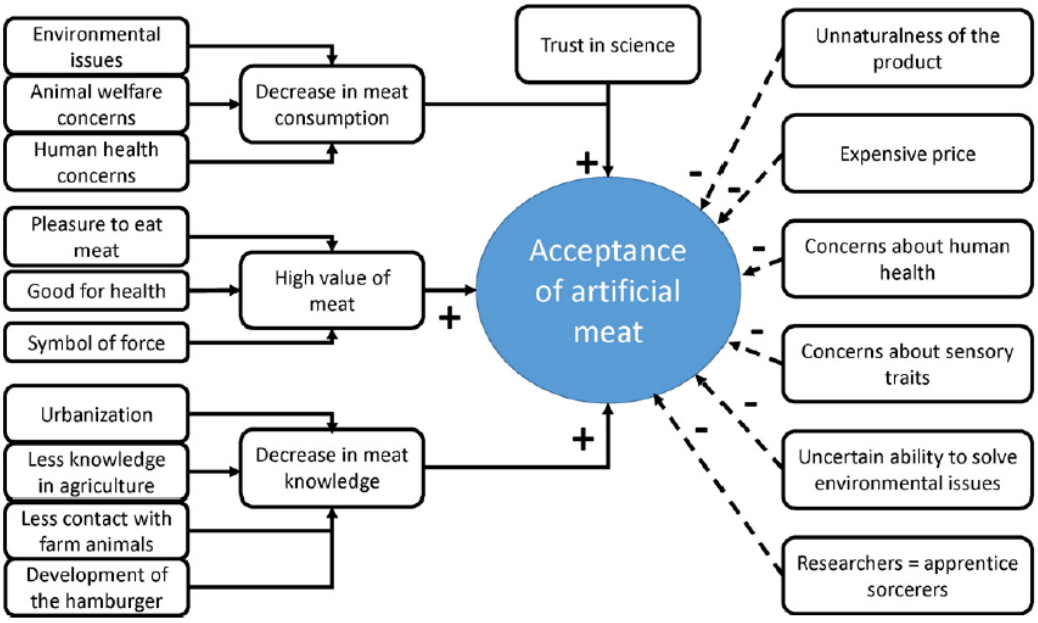


Figure 6.6 : Limites d'acceptation sociale de la viande de synthèse (Hocquette, 2016)

6.3.3. Reformulation dirigées vers des populations cibles

Comme indiqué dans la partie 6.2.3.2, la personnalisation de l'alimentation est une voie d'avenir pour l'impression 3D alimentaire, avec notamment pour population cible, celle des personnes âgées souffrant de sarcopénie ou de dysphagie.

Cette dimension de la personnalisation a fait l'objet de quelques études à travers le monde, et notamment du projet Européen PERFORMANCE « Development of Personalised Food Using Rapid Manufacturing for the Nutrition of Elderly Consumers »[14], qui avait pour but d'imprimer en 3D des aliments attractifs destinés aux seniors dépendants. Ce projet avait pour ambition de développer un système permettant d'imprimer un plat adapté très précisément aux besoins de chaque patient en termes de taille des portions, de texture qui soit compatible avec l'état de la personne, et contenant d'éventuels compléments et vitamines alimentaires en fonction de l'état de la personne. Pour ce faire, plusieurs défis techniques liés à l'impression 3D de ces plats à compositions et consistances variables ont dû être relevés, comme la mise au point des fluides et des gélifiants à injecter dans l'imprimante afin que le plat soit à la consistance voulue après son impression, et la manière dont les ingrédients sont mélangés pour chaque patient préalablement à l'injection dans l'imprimante. Néanmoins, le porteur du projet

[14] https://atelier.bnpparibas/health/article/l-etrange-projet-europeen-nourrir-agees-impression-3d

PERFORMANCE a reconnu, lors de la conférence de clôture, qu'il faudra encore quelques années avant que ce service ne soit commercialement déployé en Europe.

Concernant l'alimentation personnalisée, il convient également de citer les travaux de Kousani *et al.* (2017) qui se sont attachés à trouver des solutions pour les personnes atteintes de dysphagie, en développant une imprimante permettant de fabriquer des aliments à base de purées (thon, citrouille, betterave) qui soient visuellement appétissants. Ces auteurs ont souligné qu'il existe très peu de travaux traitant des aspects liés à l'amélioration de la vie des personnes ayant des besoins spécifiques en matière de repas. Toujours d'après ces auteurs, dans le cas de personnes souffrant de dysphagie, l'impression 3D pourrait servir à automatiser la production d'aliments en purée et en liquides épaissis, tout en rendant ces produits visuellement attrayants et en améliorant la consistance et la répétabilité de ces aliments produits, en termes de texture et de teneur en eau, ce qui contribuerait à améliorer les expériences sensorielles gustatives de cette population cible.

Dans leur revue, Portanguen *et al.* (2019) ont indiqué vouloir élaborer, par impression 3D, des produits carnés qui présentent une texture maîtrisée, soient parfaitement adaptés aux personnes âgées souffrant de déficiences masticatoires, et permettent de valoriser certaines protéines animales peu valorisées, comme celles contenus dans les abats ou comme le collagène. Cette protéine issue de la peau ou des tendons des bovins et des porcins, a de multiples usages en industrie alimentaire (gélatine) ; elle est également utilisée dans le domaine médical pour la fabrication d'architectures appelées 'scaffolds' (Inzana *et al.*, 2014). La mise en œuvre du potentiel de structuration du collagène par FA pourrait permettre de mettre au point des aliments à base de viande ou d'abats, dont la texture serait adaptée aux populations seniors. Les travaux de Shanjani *et al.* (2017), dédiés à des applications orthopédiques, pourraient inspirer de nouvelles voies de recherche dans le domaine alimentaire. En effet, la fabrication de 'scaffolds' à base de collagène, où le motif et la porosité seraient définis, pourrait servir de base à la conception d'aliments carnés à structure et texture maîtrisées.

6.3.4. Acceptabilité de reformulation : Vers une évolution du périmètre des arbitrages ?

Nous avons étudié, dans le chapitre 5, des arbitrages entre produits de même nature qui différaient sur une ou plusieurs caractéristiques (garantie sur le mode de production, présence/absence d'un additif). Cependant, les controverses actuelles sur la consommation des produits animaux, touchant essentiellement les produits carnés (Legendre *et al.*, 2017), sont à l'origine de travaux récents étudiant l'acceptabilité par le consommateur de solutions alternatives [protéines végétales, substituts de viande (tofu, seitan, fungus) et alternatives nouvelles (insectes, viande *in vitro*, spiruline) (World Economic Forum, 2019).

Nous en dégageons les principaux résultats, en nous appuyant préférentiellement sur les revues de la littérature.

6.3.4.1. Perception de l'impact environnemental de l'alimentation

Dans leur revue de la littérature intégrant 38 articles publiés jusqu'à fin 2015, Hartmann *et al.* (2017) tentent de répondre à 3 questions : i) les consommateurs sont-ils conscients que la consommation de viande a un impact élevé sur l'environnement ? ii) sont-ils prêts à réduire leur consommation de viande ou à la remplacer par un substitut ? iii) sont-ils prêts à accepter des substituts végétaux et des alternatives telles que les insectes ou la viande *in vitro* ?

Concernant la *conscience de l'impact environnemental*, les auteurs constatent que les 10 études l'évaluant rapportent un niveau faible en Europe de l'Ouest (inférieur à 50% des personnes interrogées) avec une sensibilité plus forte des femmes. Cependant, ce niveau de conscience semble croissant selon Siegrist *et al.* (2015), et lorsque de l'information sur l'impact environnemental de la production des produits carnés est fournie, il se double d'une faible *volonté à réduire la consommation de viande* et, là encore, plus élevée chez les femmes. Cela se traduit par une baisse des quantités consommées et une « désanimalisation » des produits d'originale animale mangés (Lepiller *et al.*, 2016). Les quelques études ayant analysé l'impact des autres facteurs sociodémographiques (niveau d'éducation, âge) ne permettent pas de mettre en évidence une influence significative. En revanche, l'attitude vis-à-vis de la consommation de viande a un effet sur la propension à la réduire : une fréquence de consommation élevée et une attitude positive envers ces produits sont associées à une plus faible volonté de réduire leur consommation. Dans leurs études menées au Portugal, Graça *et al.* mettent en évidence, par des méthodes qualitatives que l'attachement à ces produits freine la propension à modifier la diète (Graça *et al.*, 2015a ; 2015b) Ils construisent une typologie de consommateurs dont un des profils correspond aux individus marquant un profond attachement à la viande. Pour ces derniers, au-delà de la contribution aux besoins nutritionnels, elle joue un rôle central dans leur alimentation (statut social) et justifie le recours à des stratégies visant à réduire l'inconfort moral suscité par la remise en cause de sa consommation : les individus utilisent des arguments pro-viande (« la viande est nécessaire », « manger de la viande procure du plaisir »), s'auto-exonèrent de l'impact de leur comportement sur la collectivité (« ce n'est pas ma faute » ;

« il n'y a pas d'alternative ») et ne se déclarent pas prêts à diminuer la consommation de ces produits. Cette tendance peut s'expliquer par l'importance du plaisir gustatif et de la convivialité dans les pays culturellement grands consommateurs de viande (Poulain *et al.*, 2007). La question de l'acceptabilité des *sources alternatives* de protéines recouvre des situations assez contrastées : il s'agit en effet à la fois de protéines végétales (brutes ou transformées), faisant déjà partie du répertoire alimentaire des consommateurs européens, et d'alternatives plus radicales telles que les insectes ou la viande de culture qui suscitent davantage de méfiance.

6.3.4.2. Les symboliques et les freins associés à la viande in vitro

En créant des innovations technologiques, et notamment celle de produire de la viande sans la nécessité d'élever et de tuer des animaux, mais toujours à partir d'une cellule souche animale, la science modifie le rapport au vivant et à ce qui est mangé. Si la « désanimalisation » (Fourat et Lepiller, 2017; Lepiller *et al.*, 2016) qui s'observe même dans les étapes de la consommation et de la distribution ont vu la disparition de l'origine animale des viandes (par l'éloignement des zones d'abattage et de transformation de la viande, par le camouflage des emballages), la production était moins affectée par ce phénomène bien que des modifications génétiques étaient déjà réalisées. Cette rupture proposée de la disparition de l'animal dans la production, perçue comme radicale, s'imposerait alors comme une étape historique logique selon Buscemi (2014). L'engouement suscité pour la viande *in vitro* serait dû aux promesses d'émancipation qu'elle porte vis-à-vis de la mise à mort, mais également d'adéquation à la fois nutritionnelle par le dosage des graisses et environnementale par une empreinte écologique diminuée (Fournier et Lepiller, 2019). Cependant, en dépit de ses promesses, cette innovation est loin d'être acceptée par les consommateurs.

En effet, Bryant *et al.* (2018) ont proposé une revue de la littérature sur l'acceptabilité de la viande de culture (ou viande *in vitro*). Analysant 14 études empiriques publiées entre 2014 et 2018, ils montrent que celle-ci est fortement influencée par le niveau d'information des répondants et particulièrement par la façon dont ce produit est présenté au cours du protocole expérimental, ce qui rend la confrontation des résultats quantitatifs des études, assez vaine (Siegrist *et al.*, 2018). Les *bénéfices* principaux attendus de cette consommation sont liés à la préservation du bien-être animal (par la diminution voire l'arrêt de l'abattage des animaux) et de l'environnement (réduction de l'émission des gaz à effet de serre). Les *objections* envers ce substitut relevées dans la littérature sont classées par Bryant *et al.* (2018) en facteurs individuels et sociétaux. Parmi les premiers, le caractère artificiel et technologique du produit est très fréquemment mis en avant (Siegrist et Sutterlin, 2017 ; Tucker, 2014 ; Verbeke *et al.*, 2015a; Welin et Van der Weele, 2012) et semble universelle (Bekker *et al.*, 2017b; Laestadius, 2015). Cette représentation découle de la pensée symbolique selon laquelle ce qui provient de la nature est bon pour la santé et ce qui n'est pas naturel est mauvais pour la santé ou risqué. Elle amène certains répondants à s'interroger sur la sécurité sanitaire de ces produits ainsi que sur leur valeur nutritionnelle. Les autres objections portent sur les caractéristiques organoleptiques des produits (goût, texture, aspect), anticipées comme inférieures à la viande, et sur le prix, pour lequel la situation est plus contrastée (certaines études montrent que les répondants anticipent un prix plus faible que celui de la viande, d'autres plus élevé). Le second groupe d'objections renvoie à des préoccupations collectives telles que le devenir de l'élevage, la confiance qui peut être accordée aux entreprises qui fabriqueront ces produits et au bilan énergétique de cette production ainsi que la disparition de rituels sociaux (tels les barbecues dominicaux) (Bekker *et al.*, 2017a; Verbeke *et al.*, 2015b). La disparition de ces pratiques engendrerait progressivement la détérioration du rapport des humains avec la nature et les animaux et l'érosion de la campagne (Verbeke *et al.*, 2015a; Welin et Van der Weele, 2012), même si certains chercheurs soutiennent le contraire (Chauvet, 2018; Welin et Van der Weele, 2012). Enfin, Bryant *et al.* (2018) relèvent les *doutes* formulés par les répondants ou les auteurs des études empiriques parmi lesquels la faisabilité d'une production à grande échelle, les questions éthiques qu'elle pose et les modalités de sa réglementation et de son contrôle par les pouvoirs publics, éléments essentiels à l'acceptation sereine de ces produits innovants par les consommateurs.

6.3.4.3. Manger des insectes ?

L'entomophagie correspond aux pratiques de consommation des insectes. Les insectes comestibles, variant selon les estimations entre 1 000 et 2 000 espèces recensées (Van Huis *et al.*, 2013) sont mangés dans de nombreuses cultures et aires géographiques depuis toujours et sont perçus comme apportant de la force, de la vigueur et de la spiritualité (Ramos-Elorduy, 2009).

Les études menées en Europe, aux Etats-Unis ou en Océanie, montrent un faible degré d'acceptabilité lié au caractère d'innovation radicale (néophobie), au dégoût, à l'absence d'ancrage culturel de cette famille d'aliments, induisant une méconnaissance de leurs propriétés et au sentiment qu'il n'est pas nécessaire d'y recourir (Clarkson *et al.*, 2018). Les arguments en faveur de leurs qualités organoleptiques, quant à eux, restent encore à ce jour inexistants ou réservés aux

initiés et ce malgré des innovations gastronomiques (Dupuy, 2017). L'acceptabilité croît avec l'expérience de consommation et avec l'apport d'information sur les propriétés et elle est plus élevée pour les produits transformés intégrant des protéines d'insectes que pour des formes plus brutes (insectes entiers par exemple) (Cicatiello *et al.*, 2016; Tan *et al.*, 2016) ont testé la réceptivité de consommateurs italiens. L'enquête montre que 31% des personnes sont enclines à tenter cette expérience et que 5% en ont déjà mangé. Les facteurs favorisant une attitude positive envers leur consommation sont la familiarité avec des cuisines étrangères, un haut niveau d'éducation et le fait d'être un homme ; tandis que la peur des insectes et celle de leur mauvais goût freinent les personnes n'en ayant jamais mangé. Des enquêtes auprès de populations européennes (Detilleux, 2016; Hartmann *et al.*, 2015) révèlent que les consommateurs se disent prêts à manger des insectes à condition qu'ils soient enrobés d'une pâte à frire pour améliorer le goût, la texture, l'odeur ou l'aspect, transformés ou intégrés à des aliments ou plats connus d'eux.

Comme souligné par Hartmann *et al.* (2017), il est cependant difficile de conclure définitivement sur le potentiel de ce type d'aliments en tant que substitut à la viande : leur commercialisation n'est pas autorisée pour l'alimentation humaine dans plusieurs pays européens (dont la France), bien qu'une partie des personnes interrogées se déclare d'ores et déjà prête à en consommer (Verbeke, 2015). Il est donc tout à fait possible que leur incorporation en tant que source de protéines dans des produits transformés conduise à leur adoption progressive, y compris dans des pays n'ayant pas une culture de consommation d'insectes. La condition indispensable à son développement réside dans leur capacité à être intégrés au répertoire alimentaire par des transformations culinaires majeures. Par ailleurs, les risques liés à la consommation des insectes (toxicité de certaines espèces, risques liés aux intrants chimiques dans l'alimentation donnée aux insectes et dans le système de production) peuvent constituer à un frein à leur adoption (Anses, 2015).

6.3.4.4. Attachement aux aliments d'origine animale et regain d'intérêt pour les aliments végétaux ?

En 2017, a été créé Protéines France qui est le consortium français d'entreprises ayant pour ambition de fédérer et de catalyser le développement des protéines végétales et nouvelles ressources, pour faire de de la France un leader mondial du domaine. L'objectif de ce consortium est de valoriser, mieux et davantage, les protéines pour une large gamme d'applications allant des ingrédients dédiés à la nutrition et santé humaine et animales jusqu'à des applications biosourcées dans des secteurs aussi variés que la chimie ou encore les matériaux. Dans ce contexte se pose la question du regain d'intérêt et des recherches pour les protéines végétales, qui ont constitué une base de l'alimentation de l'humanité jusqu'à un passé récent. Déclinées selon la traditionnelle association légumineuses et céréales se retrouvent quasiment partout dans le monde où ces aliments poussent. Cette association apporte l'essentiel des acides aminés[15], mais une éducation reste nécessaire tant au niveau des pouvoirs publics que des consommateurs. Les transformations culinaires des graines de céréales ou de légumineuses sont variées, souvent importées de traditions asiatiques : les laits végétaux (soja, riz, orge...), fromages, glaces (au haricot japonais, au lait de riz), tofus (à base de soja), seitan (à base de blé)... On trouve aussi dans cette catégorie les légumineuses (lentilles…), les fruits comme le fruit de jacquier qui, cuisiné, peut ressembler à des fibres de viande, des substituts comme le tofu ou le seitan fabriqués à base de produits végétaux (soja pour le tofu et blé pour le seitan) ou encore des mycoprotéines issues d'un champignon (fungi) ou des algues comme la spiruline. Cette dernière se décline davantage comme un condiment (pesto à la spiruline...) ou prise en complément alimentaire (gélule ou poudre ajoutée au jus de fruit).

Néanmoins, selon des études récentes, les mangeurs américains conservent un attachement fort à la culture de la viande (Hartmann et Siegrist, 2017) et ne sont pas prêts à remplacer un burger de bœuf par un burger aux protéines végétales (seulement 21%), encore moins de viande de culture (11%) (Slade, 2018). Pourtant, les mouvements vegan ont une place de plus en plus visible dans le débat public, malgré les critiques formulées à leur égard (Cole et Morgan, 2011), ce qui a permis de modifier les consciences et de favoriser un regain d'intérêt récent pour les protéines végétales. Selon une autre enquête

---

15 La supériorité nutritionnelle des protéines animales n'est pas remise en cause – en quantités mesurée - cependant l'apport en protéines peut être faible pourvu qu'il assure l'apport en acides aminés essentiels. Et tous les acides aminés sont présents dans les aliments contenant des protéines, d'origine animale ou végétale, mais ne le sont pas dans des proportions optimales ; elles le sont dans le lait et les œufs dont la « valeur biologique » est maximale. Lorsqu'une source protéique n'apporte pas tous les acides aminés essentiels elle peut néanmoins être améliorée en associant une autre source protéique ; cette « complémentation protéique » fonctionne sur la base de « paires alimentaires » composées par exemple de lysine et méthionine. La lysine est présente dans le lait, viandes, légumineuses et manquante dans les céréales, tandis que la méthionine est présente dans les céréales et manquante dans les légumineuses et protéines animales. Ainsi, les protéines de céréales, associées aux protéines de lait ou de légumineuses, ont une valeur biologique améliorée.

danoise auprès de 462 individus (Reipurth *et al.*, 2019), l'intention de changer son régime alimentaire se porte essentiellement sur l'augmentation de la consommation de poisson (pour 61% des interviewés) et d'aliments d'origine végétale (52,6%) ; et dans une moindre mesure la diminution de celle de viande (33,5%) et de produits laitiers (15,4%). L'enquête montre que les variables les plus significatives sur la fréquence de consommation de produits animaux ou végétaux sont la perception de teneur en protéines et de satiété. Du coup, même si l'intention de manger davantage d'aliments d'origine végétale peut sembler élevée (50%), elle se heurte à la préférence gustative pour la viande, à la difficulté perçue à préparer des régimes à base de plantes et à la perception que les viandes sont meilleures nutritionnellement.

Pour la France, selon le baromètre du Groupe d'étude et de promotion des protéines végétales (GEPV) (Jauneau *et al.*, 2016), les protéines végétales ont récemment augmenté dans les déclarations d'achat des français (34% des individus les citent contre 31% en 2016), alors que la consommation (en g/j) des légumineuses a baissé entre 2009 et 2014 (INCA 2 et 3) passant de 9,7 à 7,7 tout comme celle de la viande de 49,7 à 47,3. Les lentilles, le soja, les haricots secs et les fèves sont considérés comme des aliments riches en protéines, même si les trois premières sources de protéines restent la viande, les œufs et le poisson.

La majorité des personnes interrogées pense que les protéines végétales sont bonnes pour la santé (88%), complémentaires des protéines animales (77%), bonnes pour l'environnement (76%), naturelles (68%) et synonymes de qualité (65%). Elles bénéficient selon la même enquête d'une meilleure image que les protéines animales d'un point de vue nutritionnel. Les produits enrichis en protéines sont largement consommés (20% des individus) pour renforcement des capacités physiques et sportives. Les protéines animales restent néanmoins préférées par goût, car sur le critère gustatif les protéines végétales n'obtiennent pas un bon score. L'enquête montre que les protéines végétales doivent avoir la capacité à remplacer la viande/le poisson pour 44% des personnes interrogées, ce qui révèle leur attachement à une culture alimentaire dominante.

6.3.4.5. Interprétations et perspectives critiques

Les développements qui précèdent montrent qu'il est trop tôt pour se faire une opinion définitive sur l'adoption des sources de protéines considérées comme alternatives à la consommation de viande. Outre le fait que leur devenir sera conditionné par les caractéristiques de l'offre (quels produits ? quels prix ? quelle diffusion ?), les modalités de l'information des potentiels acheteurs ainsi que l'évolution de leur rapport (attachement) à la viande joueront un rôle majeur dans leurs arbitrages. En l'absence de commercialisation d'une partie de ces produits, les protocoles expérimentaux confrontant différentes sources de protéines (végétaux, insectes, viande de culture) s'appuient - au mieux - sur des descriptions des attributs qui ignorent des composantes essentielles pour les acheteurs (attributs d'expérience tels que le goût, la texture et l'apparence). Ces travaux précurseurs ont cependant l'intérêt de montrer que l'attachement au produit viande est un facteur majeur de résistance au changement. À titre d'exemple, Slade (2018) propose à des consommateurs canadiens, interrogés en ligne, un protocole de *choice experiment* confrontant trois types de *burgers* (viande bovine, protéines végétales, viande de culture). Il montre, qu'à prix égal et en partant du postulat que le goût ne diffère pas entre les trois solutions, seuls 21% des répondants choisissent le *burger* végétal et 11% la viande de culture. De même, Circus *et al.* (2019) exposent un échantillon de 139 citoyens anglais, interrogés en ligne, à trois sources de protéines alternatives (végétales, viande de culture, insectes). L'alternative végétale est privilégiée devant la viande de culture et les insectes ; par ailleurs, la source préférée par les répondants semble influencée par l'attachement à la viande (sauf pour les insectes). Enfin, Castellari *et al.* (2018) confirment l'importance de ce facteur comme frein à l'évolution des habitudes de consommation, grâce à un protocole d'économie expérimentale incluant 127 consommateurs italiens. Confrontés aux photographies de deux produits présents sur le marché (une viande hachée de bœuf et un burger de soja), les participants ont dû, dans un premier temps, indiquer leur consentement à payer (CAP) pour chacun des produits, puis simuler 6 décisions d'achat successives en indiquant le nombre d'unités respectives des deux produits - supposés vendus au même prix - qu'ils achèteraient (n=5 au total). Entre chaque décision d'achat, des informations sur l'impact de la production de viande bovine et de soja sur la santé et l'environnement ont été révélées aux participants. Les résultats montrent un impact très limité de l'information sur le CAP des participants tant pour la viande bovine que pour le burger de soja, impact que les auteurs attribuent à la place centrale de la viande dans la diète des pays occidentaux. A l'inverse, l'information déplace une partie des quantités achetées en défaveur de la viande bovine. Les messages environnementaux ont un effet plus marqué sur les choix que ceux portant sur la valence santé.

Face aux enjeux de nos sociétés, des aliments disruptifs[16] (Parise, 2018) comme les insectes ou la viande *in vitro*, malgré leur intérêt d'un point de vue environnemental ou nutritionnel, se heurtent à des considérations sanitaires, religieuses, ou socio-culturelles, qui engendrent des résistances de la part des consommateurs même dans un contexte où la consommation de viande est de plus en plus questionnée (Fourat et Lepiller, 2017). À l'inverse, les aliments d'origine végétale, qui sont les plus adaptées à ces défis alimentaires, et qui d'ailleurs font leur preuve sur des temps longs en constituant la base alimentaire des sociétés humaines, sont concurrencés aujourd'hui par la centralité de plats carnés dans certains modèles alimentaires.

Les différences d'attitudes à l'égard des aliments fournissant des protéines s'expliquent par le fait que, si un aliment est biologiquement comestible, il n'est pas nécessairement mangeable d'un point de vue sociologique ou culturel. Les mécanismes cognitifs qui permettent aux sociétés humaines de choisir les animaux « mangeables » (et non pas « comestibles », qui signifie non nocifs), ont été mis en lumière par les anthropologues comme Edmund Leach (1964) ou Mary Douglas (1967). La comestibilité d'un animal dépend ainsi de la distance résultant des rapports entre humains et animaux : les animaux trop proches (de compagnie) ou trop éloignés (sauvages car potentiellement anthropophages) ne sont pas comestibles. Cette loi est bien évidemment sujette à des variations dans le temps et selon les aires culturelles : chien, cheval, ours, requin… ont été consommés puis délaissés. Les insectes seraient donc trop « éloignés » pour certaines cultures. Leach, qui souhaite comprendre les mécanismes de fabrication de l'inceste et des tabous, en conclut que ceux portant sur les animaux servent à protéger de l'ingestion du semblable. À la même période, Mary Douglas (1967) a montré que les classifications d'animaux mangeables et non mangeables sont en équivalence avec des catégories du pur et de l'impur. Dans la Bible, les insectes sont des animaux « impropres » à la consommation à cause de leurs caractéristiques physiques (ils sautent et volent sur la terre). Les Européens ne sont pas dégoûtés par les huîtres ni les moules, mais par les insectes ou la viande *in vitro*. Les *modèles alimentaires* ont la fonction de gérer l'anxiété alimentaire face à des aliments nouveaux potentiellement toxiques (Poulain, 2012). Ils constituent pour nous une grille de lecture toujours d'actualité pour comprendre les phénomènes d'appropriation ou de dégoût à l'égard de nouveaux aliments d'origine animale. Pour faire oublier leur origine, les insectes sont transformés en barres énergétiques ou autres super aliments, processus de camouflage appelé disjonction par Vialles (1988). À l'inverse, la texture, le goût et l'apparence de la viande *in vitro* doivent correspondre à de la « vraie » viande. L'essor des « viandes végétales » comme les « steaks de soja » ou « saucisses végétales » développés par l'industrie agroalimentaire révèle l'importance des catégories alimentaires reconnues par une culture ; et donc en l'occurrence la viande ou le plat de viande, que des plats végétariens vont imiter.

Deux rapports aux aliments fournissant des protéines semblent se confronter. D'une part, on pourrait nommer une *approche utilitariste* qui met en avant leurs avantages à la fois écologiques, économiques ou sanitaires, ainsi que la rationalité des choix effectués par les mangeurs eu égard aux connaissances disponibles. À l'inverse, une *approche culturaliste* nous aide à saisir les variations dans le temps et dans l'espace des choix en aliments fournissant des protéines. Nous avons montré, dans des travaux précédents, les dimensions culturelles et sociales de la construction de ce choix dans un pays comme l'Inde (Fourat, 2018). Elle permet de saisir enfin les résistances des consommateurs face aux nouvelles sources en protéines animales comme autant de manifestations de l'anxiété alimentaire et de mécanismes de protection vis-à-vis de nouveaux aliments, et ce depuis que les civilisations cherchent des aliments pour se nourrir.

6.3.5. Réglementation européenne par rapport aux innovations dans le domaine de l'alimentation

S'agissant des « denrées alimentaires alternatives » autres que celles traditionnellement consommées en Europe, elles font l'objet de dispositions juridiques spécifiques. Leur mise sur le marché est encadrée par le règlement relatif aux aliments nouveaux (Union européenne, 2015) qui a été réformé en 2015. Les négociations menant à ce texte ont été relativement longues. En janvier 2008, la Commission européenne a proposé une révision de la législation de l'Union européenne sur les nouveaux aliments de 1997[17]. Cette révision prévoyait la clarification de la notion de nouvel aliment, la centralisation de l'évaluation et de l'autorisation des nouveaux aliments et la simplification de la procédure d'autorisation. L'objectif était

[16] C'est-à-dire toute alimentation issue d'une invention (technologique, de procédés, de services, marketing, sociétale) et qui permet la consommation d'une typologie d'aliments ou de produits auparavant tabous, interdits ou inconnus au sein d'une culture alimentaire donnée.

17 Commission européenne, Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil concernant les nouveaux aliments, 14 janvier 2008, COM (2007) 872 final.

d'alléger la charge administrative reposant sur les exploitants du secteur alimentaire. Cependant, la procédure législative a échoué, les négociations n'ayant pas abouti, en particulier sur la question de l'inclusion des aliments issus d'animaux clonés et de descendants d'animaux clonés dans le champ d'application du règlement[18].

Au mois de décembre 2013, la Commission européenne a relancé les négociations en proposant un "paquet" de mesures relatives au clonage animal et aux nouveaux aliments. Apprenant des erreurs du passé, la Commission a séparé les questions du clonage et des nouveaux aliments[19]. Le processus législatif a abouti deux ans plus tard à l'adoption en première lecture au Parlement européen puis par le Conseil du règlement (UE) n°2015/2283 relatif aux nouveaux aliments (appelés aussi *novel food* en référence à la version anglaise du règlement) (Union européenne, 2015).

Celui-ci impose de solliciter une autorisation de mise sur le marché pour les denrées alimentaires dont la consommation humaine était négligeable au sein de l'Union européenne avant le 15 mai 1997. Le texte précise les dix catégories de denrées concernées par cette procédure. L'une d'elles concerne particulièrement les produits d'origine animale :

« *les denrées alimentaires qui se composent d'animaux ou de leurs parties, ou qui sont isolées ou produites à partir d'animaux ou de leurs parties, à l'exception des animaux obtenus par des pratiques de reproduction traditionnelles qui ont été utilisées pour la production de denrées alimentaires dans l'Union avant le 15 mai 1997, et pour autant que les denrées alimentaires provenant de ces animaux aient un historique d'utilisation sûre en tant que denrées alimentaires au sein de l'Union* ».

Cette dernière catégorie renvoie notamment aux produits qui peuvent être consommés habituellement sur des territoires extra-européens, comme les insectes[20] ou encore à la viande *in vitro*. Tant qu'il n'existe pas de législation spécifique, les denrées issues d'animaux clonés ou de leur progéniture sont également concernées[21].

Afin d'être autorisé à être mis sur le marché et inscrit sur la liste de l'Union européenne, le nouvel aliment doit remplir trois conditions cumulatives :

> *« a) l'aliment ne présente aucun risque en matière de sécurité pour la santé humaine, compte tenu des données scientifiques disponibles ;*
>
> *b) l'utilisation prévue de l'aliment n'induit pas le consommateur en erreur, surtout lorsque l'aliment est destiné à en remplacer un autre et qu'une modification importante est apportée à la valeur nutritionnelle ;*
>
> *c) lorsque l'aliment est destiné à remplacer un autre aliment, le nouvel aliment ne diffère pas de cet autre aliment d'une manière telle que sa consommation normale serait désavantageuse pour le consommateur sur le plan nutritionnel.* »[22]

En matière d'étiquetage, des conditions spécifiques supplémentaires pour les nouveaux aliments sont exigées par rapport aux règles générales énoncées dans la législation alimentaire européenne, et en particulier dans le règlement (UE)

---

18 Echec définitif le 29 mars 2011 de la procédure COD/2008/0002.

19 Le 18 décembre 2013, la Commission propose deux directives relatives au clonage animal (COM (2013) 892 final) et à la mise sur le marché d'aliments issus d'animaux clonés (COM (2013) 893 final) ainsi qu'un règlement relatif aux nouveaux aliments (Proposition de Règlement du Parlement européen et du Conseil relatif aux nouveaux aliments, COM (2013) 894 final).

20 Considérant n°8, Règlement (UE) 2015/2283. Plusieurs demandes d'autorisations de mise sur le marché ontété déposées pour ce type de produits. La Commission n'a encore adopté aucun acte d'exécution concernant ces demandes. Sur le sujet des insectes, v. not. : À. Lähteenmäki-Uutela et Grmelová Lahteenmaki-Uutela, A.; Grmelova, N., 2016. European law on insects in food and feed. *European Food and Feed Law Review*, 11 (1): 2-8. .

21 Règlement (UE) n° 2015/2283, consid. 14. Del Con et Friant-Perrot Del Cont, V.C.; Friant-Perrot, M., 2011. Quel cadre normatif pour la viande clonée : enjeux sociaux, éthiques et juridiques. *Droit, sciences et techniques : quelles responsabilités*. Lexisnexis, Collection « Colloques et débats », 345-366.

22 Règlement (UE) n° 2015/2283, art. 7.

n°1169/2011 (Union européenne, 2011). Ainsi, dans certains cas, il peut être prévu que « *l'étiquette comporte des informations supplémentaires, notamment en ce qui concerne la description de la denrée alimentaire, son origine, sa composition ou ses conditions d'utilisation prévue, afin que les consommateurs soient suffisamment informés de la nature et de la sécurité du nouvel aliment, notamment en ce qui concerne les groupes vulnérables de la population* »[23].

Les prochaines évolutions de l'encadrement juridique des nouveaux aliments interviendront sans doute dans le domaine du clonage animal. Provisoirement, les denrées issues d'animaux clonés sont soumises au règlement (UE) n°2015/2283 (Union Européenne, 2015)[24] jusqu'à l'aboutissement du processus législatif à ce propos[25]. Le législateur devra aller au-delà de la recherche d'un équilibre entre libre circulation des marchandises et de sécurité sanitaire et prendre en compte les résistances des citoyens et le bien-être animal. En effet, dans ce domaine, ce sont ces autres facteurs légitimes qui sont concernés, car, de l'avis de l'EFSA (European Food Safety Authority, 2012), ces nouveaux aliments ne présentent pas de danger pour le consommateur.

6.4. Innovations au niveau des systèmes de production/transformation

6.4.1. Exemples de développement de nouvelles filières

6.4.1.1. L'exemple d'une initiative privée : la filière Bleu Blanc Cœur

Depuis vingt ans, la filière Bleu Blanc Cœur met sur le marché des produits animaux au profil nutritionnel riche en oméga-3, grâce à un apport important de matières premières riches en acides gras n-3 dans l'alimentation des animaux. Cette initiative privée est reconnue d'intérêt nutritionnel et environnemental par les ministères de l'agriculture et de l'alimentation, de la transition écologique et de la santé parce que les acides gras n-3 (oméga-3) sont déficitaires dans le régime alimentaire moyen des Français. Une trentaine de filières végétales et animales se sont engagées à signer des « cahiers des ressources » reposant sur une double obligation de moyens et de résultats. Les obligations de moyens portent sur la composition des aliments pour animaux (rapport oméga-6/oméga-3 maximal), la variété des matières premières utilisées et sur les apports quantitatifs en acides gras spécifiques (niveau d'apport minimal en ALA apporté par végétaux riches en ALA : herbe, luzerne, graine de lin, de lupin, de chanvre ou de colza extrudée). L'obligation de résultats est réalisée par des organismes certifiés : contrôle des teneurs en ALA et CLA minimum, valeurs maximum des rapports oméga-6/oméga-3, AGS/oméga-3, C16 :0/AGS, C16 : 0/ALA... À titre d'exemple, la comparaison entre un œuf standard et un œuf bleu blanc cœur montre un gain en acides gras n-3 d'une valeur courante de 1,5% à 4% du total d'acides gras (4,5% visé) ; la proportion en DHA passe de 0,7% à 1,2% (1,5 % visé) ; la proportion en ALA évolue de 0.8% à plus de 2,4% ; le rapport oméga-6 /oméga-3 passe de 15 à moins de 5 (≤ 4,5 visé) et le rapport AG saturés / oméga-3 tombe de 23 à moins de 10.

En 20 ans, la filière Bleu Blanc Cœur a gagné en notoriété. Quelque 2 250 produits sont aujourd'hui étiquetés du logo de la marque. Elle représente entre 5% et 10% des œufs et des produits issus de volaille et porc produits en France (Chesneau et Kerhoas, 2018), et entre 1 à 4% des filières ruminants. La démarche se distingue des autres signes et démarches de qualité par deux aspects : sa gouvernance pluri-acteurs d'une part et son souci d'une accessibilité au plus grand nombre. Bleu Blanc Coeur est géré par une organisation représentant des consommateurs, des professionnels de la santé, des producteurs, des acteurs de la transformation, de la restauration et des métiers de bouche, ainsi que des scientifiques. La répartition de la valeur entre les maillons de la chaîne d'élaboration et de distribution des produits fait partie des buts affichés. D'autre part

23 Règlement (UE) n° 2015/2283, consid. 33.

24 Règlement (UE) n° 2015/2283, consid. 14 : « jusqu'à l'entrée en vigueur d'une législation spécifique relative aux denrées alimentaires obtenues à partir d'animaux clonés, il convient que ces denrées relèvent du présent règlement en tant que denrées alimentaires dérivées d'animaux obtenus par des pratiques de reproduction non traditionnelles et qu'elles soient étiquetées de manière appropriée à l'intention du consommateur final ».

25 Commission européenne, Proposition de directive relative à la mise sur le marché des denrées alimentaires obtenues à partir d'animaux clonés, COM (2013) 893 final. À ce propos, Del Con et Friant-Perrot Del Cont, V.C.; Friant-Perrot, M., 2011. Quel cadre normatif pour la viande clonée : enjeux sociaux, éthiques et juridiques. *Droit, sciences et techniques : quelles responsabilités*. Lexisnexis, Collection « Colloques et débats », 345-366.

Bleu Blanc Cœur tient sa crédibilité de son ancrage scientifique et de l'obligation de résultats (contrôles sur le produit). Ses promoteurs se sont appuyés sur les connaissances scientifiques et sur les résultats d'études cliniques[26]. Plus récemment, avec des chercheurs de l'Inra et de l'Ademe, ils ont réalisé des analyses de cycle de vie (ACV) des produits Bleu-Blance-Cœur en porcs, volailles et œufs. Les résultats montrent que les impacts CO_2 et de l'eutrophisation sont moindres que pour des filières standard, en lien avec de moindres émissions de méthane entérique. La filière Blanc Bleu Coeur peut ainsi se prévaloir d'un moindre impact environnemental.

Si l'extension de cette initiative est à l'œuvre, on peut s'interroger sur l'intérêt d'un essaimage d'une telle démarche privée-publique sur d'autres dimensions de la qualité des produits animaux.

6.4.1.2. Expansion et communication de la (Spécialité Traditionnelle Garantie (STG) lait de foin

La STG, par sa définition règlementaire, est amenée à promouvoir un « *mode de production, une transformation ou une composition correspondant à une pratique traditionnelle* » mais sans lien au terroir (Union européenne, 2012). Pourtant le lait de foin était initialement très régionalisé, car historiquement implanté en région germanique (Autriche, Allemagne). À partir de la reconnaissance européenne de ce savoir-faire lié à la production de lait par des animaux nourris à l'herbe ou au foin, le produit sous label a ainsi pu s'étendre à d'autres territoires, notamment en France et en Belgique (Wallonie) où les associations Lait de foin (Heumilch France) et Prolafow en assurent la promotion et le développement économique en s'appuyant sur les différentes propriétés du produit[27].

Historiquement, une demande d'enregistrement pour « *Heumilch* » (ou « *lait de foin* » en français), en tant que STG a été déposée en 2014, auprès de l'Union européenne à l'initiative de l'Autriche, où le lait de foin représente 15% du volume du lait autrichien[28]. Le cahier des charges a été publié au Journal officiel de l'Union européenne en 2016, permettant ainsi l'enregistrement et la reconnaissance de la dénomination Heumilch/Lait de foin STG. Par la suite, le lait de foin STG a finalement été officialisé en France en 2018, année au cours de laquelle l'INAO a validé les plans de contrôle, permettant alors le lancement des premières certifications en France. Il s'agit du premier produit laitier STG en France[29]. En 2019, le champ du lait de foin STG a été étendu au lait de chèvre et de brebis, en plus de celui de vache[30].

Le cahier des charges du lait de foin STG, élaboré sur la base du *Heumilchregulativ* en vigueur en Autriche, requiert une alimentation composée « essentiellement d'herbes fraîches et de légumineuses en période de fourrage vert et de foin durant la période de fourrage d'hiver », ainsi la part de fourrage grossier dans la ration annuelle doit être de 75% au minimum (en matière sèche). Une liste positive d'aliments autorisés accompagne ces spécifications. Le point particulièrement différenciant de cette STG concerne l'interdiction de tout aliment fermenté et par conséquent de l'ensilage d'herbe et de maïs. Des prescriptions relatives aux auxiliaires chimiques et à la fertilisation sont également données. L'usage de phytosanitaires doit faire l'objet de ciblage et sélection. Des éléments de procédure d'épandage interdisent les boues d'épuration et les composts issus de traitement des eaux. Le délai d'utilisation des fourrages après épandage d'effluents d'élevage est fixé à trois semaines. Pour information, en 2018, seules les boues urbaines et industrielles, disposaient de délais de réentrée

26 https://www.bleu-blanc-coeur.org/c/79/La-demarche-scientifique

27 Lait de foin FR et BE. (2019, 07 19). Lait de foin. Récupéré sur https://www.laitdefoin.fr/lait-de-foin/cahier-des-charges/ https://www.laitdefoinwallonie.com/stglaitdefoin

28 Lait de foin (2019,08 05) https://www.laitdefoin.fr/lait-de-foin/la-stg/

29 Julien, C. (2019, 05 21). Les premières fermes certifiées Lait de foin. Récupéré sur Réussir: https://www.reussir.fr/ lait/les-premières-fermes-certifiées-lait-de-foin

30 Xicluna, P. (2019, 04 16). Qu'est-ce que la STG "Lait de Foin"? Récupéré sur Ministère de l'Agriculture: https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-la-stg-lait-de-foin

règlementaires (Ademe, 2018)[31]. Enfin, des délais pour la livraison de lait sont prescrits après la mise-bas (10 jours) et après l'arrêt de l'alimentation à l'ensilage, le cas échéant (14 jours) (Commission européenne, 2016).

Les spécifications détaillées dans le cahier des charges jouent directement sur les différentes propriétés du lait : p. ex., l'alimentation à base de foin ou d'herbe fraîche augmente la concentration en AGPI dans le lait (Paredes *et al.*, 2018). Ses propriétés nutritionnelles en sont ainsi améliorées. Cette spécification impacte également de la qualité d'image au lait. De même l'interdiction de l'ensilage et des boues a un impact sur les propriétés sanitaires du produit final en limitant les risques de contamination. Enfin les pratiques d'élevage basant l'alimentation sur l'herbe pâturée et le foin et interdisant les aliments fermentés impactent positivement les propriétés organoleptiques (couleur, flaveur) (Sibra *et al.*, 2018).

Le cahier des charges européen du lait de foin STG détaille et s'appuie sur les propriétés sanitaires, organoleptiques et nutritionnelles du produit comme décrit ci-après :

- sanitaires et organoleptiques : à partir d'études réalisées par Ginzinger en 2016 pour l'organisme bavarois de développement agricole[32], le lait de foin est moins contaminé par *Clostridium* et *Listeria*, et il présente moins de défauts organoleptiques par rapport au lait issu d'animaux alimentés à l'ensilage ;
- nutritionnelles : le cahier des charges mentionne une teneur plus élevée en AG oméga-3 et acides linoléiques conjugués.

La communication sur le lait de foin STG par les Organismes de défense et de gestion (ODG) reprend les propriétés énoncées dans le cahier des charges et les développe, tout en s'appuyant sur d'autres propriétés. Les éléments de la qualité d'image sont mis en avant comme l'environnement, le bien-être animal et le développement rural (l'herbe correspond à une « *alimentation plus naturelle* » et préserve les paysages)[33]. Les propriétés technologiques du lait de foin sont également évoquées. Le rendement fromager, résultant du rapport TP/TB, est meilleur dans le cas de lait de foin. En outre, dans le cas de la transformation fromagère du lait cru, la plus faible contamination (*Clostridium*, *Listeria*) du lait sans ensilage est un avantage[34].

L'expansion commerciale du lait de foin STG passera en partie par la mise en avant des produits transformés qui en sont issus, comme le fromage ou le beurre, et de leurs qualités ainsi que la mise en place d'un réseau de distribution efficace. En 2019, 40 producteurs certifiés étaient recensés en France, majoritairement regroupés dans l'Ouest du pays, les autres étant situés dans le grand Est, et de façon plus confidentielle dans l'Aveyron. Les dossiers et communiqué de presse dédiés au lait de foin STG projetaient ainsi 20 millions de litre de lait certifiés, et l'implication des transformateurs dans la filière[35].

Il est à noter que AB et STG lait de foin sont intrinsèquement liés : en France, il se trouve que les producteurs du lait de foin sont également certifiés AB. Les deux signes de qualité convergent dans la promotion de l'alimentation à l'herbe, mais se distinguent sur deux points importants : l'AB rend obligatoire le pâturage et le lien au sol (autonomie alimentaire), contrairement au lait de foin STG qui mise sur l'interdiction de l'ensilage et donc sur les propriétés organoleptiques, ce que ne met pas explicitement en avant l'AB.

Concernant la qualité d'image qui fait pourtant partie de la communication du lait de foin, le pâturage n'est pas garanti en tant que tel dans le cahier des charges européen : il n'est pas nommément cité dans le texte règlementaire, même si, de façon pragmatique, il est appliqué par les éleveurs. Malgré tout, une étude menée dans le Sud-Tyrol (région Bolzano au nord de l'Italie) a montré que les consommateurs avaient une image positive du lait de foin et du lait de pâturage, ce dernier recevant néanmoins des évaluations légèrement plus positives. Cette appréciation du lait portait sur la santé, la confiance, la durabilité et le respect de l'environnement (Busch *et al.*, 2018).

La reconnaissance à l'échelle européenne d'un signe de qualité officiel permet de faciliter sa visibilité et son expansion, mais ne dispense pas de la gestion et de la communication sur ses avantages et ses propriétés, nécessaires à son déploiement. Le succès d'un signe de qualité passe par son intégration dans une filière prenant en compte la production primaire jusqu'à la

[31] ADEME. (2018). Matières fertilisantes organiques : gestion et épandage. https://www.ademe.fr/sites/default/files/_assets/documents/fiche-technique-epandage-201608.pdf

[32] Voir parge 65 : https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ilt/dateien/tagungsband_heubel%C3%BCftungsanlagen_2016.pdf

[33] Lait de foin. (2019). Dossier de presse - Le Lait de foin STG.

[34] Réseau wallon du développement rural. (2018). Carnet du réseau n°7 - Séchage et lait de foin. https://fr.calameo.com/books/004861236504753b9e53e.

[35] Lait de foin. (2019). Communiqué de presse - Le Lait de foin STG. https://www.michele-frene-conseil.fr/wp-content/uploads/2019/03/commuique_presse_lait_de_foin_production_francaise.pdf

distribution finale. Le recours au signe de qualité doit également être judicieusement choisi et rester cohérent de façon éviter la multiplication et la confusion entre les labels.

6.4.1.3. Exemple du panier de biens sur le territoire de Laguiole

Le Laguiole est un fromage à pâte pressée non cuite fabriqué avec du lait de vache entier et cru. Il bénéficie d'une d'AOC depuis 1961. Il se présente sous forme d'un gros cylindre de 20 à 50 kg, avec une croûte épaisse et sèche. La production annuelle de 700 tonnes provient de trois producteurs fermiers et d'une coopérative qui collecte le lait de 80 producteurs. Le cahier des charges, particulièrement exigeant, stipule notamment que les troupeaux doivent être de race Aubrac ou Simmental française, que leur production laitière ne doit pas dépasser 6 000 litres/vache/an et qu'ils doivent être nourris exclusivement à base d'herbe (l'ensilage étant interdit). La zone de production correspond au plateau de l'Aubrac, situé entre 800 et 1 400 m d'altitude aux confins des trois départements de l'Aveyron, du Cantal et de la Lozère. Ce plateau volcanique et granitique est bordé au nord-ouest par les monts du Cantal, à l'est par la Margeride et au sud par les plateaux calcaires des Grands Causses. Dans cette petite région, les éleveurs laitiers cohabitent avec des éleveurs allaitants, plus nombreux, qui vendent majoritairement des broutards issus de croisement entre des vaches de race Aubrac et des taureaux de race Charolaise. Ces veaux de 9 à 12 mois, nés en février-mars, passent l'été au pâturage avec leur mère et sont vendus en maigre pour leur viande aux engraisseurs des marchés industriels français et italiens.

Le fromage de Laguiole était autrefois produit par des buronniers individuels selon une organisation et des procédés de fabrication très proches de ceux du Cantal voisin. Les buronniers (« Cantalès ») élevaient dans les pâturages de montagne (entre la fin mai et la mi-octobre) des vaches de race Aubrac pour leur veau et leur lait qu'ils transformaient dans les burons (« mazuc »). Ce système a connu son apogée à la fin du XIXe siècle (300 burons dénombrés). Il s'est maintenu jusque dans les années 1940 avant de décroître rapidement dans les années 1960 au profit du système allaitant que l'on connait aujourd'hui dans cette région. L'obtention de l'AOC et la mise en place de la fabrication du fromage en coopérative ont été à l'origine d'un renouveau de la production du fromage de Laguiole aujourd'hui fabriqué majoritairement par la coopérative « Jeune Montagne ». L'essor et le dynamisme de la coopérative, mise en place au cours des années 1960 a conduit à l'abandon progressif de la production individuelle dans les burons. Cette forme d'organisation collective s'est révélée particulièrement efficace pour capter de la valeur ajoutée pour le territoire grâce d'une part à des efforts qualitatifs importants réalisés sur le fromage et grâce au développement de l'aligot (mélange de tomme fraîche et de pomme de terre) qui représente presque la moitié du chiffre d'affaire de la coopérative (Vollet *et al.*, 2017). En s'appuyant sur un cahier des charges exigeant et la valorisation des savoir-faire locaux et du patrimoine culturel local, cette organisation a permis de maintenir la production de ce fromage menacé d'abandon, de dégager un bon niveau de rémunération des emplois agricoles et la production notable de services environnementaux (biodiversité notamment) qui s'appuient sur la diversité des prairies permanentes de ce territoire (Vollet *et al.*, 2017).

Il est particulièrement intéressant de noter que dans ce territoire, l'essor et la réussite du fromage de Laguiole ont contribué par effet d'entraînement à la mise en place de filières différenciées pour les produits issus du troupeau allaitant. Ces filières, plus rémunératrices que la vente de broutards, permettent de valoriser les génisses de 3 ans issues du croisement d'une vache Aubrac et d'un taureau Charolais dans le cadre de la filière « Fleur d'Aubrac » ou les génisses et les vaches de réforme de race pure dans le cadre de la filière « Bœuf Fermier Aubrac ». Cette petite région est également parvenue à créer des complémentarités entre produits et services dans un « panier de biens et de services » qui inclut notamment une offre spécifique de produits (fromage AOP, aligot, viande, couteau) et des services touristiques complémentaires basés sur une offre d'hébergements, de circuits de visite et de restauration gastronomique mettant en avant les produits locaux issus du territoire (Mollard *et al.*, 2006 ; Vollet *et al.*, 2017). Le développement économique et humain de ce territoire peut être considéré comme exemplaire au regard de la dynamique professionnelle du secteur agricole, du tourisme local basé sur la beauté des paysages ouverts de la région, de la diversité des produits du terroir, de sa gastronomie et de l'artisanat notamment autour du célèbre couteau de Laguiole, dont la production a été en partie relocalisée autour de Laguiole (Martin *et al.*, 2014). Ces différents éléments ont permis de maintenir un nombre important d'emplois sur le territoire et ont contribué à promouvoir l'identité et la fierté de la population. Il s'agit d'un bel exemple où le développement d'un fromage a contribué à l'essor de toute une région qui a su faire de ses traditions et de ses produits un moteur de développement et un atout pour le tourisme.

Des situations comparables basées sur la valorisation conjointe de l'ensemble des composantes des terroirs existent dans d'autres régions (Beaufortain dans les Alpes, olive de Nyons...). Ces exemples montrent que la valorisation des synergies

entre les produits agricoles issus de l'histoire et de la culture locale, le tourisme, les produits de l'artisanat et la gastronomie locale sont susceptibles d'assurer un développement territorial harmonieux à long terme (Mollard et Pecqueur, 2007). Ce concept de « panier de biens », semble applicable à bien d'autres situations en France mais il nécessite néanmoins une très forte coordination de l'ensemble des acteurs du territoire et les conditions de sa mise en place sont délicates lorsque les gouvernances sectorielle et territoriale n'interagissent pas.

6.4.2. Conceptions innovantes

6.4.2.1 Approches participatives ou innovations couplées (associer les parties amont et aval), exemples d'applications smartphones, c'est qui le patron ?

Des initiatives commerciales comme « C'est qui le patron ? » montrent l'implication des consommateurs dans l'élaboration de la qualité d'un produit. Le premier produit de la marque fut une brique de lait, en 2016. La démarche s'appuie sur du marketing participatif, à savoir « *impliquer les consommateurs dans la définition et la diffusion de l'offre de l'entreprise* », en recourant à du crowdmarketing, ou littéralement à « une foule de consommateurs ». Le principe est le suivant : les consommateurs votent en ligne les engagements qu'ils souhaitent voir pris par les acteurs de la chaîne agroalimentaire. Chacun de ces engagements correspond à un surcoût intégré au prix final du produit. Par exemple, « pas de pâturage » ne représente aucun surcoût alors que l'engagement « pâturage 3 à 6 mois dans l'année » implique un surcoût fixé à 0,06 €/l. Une fois le cahier des charges validé, le produit est commercialisé. Cette procédure a été utilisée pour d'autres produits alimentaires : pizza, jus de pomme, œuf, fromage, beurre… Ce type de démarche modifie la segmentation de l'offre. Le consommateur s'engage dans la rémunération des producteurs, ce qui pourrait représenter un soutien de taille dans les négociations avec les opérateurs en aval.

6.4.2.2 Pratiques d'élevage innovantes pour faciliter l'engraissement à l'herbe dans les systèmes d'élevage allaitant du Massif Central

Plus du tiers des vaches et brebis nourrices françaises sont élevées dans le Massif Central (35 et 34%), les prairies permanentes fournissant la base de leur alimentation (60% de la SAU du Massif Central (Cerles *et al.*, 2017). Cependant, la finition des jeunes à l'herbe, qui impacte très positivement la qualité nutritionnelle de la viande (Berthelot et Gruffat, 2018 ; Duru *et al.*, 2017a), est difficile. Au-delà des aléas climatiques inhérents aux systèmes herbagers (Orr *et al.*, 2019), le verrou majeur pour les bovins est le défaut de précocité des races françaises, qui sont de maturité tardive. De plus, la France privilégie les animaux de race pure plutôt que ceux issus de croisements, lesquels sont largement utilisés dans les autres pays (Kondjoyan et Picard, 2019). Enfin, le classement traditionnel de la carcasse à l'abattoir, basé sur le poids et la conformation, conduit à privilégier les animaux lourds et fortement développés et à sélectionner sur ces critères (Kondjoyan et Picard, 2019), même si ce classement ne préjuge pas de la qualité en bouche pour les consommateurs (Lebret et Picard, 2015). Ces facteurs rendent la finition des animaux jeunes (moins de 2 ans) à l'herbe très difficile ; après le sevrage, les jeunes bovins sont en majorité exportés vers des ateliers d'engraissement, notamment en Italie, où ils sont engraissés avec des rations à base d'ensilage de maïs et/ou de concentrés, ce qui par ailleurs ne permet pas leur valorisation sous le signe de qualité de l'agriculture biologique (Lherm *et al.*, 2017). Cette spécialisation vers la production d'animaux maigres peut également fragiliser ces systèmes d'élevage par rapport à l'évolution de ces marchés (Cerles *et al.*, 2017). Une manière d'augmenter la part de l'herbe dans la ration est de produire des animaux âgés de plus de 30 mois (génisses, bœufs, vaches de réforme), mais il y a alors des verrous liés au niveau de capitalisation requis et aux risques supplémentaires liés à l'allongement des durées de production. Force est de constater que seulement 25% la viande bovine provient d'animaux finis à l'herbe (Duru *et al.*, 2017a), dont 3% de bœufs de type viande (Couvreur, 2018). Pour les agneaux, au-delà des risques liés aux aléas climatiques et à la prédation, un verrou très important est la sensibilité aux parasites auxquels les systèmes herbagers sont particulièrement exposés. En France, les agneaux sont ainsi le plus souvent engraissés en bergerie après le sevrage avec des rations riches en concentrés (Prache *et al.*, 2018). Ces verrous sur l'engraissement des jeunes à l'herbe impactent négativement la qualité nutritionnelle de la viande (Berthelot et Gruffat, 2018 ; Duru *et al.*, 2017a), la qualité d'image et l'acceptabilité sociale de l'élevage (Delaby *et al.*, 2018), les performances environnementales des systèmes d'élevage (Morel *et al.*, 2016 ; Provenza *et al.*, 2019), ainsi que l'intensité de la compétition feed/food (Duru *et al.*, 2017b). Ils ne permettent pas non plus la complète valorisation de la viande produite en agriculture biologique. Il faut rappeler que la viande de bovins ou d'ovins finis à l'herbe présente des teneurs en AGPI n-3, AGPI n-3 longue chaîne EPA et DHA respectivement 3, 1,7 à 3,5 fois plus élevées que celle issus d'animaux nourris avec des rations à base de concentrés ou d'ensilage de maïs, et un rapport

AGPI n-6/AGPI n-3 réduit de 70 à 75% (Berthelot et Gruffat, 2018). Cet effet est encore plus prégnant quand le fourrage provient de prairies diversifiées (Provenza *et al.*, 2019).

La conception de systèmes d'élevage innovants visant de nouveaux objectifs d'élevage nécessite de tenir compte de l'ensemble du système et de mobiliser un processus d'intelligence collective (Lechenet *et al.*, 2017; Meynard *et al.*, 2012). Pour reconcevoir les systèmes d'élevage, ce collectif doit s'accorder sur de nouveaux objectifs d'élevage, répertorier les pratiques d'élevage pouvant être mobilisées à cet égard, imaginer des « systèmes d'élevage candidats » qui recombinent pratiques existantes et innovantes, et procéder à une évaluation *ex ante* des systèmes potentiels sur la base de l'expertise de ses membres afin de choisir les systèmes les plus appropriées pour les objectifs visés (Meynard *et al.*, 2012).

Une expérimentation à l'échelle du système d'élevage a ainsi été conçue par un collectif interdisciplinaire avec l'objectif de lever, au moins partiellement, les verrous identifiés pour produire de la viande à l'herbe dans les systèmes allaitant du Massif Central. Ce collectif a identifié deux pratiques d'élevage innovantes qui pourraient permettre de faciliter l'engraissement des jeunes à l'herbe : d'une part, le croisement entre mères de race rustique et mâles de race herbagère précoce, d'autre part, l'association d'espèces (bovine et ovine). Le croisement choisi (Salers *x* Angus pour les bovins, Limousine *x* Suffolk pour les ovins) a été réfléchi pour apporter de la précocité (capacité de l'animal à déposer du gras intra-musculaire précocément). La race Angus notamment est très précoce (Bures et Barton, 2018). Elle est bien adaptée aux rations à base d'herbe et aux systèmes à faibles intrants, et elle permet de produire des carcasses d'état d'engraissement satisfaisant avec des animaux jeunes (Dufey *et al.*, 2002). Pour les bovins particulièrement, un système naisseur-engraisseur avec production d'animaux jeunes finis à l'herbe (pâturée et conservée) devrait permettre de i) produire une viande de meilleure qualité nutritionnelle, ii) réduire la consommation d'intrants, iii) apporter de la plus-value au territoire (pas de finition des animaux hors du territoire dans des ateliers d'engraissement et valorisation des animaux sous le signe de qualité agriculture biologique), et iv) être moins émetteur de GES qu'un système produisant des mâles maigres jeunes (broutards) ou gras âgés (bœufs de plus de 30 mois) et des femelles grasses de plus de 3 ans, via une optimisation de la part d'animaux productifs par rapport aux animaux à l'entretien (Nguyen *et al.*, 2012). Quant à l'association d'espèces, la littérature montre qu'elle offre des services écosystémiques permettant au système de rester productif tout en dépendant moins d'intrants, à travers i) une meilleure valorisation des fourrages, notamment au pâturage en tirant avantage des complémentarités entre espèces dans le comportement d'ingestion (Abaye *et al.*, 1994 ; Diaz-Falu *et al.*, 2014) et ii) un service de régulation du parasitisme, car les nématodes sont relativement stricts vis-à-vis de leur hôte (Michel, 1985) limitant ainsi le recours aux intrants anti-parasitaires. Cependant, ces services ont jusqu'à présent été étudiés uniquement à l'échelle de la saison de pâturage et l'un des objectifs de cette expérimentation est de quantifier les services rendus par l'association d'ovins et de bovins à l'échelle du système d'élevage. Au-delà de l'amélioration des performances individuelles et par hectare (d'Alexis *et al.*, 2014), l'association d'espèces animales pourrait permettre de réduire le recours aux intrants (concentrés, médicaments) (Lumaret et Errouissi, 2002) et d'améliorer l'efficience du système d'élevage (production par unité d'intrant). Elle pourrait aussi permettre de réduire l'empreinte carbone du système d'élevage, grâce à i) l'amélioration de la valeur nutritive des fourrages et des performances animales, ii) la réduction de la consommation d'énergie fossile via les concentrés (Benoit et Laignel, 2010 ; d'Alexis *et al.*, 2014 ; Fraser *et al.*, 2014). Cependant, elle pourrait être plus complexe à gérer et augmenter la charge de travail pour l'éleveur.

Cette phase de conception a ainsi abouti à la mise à l'épreuve de 3 systèmes d'élevage allaitant herbagers, un mixte associant bovins et ovins (UGB ovines/UGB totales : 0,4) et 2 spécialisés (l'un bovin, l'autre ovin), le croisement de races étant pratiqué dans les 3. Le système 'phare' est le système mixte, les deux systèmes mono-spécifiques étant considérés comme des témoins permettant de quantifier l'intérêt de l'association d'espèces. Au-delà de ces deux pratiques innovantes, ces systèmes mobilisent également les pratiques plus classiques des systèmes herbagers à faibles intrants qui permettent de maximiser l'herbe dans la ration des animaux (chargement adapté aux disponibilités fourragères, périodes de mise-bas permettant de faire coïncider au mieux les besoins du troupeau avec les disponibilités fourragères, gestion fine du pâturage) (Delaby *et al.*, 2018).

Chaque système est conduit dans des conditions pédo-climatiques similaires sur un parcellaire qui lui est propre. Il dispose de 39 ha de prairies permanentes, dont 18 ha de fauche pour 29,5 UGB, soit un chargement de 0,75 UGB/ha. La répartition des parcelles et des animaux a été faite de manière à ce que les 3 systèmes soient 'similaires' au début de l'expérimentation. Les 3 systèmes suivent le cahier des charges de l'agriculture biologique (certification bio acquise en mai 2018). Ils seront

évalués sur différents volets (performances technico-économiques, santé animale, qualité des produits, production fourragère et valeur nutritive des fourrages, diversité floristique et faunistique des prairies, organisation et conditions de travail, empreinte carbone). Ce dispositif permettra ainsi de comparer la multi-performance d'un système mixte assemblant des bovins et des ovins et celle d'un système spécialisé et ainsi de quantifier les services écosystémiques (et potentiels dis-services) rendus par la diversité d'espèces animales dans ces conditions.

L'apport de concentrés est minimal : il est réservé aux périodes clés pour les animaux à forts besoins (lutte/saillies et fin de gestation des femelles, agneaux finis en bergerie le cas échéant). La prolificité étant élevée, il est en effet essentiel d'assurer un bon état corporel des brebis en fin de gestation pour préserver le poids des agneaux à la naissance et une bonne production laitière des mères, ces deux aspects étant déterminants pour les performances et la qualité des agneaux produits à l'herbe (Prache, 2014; Prache et Theriez, 1988 ; Villette et Theriez, 1981). Le ratio d'espèces choisi dans le système mixte est proche de celui identifié dans la méta-analyse de d'Alexis *et al.* (2014) comme optimisant les performances individuelles et par hectare par rapport à un système ovin spécialisé. Les modalités d'assemblage des deux espèces animales ont été réfléchies au début du projet et restent inchangées. Toutefois, il est évident qu'une grande diversité dans ces pratiques d'assemblages peut être observée en élevage, depuis des ateliers animaux/parcelles disjoints jusqu'à une forte imbrication des deux espèces (Cournut *et al.*, 2012). Les services écosystémiques potentiellement rendus par l'association d'espèces dépendront largement de ces modalités (ratio d'espèces et modalités d'assemblage). Ils dépendront aussi des conditions pédo-climatiques locales.

Premiers résultats, conclusions et perspectives

L'expérimentation durera au moins 5 ans, elle n'est pas terminée. Pendant les 4 premières années, les agneaux ont tous été finis à l'herbe sans concentré dans le système mixte, alors qu'en moyenne 10% des agneaux ont été finis en bergerie dans le système spécialisé. Leur vitesse de croissance a été plus élevée et leur âge à l'abattage réduit dans le système mixte par rapport au système spécialisé. Ceci est favorable à la qualité nutritionnelle de la viande produite, à la réduction des intrants (concentré, médicaments) et à l'empreinte carbone du système d'élevage. Pour les bovins, la vitesse de croissance des jeunes a été en moyenne de 1 000 g/j au pâturage sous la mère et de 800 g/j pendant la phase de finition à l'étable, valeurs en accord avec la valeur nutritive des fourrages et celles observées dans la littérature (Orr *et al.*, 2019). La qualité de la viande dans ses différentes dimensions (commerciales, organoleptiques, nutritionnelles, image…) est en cours d'évaluation. Les qualités organoleptiques seront notamment évaluées par des consommateurs dits « naïfs ». Deux difficultés en lien avec la demande de la filière aval peuvent être mentionnées : d''une part, les carcasses des jeunes bovins croisés sont de poids léger (de 260 à 300 kg), poids qui ne correspond pas aux standards de la filière, laquelle privilégie les animaux de race pure, lourds et fortement développés. Ceci constitue un verrou important, même si le poids de la carcasse et son classement ne présument pas de la qualité en bouche pour les consommateurs (Lebret et Picard, 2015). Cette difficulté pourrait être levée, au moins en partie, soit par le choix de la vente directe (laquelle représente 12% des achats de viande bovine en France (Agence Bio, 2018)[36]), soit en allongeant le cycle de production d'une saison de pâturage supplémentaire, car la voie de la vente directe n'est pas praticable par tous les éleveurs. Une autre difficulté provient de la saisonnalité des ventes d'animaux, car la filière aval souhaite une régularité d'approvisionnement tout au long de l'année pour fournir ses clients (Benoit *et al.*, 2019). Ces deux difficultés illustrent la dépendance des éleveurs envers leur amont et leur aval (critères commerciaux orientant la sélection génétique sur le poids et la conformation, promotion des races pures chez les bovins, répartition des ventes au cours de l'année) qui peuvent freiner voire verrouiller l'évolution des pratiques d'élevage. Certains auteurs recommandent des politiques publiques plus incisives pour soutenir les systèmes herbagers, qui sont à la fois moins impactant pour l'environnement et qui produisent de produits animaux de meilleure qualité nutritionnelle à partir de surfaces en prairies souvent impropres à la culture mais favorables à la- biodiversité, à la filtration de l'eau et au stockage du carbone (Duru, 2017). Du côté des consommateurs, il n'existe pas de signe de signe de qualité 'Animaux nourris à l'herbe', mais l'exemple de l'œuf (étiquetage du mode d'élevage obligatoire) et de la filière Bleu Blanc Cœur (garantie d'une teneur en ALA) ne

36 Dossier de presse Agence Bio. Les chiffres 2018 du secteur bio. https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2019/06/DP-AGENCE_BIO-4JUIN2019.pdf (consulté le 20/03/2020)

constituent-ils pas de premiers exemples (Duru, 2017). Une réelle demande sociétale s'est exprimée à cet égard au cours des derniers États généraux de l'alimentation.

6.4.3. Enjeux et limites des approches systèmes centrées sur la santé

Mieux attribuer les sources du fardeau des dangers microbiologiques transmis par les aliments

Le chapitre 3 a montré l'impact global des produits d'origine animale sur le fardeau associé aux micro-organismes pathogènes transmis par les aliments. Les chiffres relatifs à la part des différents réservoirs animaux ou à la part du comportement des consommateurs restent toutefois associés à une grande incertitude (Anses, 2017). Les nouvelles données basées sur la comparaison génomique des isolats bactériens trouvés chez les personnes malades et retrouvés dans les aliment donnent une perspective à l'amélioration des approches d'attribution des sources (Mughini-Gras *et al.*, 2018).

Toujours dans le contexte de l'attribution des sources, la résistance aux antimicrobiens (RAM) est une préoccupation de santé publique majeure au niveau national et international. L'apparition de ces résistances est liée à l'utilisation de ces agents en médecine humaine mais aussi dans la production alimentaire animale et végétale. Ainsi la sélection et la transmission de microorganismes résistants aux antimicrobiens à l'homme peut s'effectuer par la voie alimentaire. Pour l'instrant, les données collectées ne permettent pas de chiffrer la part de RAM associée à cette voie. Des lignes directrices pour la conduite de l'analyse des risques liés à la l'antibioésistance d'origine alimentaire ont été établies par le *Codex Alimentarius* (CAC/GL 77-2011). Ces lignes fournissent un cadre structuré pour l'analyse des risques liés à la présence dans les aliments (et aliments pour animaux) de microorganismes résistants aux antimicrobiens ou de déterminants de la résistance liée à l'utilisation non humaine d'agents antimicrobiens. Ces méthodes seront appliquées afin de mieux déterminer la part de l'alimentation dans la diffusion de l'antibiorésistance (Collineau *et al.*, 2019).

Données, diversité, méthodes, gap, limites sur les données épidémiologiques

La présente expertise collective porte sur la qualité des produits animaux et en particulier l'impact sur la santé du consommateur. Sur le plan épidémiologique, le périmètre est cependant plus circonscrit en raison d'un certain nombre de limites. En effet, les attributs de la qualité tels que définis dans cette expertise collective (*cf.* chapitre 1) ne sont pour la plupart pas disponibles au niveau épidémiologique. Ainsi des limites liées aux méthodes et à la disponibilité des résultats sont à souligner.

En effet, si l'épidémiologie ne permet pas d'établir des liens de causalités (*cf.* chapitre 3), la plupart des résultats épidémiologiques portent de plus sur des catégories d'aliments relativement larges limitant l'identification précise des effets de sous-catégories d'aliments ou de mode de production ou d'élevage. Par exemple, si les catégories viande transformées (charcuterie) ou viande de boucherie sont souvent distinguées, les différents types de viande (porc, bœuf…) le sont plus rarement. Il en est de même pour les catégories des produits laitiers ou des poissons souvent considérés comme des catégories uniques. De la même manière, les informations sur les différents modes d'élevage ou de production sont inexistantes au niveau épidémiologique, empêchant d'en évaluer l'impact sur le risque.

Plusieurs approches sont toutefois envisageables pour contourner au moins en partie ces limites :

L'amélioration de la précision lors de la collecte des données et l'exploration plus fine des associations devra être soutenue afin de permettre l'étude des relations à un niveau plus précis en termes de produits et de mode d'élevage/production. Cela nécessite en particulier le recours à des méthodes de collecte de données alimentaires plus précises tels que des enregistrements de consommation sur une période de 24 heures comparées aux questionnaires de fréquence comportant des listes fermées et donc parfois des items globaux (volaille, par exemple).

Concernant la composition nutritionnelle des aliments, l'épidémiologie a recours à des compositions qui, la plupart du temps, sont des moyennes pour un item donné. Cela a pour conséquence d'éliminer les différences de composition nutritionnelle et donc de qualité. Il est théoriquement possible pour des aliments industriels d'avoir accès à des compositions plus spécifiques (à partir des données d'étiquetage au moins) si les marques sont enregistrées lors de la collecte. Si cela est possible pour certaines méthodes de recueil tels que les enregistrements de consommation sur une période de 24 h, cela est plus complexe lors de l'utilisation de questionnaires de fréquence portant généralement sur l'année écoulée.

Ce niveau de précision n'est toutefois pas atteignable pour des aliments « bruts » ou artisanaux. C'est en effet le cas pour la viande fraîche et la charcuterie non industrielle.

Aussi, la collecte de données relatives à la qualité des produits à l'échelle épidémiologique est relativement restreinte dès lors que les consommations sont auto-rapportées et que le consommateur ne connaît pas ces attributs pour les aliments consommés. Il est donc nécessaire pour approcher ces dimensions d'avoir recours à un « langage commun » entre l'enquêteur et l'enquêté. Les labels peuvent permettre au mieux partiellement de pallier cette contrainte. Toutefois, s'il est probable que certains critères de qualité, en particulier la composition nutritionnelle, pour un aliment donné sont différents selon certains labels (Bleu Blanc Cœur, bio par exemple), les tables de composition actuelles ne permettent pas toujours de les considérer *a posteriori*. Par exemple, concernant le label bio, les données sont trop parcellaires pour permettre d'introduire le mode de production comme un déterminant des valeurs nutritionnelles à l'échelle du régime.

Une approche pluridisciplinaire associant les approches épidémiologiques et expérimentales permet aussi de contourner en partie les limites évoquées ci-dessus. En effet, les avantages/limites des approches épidémiologiques et expérimentales sont très complémentaires et permettent, lorsque qu'elles sont associées, d'augmenter à la fois le niveau preuve du lien de causalité et d'étudier des sous-catégories de produits, tout en étudiant les mécanismes sous-jacents.

En effet, les études épidémiologiques sont d'une importance primordiale dans l'évaluation des risques pour la santé en raison de leur pertinence directe pour les populations humaines dans leur environnement naturel. S'ils sont construits en conséquence, les questionnaires alimentaires à la base de ces études épidémiologiques peuvent également détecter des interactions avec d'autres facteurs dans l'environnement ; toutefois faute de données, les études épidémiologiques ne peuvent pas actuellement intégrer la qualité des produits animaux et les modes d'élevage et de production. À l'inverse, les approches expérimentales incluant les études sur les modèles animaux, utilisés dans le cadre des limites éthiques et de la réglementation actuelle, permettent d'étudier beaucoup plus facilement l'impact de la qualité des produits animaux. En effet, si adapter un questionnaire alimentaire et collecter les données peuvent demander beaucoup de temps pour établir les associations épidémiologiques, les études sur les modèles animaux permettent d'avoir une évaluation physiopathologique de nombreuses conditions sur des durées expérimentales beaucoup plus courtes.

En ce sens, les travaux menés sur l'association positive entre la consommation de produits carnés et le risque de cancer colorectal sont illustratifs : les méta-analyses conduites par le WCRF ont permis de proposer une association positive entre la consommation de viande de boucherie hors volailles et le risque de cancer colorectal pour un incrément de 100 g consommé par jour (RR=1,12 ; 95% IC=1,00-1,25), ainsi qu'entre la consommation de viande transformées et le risque de cancer colorectal pour un incrément de 50 g consommés par jours (RR=1,16 ; 95% CI=1,08-1,26). Toutefois, comme évoqué ci-dessus ces études ne permettent pas de conclure quant à l'impact des conduites d'élevage, les modes de productions et d'identifier les mécanismes impliqués.

En complément de ces approches observationnelles, les perspectives en termes de recherche vont s'appuyer notamment sur des études expérimentales dans des modèles animaux de carcinogenèse colorectale, qui avaient souligné :

- l'effet promoteur de différents types de produits carnés tels que le blanc de poulet, la viande bovine, le jambon blanc, le boudin noir et la saucisse de Strasbourg (Pierre *et al.*, 2004 ; Pierre *et al.*, 2008 ; Santarelli *et al.*, 2013) en démontrant dans les modèles animaux un effet promoteur de tous ces produits carnés hors le blanc de poulet. Ces données cohérentes avec les résultats des études épidémiologiques confortaient l'utilisation des modèles animaux pour aller plus en avant ;

- l'impact des différentes étapes du procédé de production des charcuteries (Santarelli *et al.*, 2010) permettant d'observer que la richesse en fer héminique du muscle utilisé pour produire la charcuterie, la quantité de sel nitrité et l'étape d'étuvage étaient centrales pour expliquer l'effet promoteur observé dans les modèles animaux ;

- l'impact du mode de préparation (Pierre *et al.*, 2013) en évaluant l'impact du mode de cuisson des produits carnés (Pence *et al.*, 1998).

De plus, ces approches expérimentales ont permis de proposer un mécanisme expliquant cette association positive rapportée par l'épidémiologie, car si trois hypothèses (fer héminique, HCA et NOCs) sont largement étudiées pour expliquer l'effet promoteur des produits carnés, aucune étude n'avait déterminé le poids de chacune de ces hypothèses et de leur association. En 2015, Bastide *et al.* (2015) ont déterminé, grâce à l'utilisation de modèles animaux et modèles cellulaires, que le fer héminique est le principal agent expliquant l'effet promoteur des produits carnés (Bastide *et al.*, 2015). Il a été proposé que cet effet promoteur du fer héminique soit avant tout expliqué par sa forte capacité à induire la formation luminale d'aldéhydes

cytotoxiques et génotoxiques pour les cellules épithéliales coliques, ces aldéhydes étant les produits terminaux de la peroxydation des acides gras polyinsaturés. Ultérieurement, les travaux de Bastide *et al.* (2017) ont permis de compléter ces travaux sur le rôle des composés N-nitrosés (NOCs) : si les NOCs totaux ne sont pas corrélés à l'effet promoteur des viandes de boucherie hors volailles et charcuteries, une sous-catégorie de ces NOCs, le fer nitrosylé ou FeNO, est associée à l'effet promoteur des charcuteries chez le rat prétraité à l'azoxyméthane pour induire la carcinogenèse colorectale (Bastide *et al.*, 2015 ; Bastide *et al.*, 2017). Collectivement ces travaux permettent de proposer que l'effet des viandes de boucherie hors volaille et des charcuteries soit expliqué au moins en partie par l'apport en fer héminique catalysant la formation de FeNO et d'aldéhydes.

De plus, ces études *in vivo* ont permis d'identifier des biomarqueurs, dans les biofluides, de l'effet promoteur du fer héminique : le DHN-MA qui est le métabolite urinaire du HNE (4-hydroxynonenal) (Pierre *et al.*, 2006), l'activité cytotoxique des eaux fécales, la peroxydation lipidique des eaux fécales (Pierre *et al.*, 2008) et les NOCs dont le FeNO (Pierre *et al.*, 2013). Grâce à ces biomarqueurs, il a pu être vérifié que leur augmentation observée dans les modèles animaux suite à la consommation de fer héminique et/ou charcuterie modèle était aussi observée chez des volontaires sains dès 4 jours de consommation de charcuterie modèle (Pierre *et al.*, 2013). Après cette démonstration expérimentale du rôle promoteur du fer héminique, un retour aux approches épidémiologiques a permis d'étudier l'association entre consommation de fer héminique et risque chez l'Homme. La méta-analyse de Bastide *et al.* (2016; 2011) a rapporté une association positive entre consommation de fer héminique et le risque de cancer du côlon avec une augmentation significative de 18% pour les plus gros consommateurs. Une étude récente sur la cohorte E3N (cohorte prospective portant sur environ 100 000 femmes volontaires françaises nées entre 1925 et 1950 et suivies par des questionnaires alimentaires depuis 1990) a permis de montrer que la consommation de fer héminique est effectivement associée à un risque d'adénomes coliques augmenté de 36% (Bastide *et al.*, 2016). Sur cette base, plusieurs travaux ont évalué la possibilité de limiter la formation de ces composés néoformés pour limiter l'impact de la consommation de ces produits carnés sur le risque (Corpet, 2011) : en effet, une fois le lien proposé entre la peroxydation lipidique/nitrosylation endogène induites par le fer héminique et la promotion de la carcinogenèse colorectale par les viandes transformées, un levier de prévention nutritionnelle apparaît possible : limiter l'effet promoteur en limitant la peroxydation et nitrosylation. Tel que présenté dans le paragraphe 6.3.1 les études expérimentales ont permis de proposer que modifier le mode de production des produits carnés par ajout d'antioxydants limitant nitrosylation et peroxydation endogènes peut être une solution pour limiter l'effet promoteur des produits carnés. Sur la base de cette démonstration expérimentale, des études chez les volontaires sains et sur la cohorte nutrinet santé ont permis de confirmer l'effet limitant la peroxydation et nitrosylation chez des volontaires sains et d'observer que l'association postive avec le risque de cancer est limitée par le statut antioxydant du régime.

Pris collectivement, ces résultats montrent que « les allers et retours » entre les approches épidémiologiques et expérimentales ont permis de passer de l'association positive entre une catégorie de produit carné et le risque de cancer à l'identification d'un mécanisme impliquant un nutriment, d'étudier différents produits de cette catégorie et, sur cette base d'identifier des leviers de préventions basés sur la modification du mode de consommation ou du mode de production.

En conclusion, pour évaluer l'impact de l'ensemble des attributs de la qualité des produits animaux, il parait donc nécessaire de soutenir l'amélioration de la précision des données collectées en amont des études épidémiologiques. Toutefois, comme le niveau de précision nécessaire ne sera pas atteignable pour évaluer l'impact santé de toutes les qualités, les approches multidisciplinaires de cette question devront être encouragées.

6.4.4. Limiter les pertes et gaspillage et favoriser la valorisation de la biomasse animale

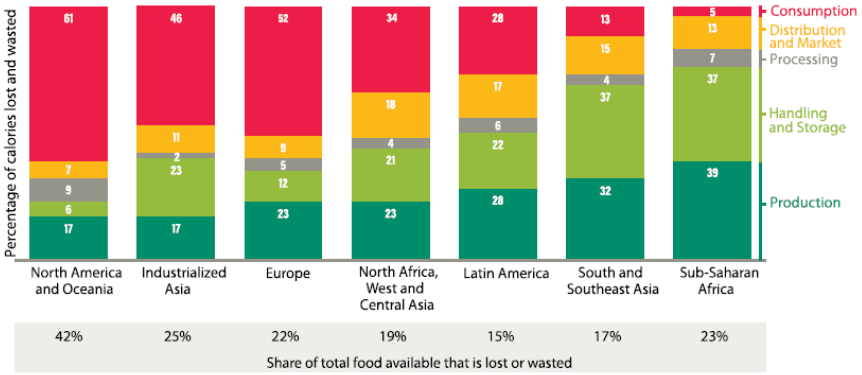
6.4.4.1. Introduction

Les pertes et gaspillages alimentaires posent 3 questions fondamentales aux citoyens, aux consommateurs et aux décideurs publics ou privés, sur l'éthique de la production et de la consommation, sur le caractère durable de nos modes de production et de consommation et sur son absurdité économique (Melchior et Garot, 2019). Ils renvoient frontalement au fait que collectivement, nous surproduisons, nous surconsommons, et nous jetons l'excédent, de façon massive, alors que la précarité alimentaire demeure une réalité des sociétés développées (Melchior et Garot, 2019). Les pertes et gaspillages contribuent également à la crise écologique, car elles conduisent à une consommation de ressources et aux impacts environnementaux correspondants. Ainsi, l'empreinte carbone globale qui leur est liée correspond à celle d'un pays : si les pertes et gaspillages étaient un pays, leurs émissions, en équivalent CO_2, les placeraient en 3ème position après celles de la Chine et des USA

(Esnouf & Huyghe 2015). Leurs empreintes sur l'eau (consommation d'eau) et sur l'espace (usage de terres) les placent également en 1ère et 2ème position (Esnouf et Huyghe, 2015). Au-delà, les impacts concernent également la pollution des sols et des océans, la production de plastiques… (Melchior et Garot, 2019). La réduction des pertes et gaspillages est ainsi un enjeu majeur pour répondre à la demande alimentaire mondiale croissante tout en préservant les ressources et l'environnement. Le pendant de cette limitation des pertes consiste à utiliser, recycler, valoriser cette biomasse perdue. En effet, ces « sous-produits » pourraient devenir des ressources valorisables si elles étaient traitées en conséquence (Zhang *et al.*, 2010). Ils possèdent, pour la plupart, des propriétés nutritionnelles intéressantes (acides aminés essentiels, minéraux, vitamines) constituants de bonnes opportunités de valorisation (Nollet et Toldra, 2011 ; Toldra *et al.*, 2012 ; Valta *et al.*, 2015). Par exemple, le cœur de porc (abat rouge) est un muscle pauvre en graisses et une excellente source de vitamine E qui lui confère un potentiel pouvoir antioxydant. Le foie (abat rouge) est très riche en vitamines A, B_2, B_3, B_5, B_6, B_9, B_{12}, C, D et K, en cuivre, fer, phosphore, sélénium et zinc. Le poumon possède une consistance très spongieuse, est hypocalorique et riche en cholestérol, cuivre et sodium.

On estime qu'en Europe environ 22% de la nourriture (base : calories) a été perdue ou gaspillée en 2013 (Lipinski *et al.* (2013), cité par Warner (2019)). Ce chiffre est de 33% à l'échelle mondiale, il varie de 15% pour l'Amérique latine à 42% pour l'Amérique du Nord et l'Océanie. Ces pertes et gaspillages (PG) alimentaires surviennent à toutes les étapes de la chaîne alimentaire. En Europe, on estime que 23% des PG surviennent lors de la production, 12% lors du stockage, 5% lors de la transformation, 9% lors de la distribution et 52% lors de la consommation, ce qui signifie que 5% d'aliments sont perdus ou gaspillés lors de la production, 2,6% lors du stockage, 1,1% lors de la transformation, 2% lors de la distribution et 11,4% lors de la consommation (Lipinski *et al.*, 2013) C'est donc au niveau de la consommation que les PG alimentaires sont les plus importants.

Figure 6.7 : Estimation des pertes et gaspillages au cours de la chaîne alimentaire dans les différentes régions du monde en 2009 (% des kcal perdues et gaspillées). Tiré de Lipinski *et al.* (2013), cité par Warner (2019)



Les PG alimentaires totaux varient beaucoup selon le produit : ils se situent dans la gamme de 20-27% pour la viande (21% pour l'Europe), 30-50% pour les poissons et produits de la mer (31% pour l'Europe), 11-25% pour les produits laitiers (12% pour l'Europe), et 12-20% pour les œufs (FAO, 2011).

Figure 6.8 : Estimation des pertes et gaspillages au cours de la chaîne alimentaire dans les différentes régions du monde en 2009 pour la viande. (Source : FAO, 2011)

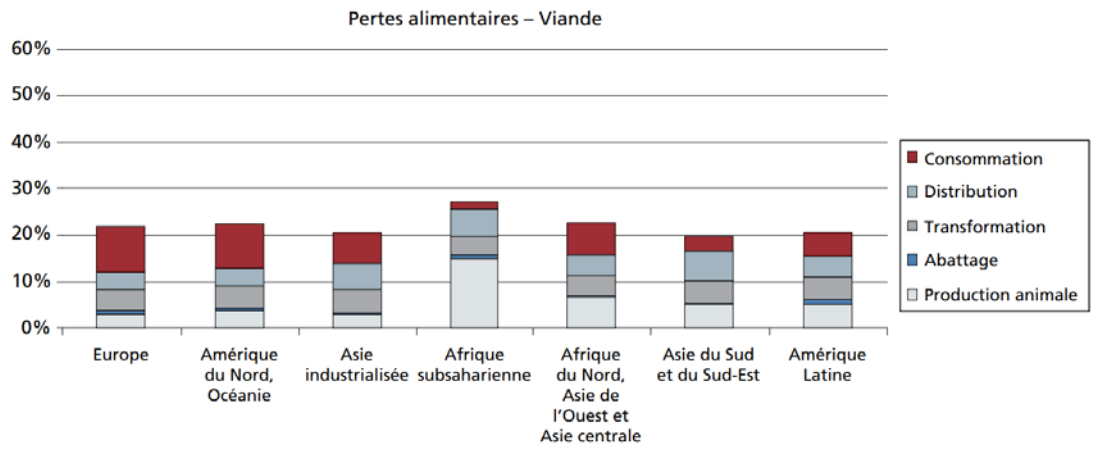


Figure 6.9 : Estimation des pertes et gaspillages au cours de la chaîne alimentaire dans les différentes régions du monde en 2009 pour le poisson. (Source : FAO, 2011)

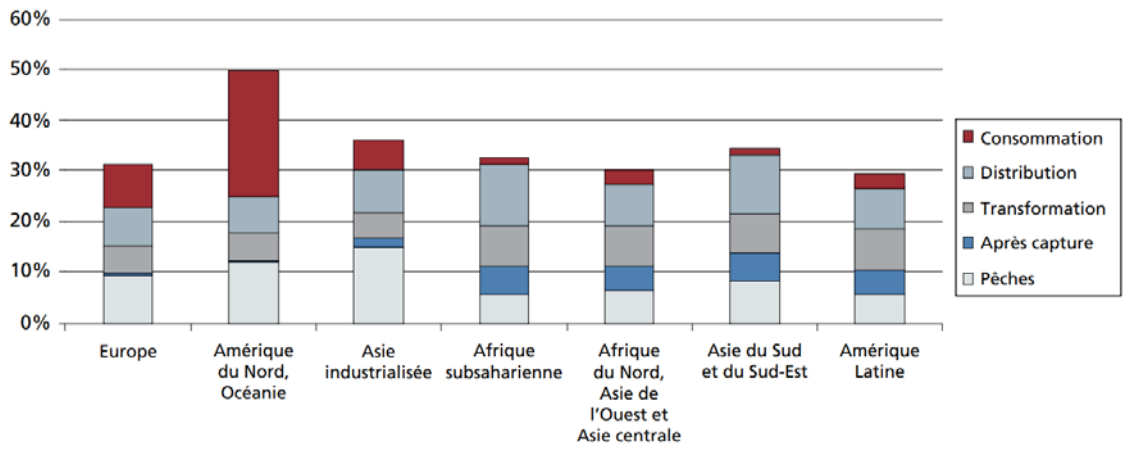
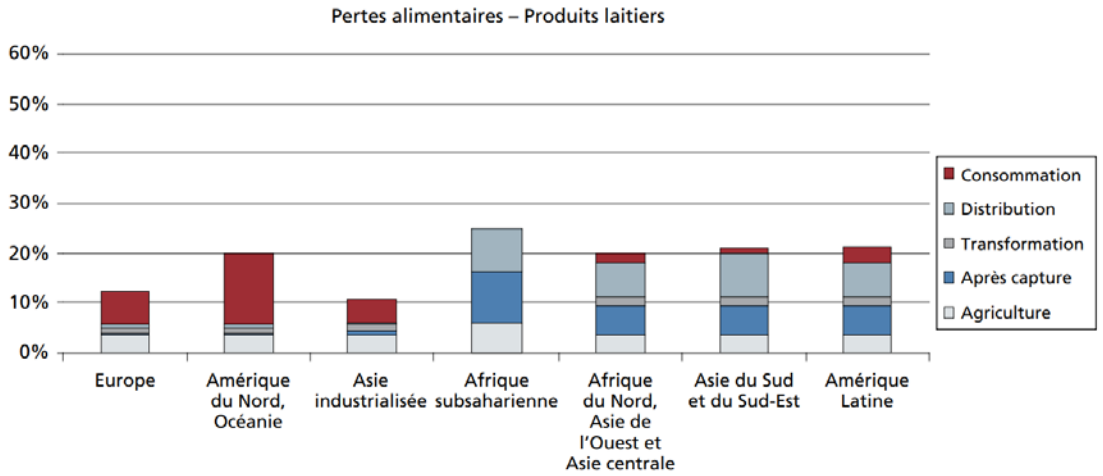


Figure 6.10 : Estimation des pertes et gaspillages au cours de la chaîne alimentaire dans les différentes régions du monde en 2009 pour les produits laitiers. (Source : FAO, 2011)



À l'échelle de la France, une étude de l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe, 2016), fondée sur les données recueillies auprès de 570 acteurs intervenant dans différentes filières et aux différentes étapes de la chaîne

alimentaire, a établi que les pertes et gaspillages alimentaires s'élevaient à 10 millions de tonnes par an, qu'elles représentaient une valeur de 16 milliards d'euros et une perte de pouvoir d'achat de 108 euros par an et par personne, et qu'elles pesaient 15.3 millions de tonnes eq. CO_2 (soit 3% du bilan carbone national).

Ces estimations sont cependant entachées d'incertitudes, car la quantification des pertes et gaspillages alimentaires est difficile. Les données sont rares et difficiles d'accès, en France comme dans d'autres pays européens et il n'y a pas de cadre d'analyse et de définition partagés de ce qui constitue des pertes et des gaspillages alimentaires (Redlingshofer *et al.*, 2019). Il y a ainsi des différences de définition et de périmètre importantes entre études (Redlingshofer *et al.*, 2019; Stenmarck *et al.*, 2016). Par exemple, certaines études, dont celle de la FAO (2011) incluent la mortalité des animaux d'élevage pendant la phase d'élevage et d'engraissement (filières viande) ou pendant la période de ponte (filière œuf), ainsi que les pertes de rendement en lait liées aux mammites (filières laitières) dans les pertes alimentaires à l'échelle de la production primaire (FAO, 2011), d'autres ne les considèrent pas comme des pertes alimentaires, mais comme des manques à produire (Redlingshofer *et al.*, 2019). Certaines études considèrent le pet food (aliments pour animaux de compagnie) comme une façon de réduire les pertes alimentaires (Ostergren *et al.*, 2014), d'autres non (Redlingshofer *et al.*, 2019). Certaines études comptabilisent la valorisation en alimentation du bétail comme des pertes alimentaires FAO (2011), au contraire d'autres études, qui considèrent que des denrées initialement écartées de la consommation humaine peuvent y revenir après valorisation et conversion par les animaux d'élevage (Redlingshofer *et al.*, 2019). Certains acteurs ignorent qu'ils gaspillent faute de protocole de collecte de données, d'autres sont réticents à communiquer par crainte d'atteinte à leur image, ou parce que la définition de ce qui constitue des pertes et gaspillages n'est pas stabilisée (Melchior et Garot, 2019). Enfin, estimer les pertes et gaspillages est complexe du fait de l'hétérogénéité des procédés de production, de transformation ou de distribution (Melchior et Garot, 2019).

6.4.4.2. Quantification des pertes et gaspillages en France : l'exemple du travail mené par les groupes filières de l'Inra

L'Inra a confié à ses groupes filières une étude (2015-2016) visant à quantifier les PG alimentaires dans les différentes filières (excepté cheval, lapin, poules pondeuses et reproducteurs de réforme, lait de petits ruminants, ovins, caprins et truies de réforme). Cette étude s'est surtout centrée sur les pertes et gaspillages alimentaires allant de la production à la transformation, compte tenu du manque d'informations à l'échelle de la distribution et de la consommation. Les PG alimentaires y sont comptabilisés à partir du moment où la production primaire est prête à être abattue (filière viande), traite (filière laitière), ramassée (œufs) et pêchée (poissons), les pertes à l'étape antérieure étant considérées comme des manques à produire. Cette étude souligne que la connaissance des pertes et gaspillages alimentaires est souvent difficile du fait i) de la complexité des modes de valorisation et de transformation, ii) que les données sont rares ou non communiquées, ii) du caractère confidentiel des données d'entreprises et de leurs représentants professionnels (Redlingshofer *et al.*, 2015). Les résultats obtenus demandent donc certainement à être validés/consolidés et élargis au périmètre de la distribution et de la consommation, cette dernière étape étant, rappelons-le, celle où les PG alimentaires sont les plus importants.

Cette étude a retenu 3 éléments :

- les pertes alimentaires, définies comme les denrées destinées à la consommation humaine, mais qui sont écartées ou perdues ou retirées tout au long de la chaîne (exception faite de celles recyclées au travers d'une valorisation en alimentation animale, hors animaux de compagnie) ;
- les denrées écartées de la consommation humaine, mais valorisées auprès d'animaux d'élevage et revenant après conversion par l'animal à la consommation humaine. Ces denrées ne sont pas considérées comme des pertes alimentaires. *A contrario*, des denrées alimentaires initialement destinées à être consommées par l'homme, mais valorisées auprès d'animaux de compagnie (*pet food*) sont considérées comme des pertes alimentaires ;
- les matières inconsommables pour l'homme, par définition non destinées à l'alimentation humaine (coquilles d'œuf, partie inconsommable du 5ème quartier des animaux).

Par ailleurs, il faut noter que les débouchés des produits frais et des produits transformés peuvent être complémentaires au sein d'une filière, ce qui limite le passage d'écarts ou de retraits à l'état de pertes alimentaires. Ainsi, des produits non conformes aux cahiers des charges pour les produits frais peuvent être intégrés dans les filières de transformation (Redlingshofer *et al.*, 2015). Par exemple, dans la filière œufs, les œufs peu sales, fêlés et hors calibre sont systématiquement

absorbés par le débouché des ovoproduits contribuant ainsi à la limitation des pertes alimentaires d'œufs en coquille. Dans les produits carnés et laitiers, la diversité en produits transformés (et plats préparés) permet la réincorporation d'écarts de production (chutes en fromages fondus, râpés…). Les filières animales ont ainsi un rôle important à jouer dans la prévention des pertes alimentaires par la valorisation des écarts. Cependant, la complexité des voies de transformation rend difficile la quantification des réelles pertes alimentaires.

Tableau 6.2 : Caractérisation des denrées alimentaires et de leurs parties inconsommables (Redlingshofer *et al.*, 2019)

Filière	Produit primaire, non transformé[a]	Produit obtenu au cours de transformations			
		Produits de 1re transformation	Produits de 2e transformation	Produits de 3e transformation	Parties inconsommables
Ponte	Œuf en coquille	Ovoproduits		Produits et Plats prêt-à-consommer	Coquille
Viande (bovine, porcine, de volaille, ovine)	Animal sur pied	Carcasse d'animaux, carcasse prête à cuire (volaille)	Pièces de viande avec ou sans os, parties consommées du 5e quartier (abats rouges et, dans une moindre mesure, blancs)		5e quartier de l'animal (cuirs, phanères et abats) à l'exception des abats pour lesquels un marché alimentaire pour l'Homme existe ; os et tendons…
Poisson de pisciculture	Poisson entier	Poisson évidé	Filets et chair de poisson		Tête et peau, squelette, viscères…
Produits laitiers	Lait	Lait standardisé ou écrémé, UHT ou pasteurisé	Produits laitiers transformés (fromage, yaourt, lactoserum[b]…)		

[a] Excluant les opérations de conditionnement non considérées comme transformation.
[b] Le développement important des poudres infantiles ne justifie plus selon nous de considérer le lactosérum comme un sous- ou coproduit dans la mesure où il constitue un ingrédient majeur de ces poudres, et ce bien que sa destination en alimentation du bétail reste majoritaire (Mollea *et al.*, 2013).

<u>Pertes alimentaires entre le moment où la production primaire est prête à être abattue (filière viande), traite (filière laitière), ramassée (œufs) et pêchée (poissons) et la 2ème transformation</u>.

Des données quantitatives ne sont en effet disponibles que pour les stades de la production primaire et la 1ère et la 2ème transformation, la 3ème transformation (produits et plats prêts à consommer) souffre du manque de données sur les pertes à la fabrication à ce stade (Redlingshofer *et al.*, 2015).

Les causes de retraits de la chaîne alimentaire, variées, sont résumées dans le tableau ci-dessous qui donne un inventaire des causes sans quantification de leur importance respective. Il faut noter que, selon la destination de ces retraits, ceux-ci ne donneront pas nécessairement lieu à des pertes alimentaires (cas du lait de vache retiré de la consommation humaine directe, mais valorisé dans l'alimentation des veaux et qui revient après conversion par l'animal à la consommation humaine, par exemple).

Tableau 6.3 : Causes des retraits par filière ou groupes de filière (Redlingshofer *et al.*, 2019)

	Viande et poisson	Lait	Œuf
Conditions météorologiques	Surmortalité en transport (en cas de températures extrêmes)	n.p.	n.p.
Bioagresseurs, maladies, prédateurs	Prédation par la faune sauvage (en élevage plein-air) ou les oiseaux (poissons) Parasitisme (d'où saisies sanitaires)	Mammites	n.p.
Outils, matériel, équipement de récolte	Problème de maîtrise de la chaîne du froid, hygiène	n.p.	Œufs restant dans la litière (si accès au sol)
Cahier des charges, normes techniques et commerciales	Aspects visuels, DLC Carcasses hors gabarit (poulet)	Nombre de cellules (lait), DLC (produits laitiers)	Œufs trop sales, DCR
Normes réglementaires sanitaires	Sensibilité aux EST (ruminants) Animal jugé inapte à l'abattage ou saisie de viande dangereuse post-abattage	Résidus d'antibiotiques	Présence de salmonelles (impact très marginal)
Manipulations, transport, nettoyage, stockage, procédés de transformation	Hématomes, fractures, défaut de saignée (d'où saisies sanitaires) Absence d'équipements permettant : *i)* la séparation mécanique de viande (ex : poulet) ou la récupération de fractions valorisables du 5e quartier (ex : sang de porc) ; *ii)* la récupération de sous-produits C3 utilisables en alimentation du bétail après traitement	Nettoyage des équipements de transformation ; Non valorisation de fractions utilisables en alimentation du bétail (ex : lactosérum)	Bris des œufs
Habitudes et pratiques alimentaires	Désintérêt pour les morceaux moins nobles (abats) et moins rapides à cuisiner/préparer	n.p.	n.p.

n.p. : non pertinent ; EST : Encéphalopathies spongiformes transmissibles ; DLC : date limite de consommation ; DCR : date de consommation recommandée ; C3 : catégorie de sous-produits animaux valorisable en alimentation animale, en particulier pour l'alimentation des animaux familiers et des poissons (elle comporte des sous-produits issus d'animaux sains abattus en abattoirs et déclarés propres à la consommation humaine) (Dourmad *et al.*, 2019).

Produits laitiers et œufs

Pour les produits laitiers, un bilan précis est difficile à établir du fait du caractère fragmentaire des données disponibles et de la grande diversité des produits et de leurs procédés d'obtention, lesquels induisent des retraits spécifiques. Un bilan global nécessiterait donc de déterminer les taux de retrait associés à chaque grand type de produit laitier, puis de pondérer ces taux par l'importance relative de chaque grand type de produit. Deux types de fabrication seulement ayant pu être documentées (yaourt et fromage), les proportions mentionnées au tableau ci-dessous doivent être considérées comme des ordres de grandeur (avec des variations potentiellement importantes pour d'autres types de fabrication).

Tableau 6.4 : Quantification des retraits de la chaîne alimentaire en filières lait et œuf (Redlingshofer *et al.*, 2019).

Stades de la filière	Filière lait		Filière œuf	
	Origine des retraits	Ampleur (approx.) en %	Origine des retraits	Ampleur (approx.) en %
Production	Résidus d'antibiotiques	3,2	Déclassement en œufs ICH	0,5
Transformation	Phases de pousse et de nettoyage (tous produits laitiers) Retraits spécifiques par type de produit (ex : conditionnement, élimination de lactosérum…)	2,4* à 5,0** env.	Déclassement ICH et bris des œufs Phases de pousse et de nettoyage (ovoproduits)	4,0

ICH = Impropres à la consommation humaine ; * cas de la production fromagère : borne minimale (soit 1 %) de la fourchette de pertes en phase de pousse/nettoyage + élimination de lactosérum valorisable (soit 1,4 %) ; ** cas du yaourt : borne maximale (soit 3 %) de la fourchette de pertes en phase de pousse/nettoyage + retraits au conditionnement (soit 2 %).

Viandes et poissons

Contrairement aux cas du lait et de l'œuf, la proportion de produits réellement consommables par l'homme en filières viandes et poissons varie considérablement selon les fractions objet des retraits (de 100% pour les abats à 0% pour des plumes).

Les retraits considérés comme consommables dans les filières viandes et poissons :

- les abats rouges (exemple : foie) et blancs (exenple : ris) ainsi que les parties consommables du 5ème quartier (p. ex. : sang de porc) dont le total représente de 2 à 6% du poids vif selon les espèces ;
- les matériels à risque spécifiés issus de ruminants (exemple : cervelle), lesquels représentent 2,5% du poids vif chez les bovins ;
- la fraction potentiellement consommable de pièces de carcasses de petit format (exemple : viande séparée mécaniquement à partir de cous de poulets), en cas de découpe de celles-ci.

Les retraits considérés comme inconsommables comprennent les fractions inconsommables du 5ème quartier (exemple : contenus digestifs, plumes) et celles de la carcasse après découpe (p. ex. : os). Leur proportion varie de 16 à 44% du poids vif selon les espèces.

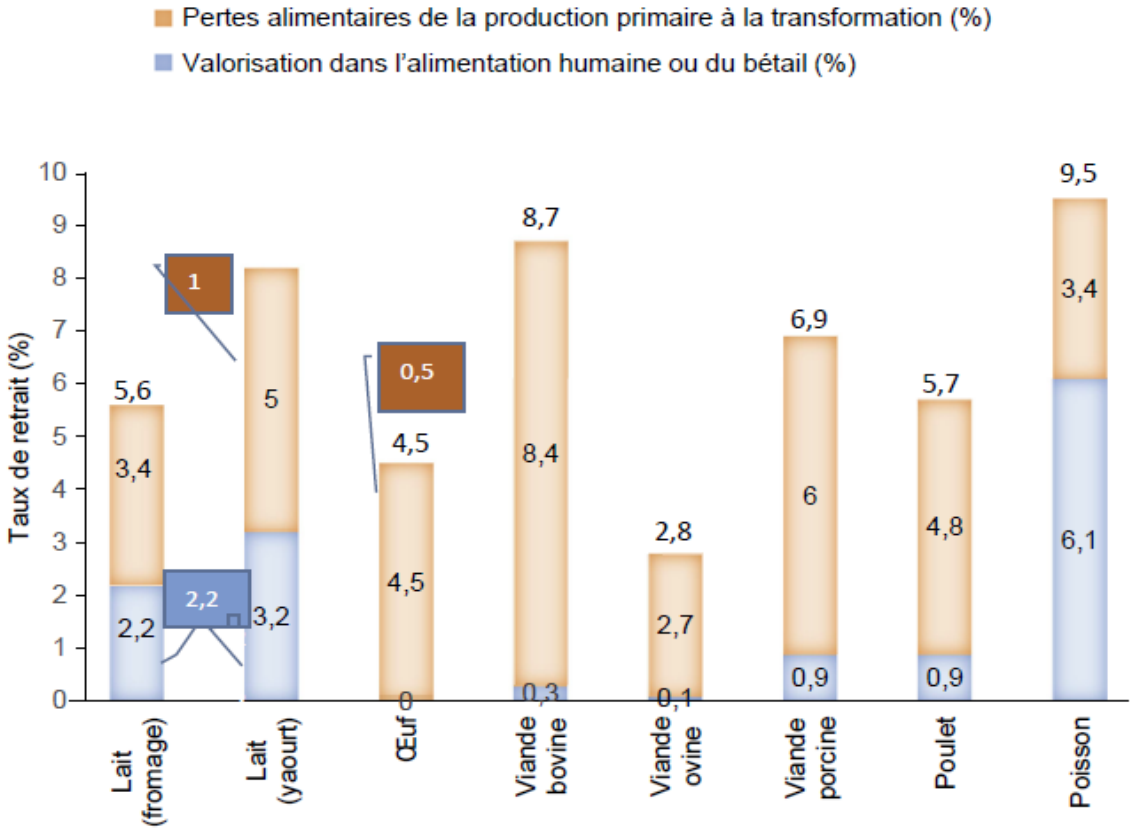
Les retraits pour les filières viandes au niveau du stade abattage/découpe sont réalisés principalement pour des raisons sanitaires (notamment du fait de la sensibilité des ruminants aux EST et du parasitisme en élevage) et du fait de la consommation seulement partielle de morceaux moins nobles, comme les abats (Redlingshofer *et al.*, 2015).

La valorisation des retraits en alimentation du bétail est largement pratiquée par la filière piscicole (autorisation d'utiliser les retraits de transformation de poissons en alimentation des animaux terrestres). Par ailleurs, l'utilisation des protéines animales transformées (PAT) issues des porcs et volailles a à nouveau été autorisée depuis juin 2013 dans l'alimentation des poissons. Par contre, pour les filières viandes, du fait du *feed ban* (restriction de l'utilisation de protéines animales dans l'alimentation des animaux d'élevage suite à la crise de l'ESB), les sous-produits issus d'animaux sains (catégorie C3) sont actuellement essentiellement valorisés à travers le pet food, et entrent donc dans la catégorie des pertes alimentaires (Redlingshofer *et al.*, 2015). Le bilan des pertes alimentaires pourrait ainsi être amélioré si certaines PAT issues des sous-produits de catégorie C3 des filières viande étaient à nouveau intégrées aux aliments du bétail, mais l'utilisation des PAT dans l'alimentation des animaux de rente reste un sujet très controversé (suite aux crises de l'ESB) et pourrait nuire à la qualité d'image des produits animaux.

Au final, les taux de pertes alimentaires, selon la définition de l'étude Inra, varient entre 3 et 8% environ (de 3% pour la viande ovine à 8% pour la viande bovine), en lien avec les particularités d'espèces (sensibilité aux encéphalopathies spongiformes transmissibles, notamment). Globalement, le stade de la production primaire (jusqu'à la sortie de la ferme) est peu concerné, sauf pour la filière laitière (2,2% des pertes alimentaires). Cette filière pratique la valorisation du lait en alimentation des veaux et réduit ainsi les pertes alimentaires, mais elle affiche cependant un taux de retrait pour raisons sanitaires élevé par rapport aux autres filières animales. Excepté pour les filières lait et poisson, la valorisation par des animaux de rente de denrées retirées de la consommation humaine joue un rôle relativement modeste dans la réduction des pertes alimentaires au stade de la production primaire et de la transformation. Les pertes alimentaires sont en effet majoritairement recyclées en pet food, sauf dans la filière viande de ruminants où une partie importante est incinérée.

Figure 6.11 : Taux de retrait[a], valorisation en alimentation humaine ou du bétail, et pertes alimentaires dans les filières animales aux stades de la production primaire et de la transformation (Redlingshofer *et al.*, 2019).

Les taux de retrait sont affichés par les chiffres isolés au-dessus des barres. Les drapeaux indiquent la contribution de la production primaire aux taux de pertes (rouge) et de valorisation dans l'alimentation humaine ou du bétail (bleu). L'absence de drapeau veut dire que la production n'y contribue que de façon marginale, n'a jamais été quantifiée voire mentionnée. En filière laitière, nous présentons les deux exemples traités, à savoir fromage et yaourt (voir § 2.2.a).



[a] Rapportés aux quantités de lait, de contenu d'œuf ou de poids vif animal produit.

Pertes alimentaires au moment de la distribution

Dans l'étude des groupes Filière de l'Inra, les pertes à la distribution n'ont pu être abordées que très partiellement, et essentiellement sur le plan qualitatif, en raison du caractère confidentiel des données.

Produits laitiers et œuf

Les retraits pour dépassement de la date limite de consommation (DLC) ou de la date limite d'utilisation optimale (DLUO) sont estimés à moins de 1% pour la filière lait, et ils sont présumés faibles pour les œufs coquille (Redlingshofer *et al.*, 2015).

Viandes et poissons

Les retraits à la distribution n'ont pas été quantifiés par des bilans matière, mais estimés à travers des bilans globaux en valeur : 5 à 6% pour le rayon viandes et 10 à 12% pour le rayon poisson (y compris pêche) (Redlingshofer *et al.*, 2015).

6.4.4.3. Leviers pour réduire les pertes et gaspillages

La quantification des pertes et gaspillages alimentaires est encore un défi méthodologique. Elle est difficile, car les données sont rares et difficiles d'accès, en particulier aux étapes de la distribution et de la consommation, et que l'on manque de cadre

d'analyse et de définition partagés (Redlingshofer *et al.*, 2019). Les publications scientifiques pointent la nécessité de s'accorder sur les définitions et les méthodes d'évaluation pour pouvoir quantifier ces pertes et gaspillages (Esnouf et Huyghe, 2015 ; Melchior et Garot, 2019; Redlingshofer *et al.*, 2019), pré-requis indispensable pour orienter les actions à mettre en place et évaluer leurs effets. La mise en place d'une quantification des pertes et gaspillages alimentaires au niveau d'une entreprise peut également rencontrer des freins (crainte pour l'image, inquiétudes des salariés - surveillance, mise en cause du facteur humain) (Melchior et Garot, 2019). Enfin, une grande partie du gaspillage intervenant au foyer, il est essentiel de recueillir des données auprès de foyers de profils variés et de les accompagner vers une réduction des pertes et gaspillages.

Ces difficultés méthodologiques n'empêchent cependant pas l'identification de leviers en vue de leur réduction. Ces leviers sont d'ordre technique (p. ex., santé animale, nouveaux produits, taille des portions), organisationnels, règlementaires et de politiques publiques (p. ex., lutte contre le gaspillage, date limite de consommation, *feed ban*) et au niveau du comportement des consommateurs et des normes sociales (culture de l'alimentation, valeur des aliments…) et aussi des avancées biotechniques pour un recyclage et une valorisation optimales.

Aux étapes de transformation primaire et secondaire

Les pertes alimentaires de lait de vache sont essentiellement générées par les traitements médicamenteux de lutte contre les mammites qui conduisent à retirer de la consommation humaine directe 3,2% du lait produit. La lutte contre les mammites, déjà considérée comme essentielle pour la performance économique des exploitations bovins lait, constitue donc un levier important pour la réduction des pertes alimentaires dans cette filière ; et ce d'autant plus qu'il pourrait y avoir un durcissement de la réglementation concernant l'alimentation animale (la pratique consistant à distribuer aux veaux du lait contenant des antibiotiques pourrait être interdite à terme, suite à des recommandations récentes de la Commission européenne pour limiter le risque d'antibio-résistance) (Redlingshofer *et al.*, 2019). Dans les filières viandes, les leviers à ce stade sont la réduction des saisies partielles en abattoir résultant du parasitisme ou des lésions corporelles des animaux ainsi que des défauts anatomiques (hématomes et blessures ; fractures en filière avicole) (Redlingshofer *et al.*, 2019).

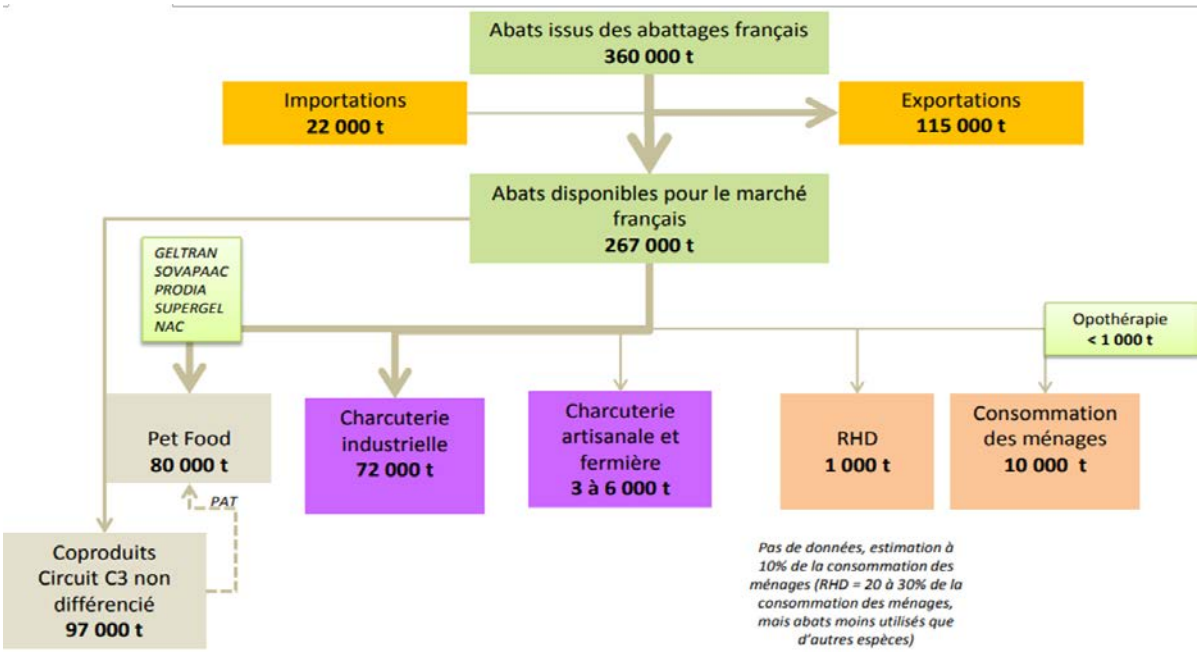
Les leviers à l'étape de transformation résident dans la recherche de nouvelles voies de valorisation, une évolution de la réglementation mais aussi des investissements dans de nouvelles machines plus économes en déchets. Pour ce dernier aspect, Melchior et Garot (2019) citent l'exemple d'une conserverie de poisson ayant pu réduire ses deux principales sources de gaspillage (chutes au sol en usine et pertes lors des levées de filets) en investissant dans une machine d'extraction de chair afin de limiter les pertes au parage des maquereaux.

6.4.4.4. Valorisation de la biomasse animale

Biomasse animale terrestre

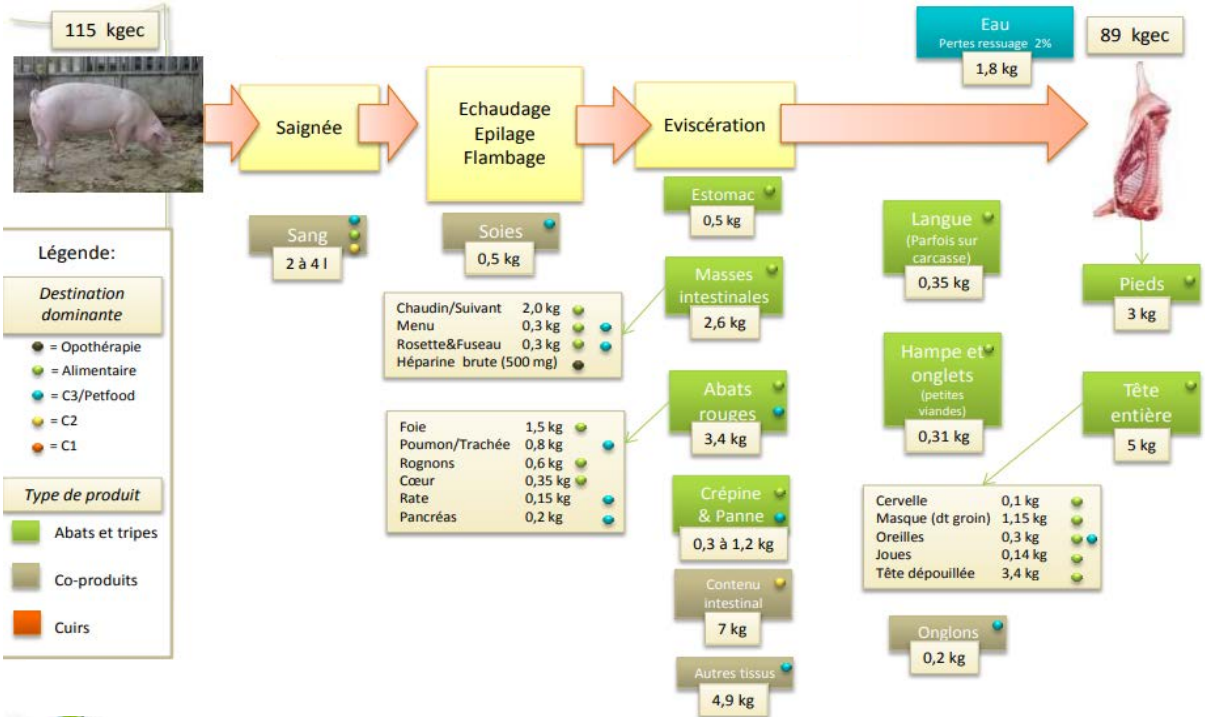
Les productions animales et l'industrie de la viande génèrent des volumes importants de coproduits, évalués entre 40% et 60% en fonction des filières considérées. Or, les coproduits issus de l'abattage des animaux de rente représentent une source de protéines ayant des caractéristiques variées pour des applications en biomédecine (pansements hémostatiques), biomatériaux, pharmaceutique et dans le domaine alimentaire (Ferraro *et al.*, 2016).

Figure 6.12 : Voies de valorisation actuelles des sous-produits de porc. Source : FranceAgriMer (2013) – C3 : Coproduits de classe 3 ; PAT : Protéines animales transformées ; t : tonne



Parmi les voies de valorisation actuellement étudiées, on retrouve des applications dans les technologies alimentaires, les énergies renouvelables, les fertilisants, la pharmacie ou encore la chimie. Par exemple, les différentes fractions cellulaires du sang (globules rouges, blancs et plaquettes) peuvent être utilisées comme rehausseur de couleur pour la fabrication de saucisses. Néanmoins, la couleur foncée de l'hémoglobine rend cette application limitée dans l'alimentation en raison de la présence d'effets sensoriels et sanitaires indésirables (Nollet et Toldra, 2011). Le plus souvent, les sous-produits animaux sont destinés à l'alimentation pour animaux de compagnie puisqu'ils sont source de graisses et de protéines de haute qualité (Hamilton, 2002). La biomasse animale peut également être utilisée pour la réalisation de biocarburants grâce à une réaction d'estérification des graisses avec un alcool de faible poids moléculaire (Baladincz et Hancsok, 2015 ; Fadhil, 2013 ; Rad *et al.*, 2018). De plus, Jayathilakan *et al.* (2012) ont étudié l'utilisation de la peau de porc pour le traitement des brûlures. La pyrolyse et la combustion d'os peuvent également mener à la génération de fertilisants écoresponsables (Bujak, 2015 ; Cascarosa *et al.*, 2013 ; Haddadi *et al.*, 2018). Les graisses animales sont aussi utilisées dans l'industrie chimique pour la fabrication de bioplastiques (Tsang *et al.*, 2019). En résumé, l'innovation vise en permanence à créer de la valeur ajoutée et à développer de nouvelles applications pour la valorisation des produits dérivés de la filière porcine (Toldra *et al.*, 2016).

Figure 6.13 : Gisement des coproduits et abats de porc lors de l'abattage. Source : FranceAgriMer (2013) – C1, C2 et C3 : coproduits de classe 1, 2 et 3 ; Kgec : kilogramme équivalent carcasse.



Par ailleurs, les coproduits animaux de type abats (foie, cœur, poumon, intestin…) ainsi que certains bas morceaux ou produits qui ne seraient plus commercialisables (dégradation de leur couleur) ont de par leur richesse en protéines un intérêt nutritionnel et technologique (peptides bioactifs anti diabétique, anti oxydant…) (Bechaux *et al.*, 2019).

À ce jour, la production de valeur des filières animales est basée principalement sur la production de viande. Peu d'attention est portée aux coproduits (50%), qui pourraient être beaucoup mieux valorisés. À titre d'exemple, en termes d'empreintes écologiques, il faut savoir que les boyaux de porc de France mais aussi de tous les autres pays sont exportés en Chine, nettoyés et renvoyés en France, en Europe, aux USA pour l'industrie de la charcuterie. Les besoins de recherche sont liés aux procédés d'extraction à mettre en œuvre, pour tenir compte de la variabilité des productions (filière allaitante, filière bio…) qui affecte la composition initiale des coproduits. L'accompagnement des filières de production jusqu'à la transformation est un enjeu de bio économie et de relocalisation des activités sur le territoire. Un des enjeux est contribuer à la durabilité de la filière des produits animaux à travers la valorisation des coproduits et sous-produits représentant le cinquième quartier (Commission européenne, 2009a) et jusqu'à 50% du poids des animaux destinés à la consommation humaine.

Des opportunités existent pour créer de la valeur à partir de la biomasse animale encore peu exploitées, à savoir le collagène, l'élastine et la kératine. Les scléroprotéines ou protéines fibreuses possèdent des structures qui leur confèrent des propriétés de résistance (à la traction, au pH, à la température...) et de rigidité (os, tendons, tissu conjonctif...), équivalentes à celles des celluloses et hémicelluloses du règne végétal. De plus, elles renferment des séquences de peptides bioactifs. Enfin, les os renferment également des minéraux comme le calcium ou le phosphore ayant sans contexte un intérêt agronomique. Des travaux sur l'os bovin ont montré que l'âge de l'animal et l'anatomie modulent l'extractibilité du collagène et des minéraux (calcium et phosphore). Avec le procédé de séchage, on génère des structures tridimensionnelles d'assemblage des molécules de collagène en fibrilles ou en capsules pour des applications vers les biomatériaux biosourcés (Ferraro *et al.*, 2017).

<u>Biomasse animale marine</u>

Les sous-produits de l'industrie du poisson peuvent représenter jusqu'à 75% des captures en fonction des processus de préparation post pêche ou industriels. La gestion adéquate des déchets et des sous-produits de la transformation du poisson est l'un des enjeux majeurs que doit affronter l'industrie de la pêche car cela entraine à la fois une perte économique et des problèmes environnementaux.

La revue de Rustad *et al.* (2011) offre un panorama des pistes de valorisation de ces sous-produits ; notamment des alternatives aux procédés en cours actuellement tels que l'ensilage, la farine de poisson et le poisson haché. Comme pour la biomasse animale terrestre, il est nécessaire de s'intéresser aux différentes fractions de sous-produits telles que le sang de poisson, les lipides marins, les acides gras n-3, les fractions de protéines de poisson et les composants bioactifs ayant un potentiel nutraceutique, à savoir des antioxydants et des peptides bioactifs. Cette espèce de cracking de la biomasse animale devrait générer des produits dérivés de haute valeur ajoutée tels que les enzymes, les minéraux et d'autres substances bioactives, notamment l'hydroxyapatite, le phosphore, la taurine et la créatine.

La mise au point de plusieurs procédés permettant de récupérer des biomolécules à partir de sous-produits de poisson est la pierre angulaire d'un tel dispositif. L'hydrolyse des protéines est un moyen efficace d'ajouter de la valeur aux protéines provenant des déchets de poisson. Les hydrolysats de protéines améliorent les propriétés fonctionnelles et permettent la libération de peptides ayant des activités biologiques telles qu'antioxydant, antimicrobien, antihypertenseur, anti-inflammatoire ou anti hyper glycémique.

Enfin, il est nécessaire de disposer de technologies permettant de conserver des sous-produits de bonne qualité et des processus simples permettant de produire des produits en vrac en vue de leur raffinage ultérieur. Ce qui en d'autres termes nécessite de revisiter l'ensemble de la chaine de production et ses ramifications.

Tableau 6.5 : Le tableau suivant résume les principaux composants présents dans les sous-produits de la mer (en anglais).

Proteins	Lipids	Other compounds
Mince	Marine oils	Calcium
Surimi	Omega-3 fatty acids: EPA, DHA	Taurine
Fish protein isolates	Phospholipids	Colours = astaxanthin
Thermostable dispersions	Vitamins	Bioactive compounds
Gelatin/collagen	Cholesterols	
Enzymes	Squalene	
Fish protein hydrolysates		
Bioactive peptides		
Protamines		

D'un point de vue nutritionnel, les œufs de poissons et les ovaires constituent un des sous-produits de l'industrie de la pêche particulièrement intéressant pour les acides gras n-3 à longue chaine et les phospholipides. Les œufs de hareng, de saumon, de poisson volant contiennent entre 38% et 75% de leurs lipides sous forme de phospholipides avec la phosphatidylcholine comme lipide prédominant.

L'huile de krill est également une source importante de phospholipides. L'huile de krill est devenue de plus en plus populaire en tant que complément alimentaire au cours de la dernière décennie. Elle est extraite du krill de crustacés antarctiques (*Euphausia superba*), une crevette zooplancton et renferme une grande quantité d'AGPI n-3 liés aux phospholipides, en particulier d'EPA et de DHA. L'acide docosahéxaénoïque ou DHA est un acide gras polyinsaturé à longue chaîne n-3, présent en grande quantité dans le cerveau, le DHA joue de nombreux rôles structurels et fonctionnels. Ainsi, il permettrait de ralentir le déclin cognitif avec l'âge. Le DHA a aussi des fonctions non spécifiques qui lui permettraient aussi de contribuer à un effet protecteur contre les maladies neurodégénératives.

Récemment, le développement de produits cosmétiques utilisant des protéines et des peptides dérivés de poissons marins obtenus par hydrolyse chimique ou enzymatique de sous-produits de la mer a augmenté rapidement en raison de leurs bioactivités mais aussi pour la régénération des tissus. Le collagène dérivé de poisson marin a été utilisé pour le développement de produits cosmétiques en raison de ses capacités de réparation de la peau et de régénération des tissus. Les peptides dérivés de poissons marins ont démontré une activité anti photo vieillissement efficace, ce qui renforce leur potentiel élevé en matière de cosmétiques biocompatibles et efficaces.

A ce stade, le statut réglementaire et le potentiel de marché futur doivent être pris en compte, notamment le risque sanitaire car les chairs de poissons sont susceptibles de concentrer le mono méthyle mercure et/ou des polluants organo halogénés.

Enfin, il est nécessaire de disposer de technologies permettant de conserver des sous-produits de bonne qualité et des processus simples permettant de produire des produits en vrac en vue de leur raffinage ultérieur, ce qui en d'autres termes nécessite de revisiter l'ensemble de la chaîne de production et ses ramifications.

6.4.4.5. Evolution de la réglementation et politiques publiques

En février 2016 a été votée la loi Garot qui : i) interdit la destruction des denrées encore consommables (sanction pénale à l'appui, doublée d'une sanction de publicité de l'amende afin d'informer le public) et ii) oblige les moyennes et grandes surfaces de plus de 400 m^2 à établir des conventions de dons des produits encore consommables avec des associations d'aide alimentaire (avec incitation fiscale). Puis, en novembre 2018, la loi Egalim a élargi la loi Garot (ciblée surtout sur le secteur de la distribution) au secteur de la restauration collective publique et privée et des opérateurs industriels de l'agro-alimentaire. Elle oblige la restauration collective à s'inscrire dans une démarche de lutte contre le gaspillage alimentaire (diagnostic, conventionnement de dons alimentaires) et à rendre publics ses engagements anti-gaspillage. Elle oblige également les restaurateurs à fournir des *doggybags* en cas de demande. Plus largement, ces politiques publiques poussent les entreprises à intégrer la lutte contre le gaspillage alimentaire dans leurs politiques de responsabilité sociale (Melchior et Garot, 2019).

Le rapport d'information sur l'évaluation de la loi Garot relève néanmoins des freins réglementaires et pratiques à la mise en œuvre des obligations relatives à cette loi, notamment : i) l'insuffisance de contrôles et de sanctions, ii) la qualité parfois problématique des dons, qui est un point de crispation des relations entre associations caritatives et GMS, iii) un problème structurel d'inadéquation entre l'obligation du don et la difficulté des associations caritatives à gérer l'afflux de don alimentaire. La récente loi Egalim va obliger les GMS à mettre en place un plan de gestion de la qualité du don des denrées alimentaires qui devrait entrer en vigueur en 2020 (Melchior et Garot, 2019). Ce rapport relève également la nécessité d'éclaircir la responsabilité juridique de la denrée donnée, applicable aux éventuels incidents sanitaires pouvant suivre un don alimentaire, car des craintes à cet égard freinent les dons. Il recommande aussi d'étendre le diagnostic obligatoire de lutte contre le gaspillage alimentaire à tous les opérateurs agroalimentaires (et non uniquement à la restauration collective). Il préconise enfin la création d'un fonds national de lutte contre le gaspillage alimentaire qui pourrait soutenir financièrement le recours à des équipes d'audit ayant pour mission d'accompagner les entreprises dans leur politique de lutte contre le gaspillage alimentaire (optimisation des appareils de production, des chaînes logistiques, de la gestion des stocks…), entreprises qui pourraient se voir attribuer un label « anti-gaspi ».

Au-delà de ces mesures de politiques publiques, d'autres leviers techniques et organisationnels existent. Certains industriels travaillent par exemple à *mieux doser les portions*. Ainsi, une entreprise de la viande propose un steak « Petit appétit », avec des portions de 80 g. Le rapport d'information sur l'évaluation de la loi Garot préconise aussi de revoir la granularité du « grammage » des portions dans les établissements scolaires pour mieux correspondre aux besoins physiologiques des enfants (Melchior et Garot, 2019). Dans la restauration, la mise en place de guides de bonnes pratiques (meilleure surveillance de la DLC, diminution du volume des commandes, meilleure gestion des stocks, meilleure valorisation des restes alimentaires et formation du personnel) ont permis de réduire de 10% à 20% des pertes et gaspillages alimentaires dans une expérimentation rapportée par Melchior et Garot (2019). La facilité de mise en œuvre de ces bonnes pratiques dépend de la taille des structures. Par ailleurs, l'*émergence des outils numériques* a permis l'apparition d'initiatives innovantes permettant de mieux répondre à certaines problématiques auparavant difficiles à gérer, notamment pour la gestion de produits proches de la DLC. Ainsi, la grande distribution peut opérer des promotions sur les produits dont la DLC est proche et mettre en place des collectes régulières dans les petits magasins avec de petits volumes. Certaines applications mobiles (p. ex. : *Too good to go*) mettent en relation des consommateurs avec des commerces qui ont des invendus consommables, lesquels sont vendus à moindre coût ; ceux qui ne sont pas achetés sont données à des associations et s'ils ne sont plus consommables, sont proposés à des fermes ou des centres équestres comme aliments pour animaux. Il existe aussi des plateformes de dons en ligne (exemple : GEEV Food, start-up bordelaise créée en 2016) qui permettent de donner et recevoir gratuitement des denrées alimentaires. D'autres services numériques cherchent à réduire le gaspillage alimentaire au niveau des foyers. L'application Frigo Magic propose des recettes de cuisine simples que l'utilisateur peut ajuster aux ingrédients dont il dispose, renversant le paradigme habituel de la recette qui dicte les courses (Melchior et Garot, 2019). Enfin, Redlingshofer *et al.* (2015) évoquent la révision de la réglementation relative aux DLC (produits frais) et dates de durabilité minimum (DDM, qui ont remplacé les dates limites d'utilisation optimale sur les autres types de produits). La DLC indique une péremption imminente des produits et un risque pour les consommateurs, alors que la DDM indique un risque de diminution de la

qualité organoleptique, mais ne réfère aucunement à son caractère consommable. Ces différences ne sont pas toujours claires pour les consommateurs, ce qui peut induire du gaspillage par méconnaissance, d'où l'intérêt de mener des campagnes de sensibilisation à cet égard. Melchior et Garot (2019) proposent, pour plus de clarté, de remplacer la DDM par la mention 'meilleur avant'. Certains industriels militent également pour l'allongement des DLC pour le frais et la suppression des DDM pour les autres produits (Le Monde, 2019[37]).

Cependant, beaucoup reste encore à faire à tous les stades de la chaîne alimentaire. Les DLC pourraient ainsi être incluses dans les codes-barres pour : i) permettre aux industriels et aux distributeurs de mieux maîtriser leurs stocks et faciliter leurs pratiques de « stickage », ii) faciliter la transparence et la collecte des données à des fins de lutte contre le gaspillage alimentaire, et iii) alerter les consommateurs quand l'échéance approche, à l'aide d'applications numériques. Cependant, le rapport d'information sur l'évaluation de la loi relative à la lutte contre le gaspillage alimentaire souligne que les relations entre les acteurs engagés ne sont guère mises en cohérence à l'échelle locale, chacun restant le plus souvent dans son champ de responsabilité et de compétences (Melchior et Garot, 2019). Par ailleurs, au-delà des leviers techniques, organisationnels et règlementaires, certains sociologues pensent qu'il est nécessaire de « rebâtir une vraie culture de l'alimentation ». Ainsi, Birlouez (2019) souligne que, si le gaspillage alimentaire a toujours existé, ce n'est qu'à partir des Trente glorieuses qu'il est devenu un phénomène de masse. Auparavant, l'alimentation était régie par une certaine morale économique qui poussait à faire preuve de frugalité, les aliments ayant également une dimension sacrée. Avec le passage de la pénurie à l'abondance, puis l'ouverture des premières grandes surfaces dans les années 1960, la nourriture est devenue un bien de consommation courant, standardisé et de moindre valeur. La part des dépenses des ménages, consacrée à l'alimentation, a ainsi fortement baissé, passant de 31% en 1959 à 17% en 2015. Birlouez (2019) souligne que l'accroissement du gaspillage est lié à la moindre valeur donnée aux aliments. La standardisation et la mondialisation, ainsi que l'abandon progressif du rituel du repas partagé à plusieurs accentue encore ce phénomène, puisque l'on ne connait plus l'origine et l'histoire des produits (d'où viennent-ils, qui les a fabriqués et comment) et que l'on a moins à craindre du regard social et donc moins de scrupules à jeter les aliments. Il est intéressant de noter qu'au niveau de la distribution, la loi Garot, en interdisant la destruction volontaire par les GMS de denrées encore consommables (interdiction de la javellisation, par exemple), a changé ce rapport à l'alimentation, en posant le principe selon lequel la nourriture n'est pas un bien comme les autres dont son propriétaire peut disposer à loisir et qu'il devient répréhensible de le détruire volontairement (Melchior et Garot, 2019). Ce dernier rapport conclut à la nécessité, plutôt que de rattraper les dérives d'une société de surconsommation, d'éviter ces dérives le plus en amont possible. Au niveau des consommateurs/citoyens, qui sont les premiers gaspilleurs, rebâtir une vraie culture de l'alimentation pourrait passer par plusieurs voies complémentaires : i) améliorer l'éducation à l'alimentation et à la lutte contre le gaspillage alimentaire dans l'enseignement scolaire (prévu dans les lois Garot et Egalim) (Melchior et Garot, 2019), ii) informer autour de l'histoire des produits (savoir d'où ils viennent, qui les a fabriqués et comment), ii) ré-apprendre la cuisine et iii) redonner aux consommateurs le plaisir et l'envie de partager un repas, le repas étant un acte social, un moyen d'entrer en relation avec les autres et d'affirmer son identité (Birlouez, 2019).

Pour limiter le gaspillage, il pourrait être envisagé, en Europe, de réintroduire les farines animales dans l'alimentation des animaux de rente mais cela fait l'objet d'une controverse importante. En effet, suite à la crise de la vache folle ou ESB (pour encéphalite spongiforme bovine), la France a interdit en 1990 l'utilisation des farines animales dans l'alimentation des bovins et des ovins et en 2000 dans l'alimentation des porcs, volailles, poissons et animaux domestiques (Le Pape *et al.*, 2004). Il a fallu attendre 2001 pour l'Union européenne. À l'époque, les farines animales pouvaient être issues de tous types de déchets d'animaux sains mais aussi malades ou morts (Morin-Desailly, 2013). Le règlement CE n°1069/2009 du 21 octobre 2009 (Commission européenne, 2009a) a établi une classification entre sous-produits animaux (cadavres et parties d'animaux non destinés à la consommation humaine) avec les matières dites de catégorie 1, qui recouvre les animaux malades et les sous-produits d'animaux à risques, potentiellement porteurs de maladie, les matières de catégorie 3, qui recouvre les sous-produits de l'abattage d'animaux sains non destinés à la consommation pour des raisons commerciales (abats, cous, pattes…), ainsi que les sous-produits non consommables (plumes, carcasses, cornes, sabots…). Les matières de catégorie 2 sont celles qui sont non classées dans les deux précédentes. Les matières de catégorie 3 peuvent être utilisées pour la production de protéines, qu'il s'agisse de PAT ou d'autres matières premières susceptibles – ou non – d'être utilisées pour l'alimentation animale (protéines hydrolysées, gélatines, dérivés de cartilages, sang, ...). Le règlement définit les modes de transformation, d'entreposage et d'importation. Il définit également quelques cas d'interdiction, notamment « *l'alimentation d'une espèce à l'aide de PAT issues de cadavres et de parties de cadavres d'animaux de la même espèce* ». En France, ces sous-produits représentent trois millions de tonnes par an, dont deux millions sont de catégorie 3. Après traitement des sous-

37 Le Monde (2019). L'antigaspi s'invite à table. Le Monde du 01/10/2019

produits, les PAT finales représentent 700 000 tonnes. Le règlement n°56/2013 de la Commission, du 16 janvier 2013 (Commission européenne, 2013), a autorisé à nouveau l'utilisation des farines animales issues uniquement de porcs et volailles dans l'alimentation des poissons. Ce règlement s'applique depuis le 1er juin 2013. Pour prendre cette décision, la Commission s'est appuyée sur deux séries d'arguments : d'une part des arguments techniques (diminution considérable de la prévalence de la maladie) et scientifiques (le prion, agent pathogène responsable des EST est seulement présent chez les mammifères). Le poisson et la volaille ne sont pas sujets aux EST. Le porc est un cas à part, car des essais de laboratoires au cours desquels de grandes quantités de prions ont été injectées dans le système nerveux n'ont jamais conduit au développement de l'EST chez les porcs ; par ailleurs, aucun cas d'EST n'a été détecté chez le porc à ce jour (Morin-Desailly, 2013). En deuxième lieu, il y a des arguments économiques. Dans le meilleur des cas, les farines animales sont utilisées pour produire des engrais, du compost ou des combustibles pour les cimentiers. Or, ces farines, en particulier la fraction la plus utile que sont les PAT, représentent une source de protéines, qui pourrait être valorisée dans l'alimentation animale. Leur utilisation raisonnée, contrôlée, permettrait selon la Commission de réduire la dépendance de l'Union européenne en protéines végétales (Morin-Desailly, 2013). L'Agence de santé des aliments a publié en 2009 et 2011 des avis défavorables dans l'attente de conditions contraignantes supplémentaires « *pour garantir une sécurité alimentaire totale »,* tandis que le CNA (2011) a donné son aval. Dans ces rapports, le mode d'obtention des farines animales, leurs caractéristiques et leur intérêt pour l'alimentation des différentes filières animales sont parfaitement décrits. Les conséquences de l'arrêt de leur utilisation sont également détaillées (utilisation de matières premières exclusivement végétales, incorporation d'huile de palme ou de coprah pour rééquilibrer l'apport en acides gras saturés, utilisation accrue de tourteau de soja, de phosphore et de calcium d'origine minérale, d'acides aminés de synthèse, de phytases et de carbohydrases, diminution de la diversité des matières premières dans les formules alimentaires). Après quelques ajustements, les substitutions de matières premières dans les formules alimentaires n'ont pas trop impacté la qualité des carcasses et les qualités organoleptique, technologique et nutritionnelle des produits animaux à l'exception de la composition en acides gras, la fraction n-6 étant plus élevée. Les récentes évolutions de la règlementation européenne ont relancé la controverse sur l'utilisation des farines animales dans l'alimentation des animaux de rente. Cette controverse est parfaitement décrite dans le document mis en ligne sur internet en 2014 par l'Ecole des Mines ParisTech (2014). Celui-ci et le rapport du CNA (2011) présentent les différents acteurs qui se sont prononcés en faveur ou non d'une réintroduction des farines animales, et les arguments mis en avant : les producteurs de farines et graisses animales mettent en avant la richesse nutritive de celles-ci, le Parlement européen s'appuie sur le déficit de l'Union auropéenne en protéines pour animaux, la Commission de l'environnement justifie sa prise de position par la dimension écologique des PAT, et certains pisciculteurs pensent aux bénéfices qu'ils pourraient faire. Cependant, tous ces arguments n'arrivent qu'au second plan, l'aspect sanitaire étant le plus important et restant la préoccupation majeure des consommateurs mais également des scientifiques comme l'atteste la publication récente de Huor *et al.* (2019) démontrant la possibilité de contaminer des bovins avec des prions spécifiques de petits ruminants. La réintroduction des farines animales dans l'alimentation des animaux de rente détériorerait clairement la qualité d'image des produits animaux.

6.5. Conclusions

Il existe actuellement une forte pression du consommateur pour une alimentation en produits animaux sains, de qualité et prenant en compte le bien-être animal. La prise en compte de la dimension éthique et environnementale dans les filières animales, a commencé à se traduire par des évolutions fortes afin de répondre aux demandes sociétales.

Des solutions et/ou innovations seraient possibles comme il a été exposé et explicité dans ce chapitre, qu'il s'agisse de pistes d'évolution technique à toutes les étapes de la production et des transformations des produits animaux, depuis le sexage *in ovo*, une alimentation des animaux pour une meilleure qualité nutritionnelle, des procédés alternatifs efficients, à disposition de chacun dans un futur proche comme l'impression 3D, ou bien le développement d'applications pour téléphone pour informer le consommateur ou une diversification de l'offre. Quelles que soient les innovations, le point crucial concerne l'acceptabilité de ces évolutions par les differents acteurs de cette chaîne qui va de la production à la consommation via les transformations. À ce jour, il est trop tôt pour se faire une opinion définitive sur l'adoption de sources protéiques considérées comme alternatives à la consommation de viande et poisson. L'attachement au produit viande constitue un facteur majeur de résistance au changement.

Pour accompagner ces évolutions, certes les politiques publiques constituent un maillon d'appui mais à portée souvent modeste. En effet, si les analyses des politiques publiques montrent qu'elles ont des effets, leurs portées ne sont pas toujours celles escomptées. Et la dimension prix reste essentielle : les alternatives ne s'imposeront durablement (hors niches) que si

leur prix est jugé comme acceptable par les consommateurs (dont ceux dont le pouvoir d'achat est plus faible). Le facteur prix reste et restera essentiel dans le domaine alimentaire.

Agir au niveau du consommateur, le sensibiliser sur la relation entre l'alimentation et la santé, par des campagnes d'information et d'éducation concernant les recommandations nutritionnelles consitue un relais essentiel. Une meilleure connaissance de ses attentes et une offre plus vertueuse, que ce soit en termes de produits sous SIQO, de modes d'emballage (polymères biosourcés), de composition plus saine au travers une reformulation des produits mis sur le marché, vont de pair.

Le levier de la reformulation correspondant à une réduction (p. ex. : sel, gras) voire la suppression de certains composés néoformés dont les acides gras trans, ou à l'inverse une augmentation (p. ex. : fibres) de certaines composantes des aliments revêt un intérêt certain pour des aliments plus sûrs et plus sains.

Garantir la sécurité /inoccuité de certains aliments nécessite des efforts de recherche pour combler le « gap » entre des données d'épidémiologie, à gros grains, et des approches expérimentales sur une ou plusieurs molécules cibles. Il est à noter que « les allers et retours » entre les approches épidémiologiques et expérimentales ont permis de passer de l'association positive entre une catégorie de produit carné et le risque de cancer à l'identification d'un mécanisme impliquant un nutriment, d'étudier différents produits de cette catégorie et, sur cette base d'identifier des leviers de préventions basés sur la modification du mode de consommation ou du mode de production. De ce fait, pour évaluer l'impact de l'ensemble des attributs de la qualité des produits animaux, il parait donc nécessaire de soutenir l'amélioration de la précision des données collectées en amont des études épidémiologiques. Toutefois, comme le niveau de précision nécessaire ne sera pas atteignable pour évaluer l'impact santé de toutes les qualités, les approches multidisciplinaires de cette question devront être encouragées.

La sécurité microbiologique atteinte aujourd'hui est très élevée, mais elle s'est faite sans prendre en considération les impacts environnementaux et les risques de contamination chimique associés aux matériaux. Il y a un besoin de plus d'intégrations. Dans une logique d'éco-efficience, les circuits courts combinés à des emballages optimisés pour des traitements thermiques brefs, un réchauffage et un refroidissement rapides devraient ouvrir le champ à de nouveaux produits peu formulés et stables aux températures positives. Il faut relancer également la recherche de procédés alternatifs aux traitements thermiques traditionnels potentiellement plus efficients.

Enfin, les filières de production et de transformation de produits animaux comme beaucoup d'autres filières alimentaires sont source de gaspillage et génèrent des co-produits. Dorénavant, lutter contre le gaspillage est une priorité et des actions devraient être entreprises en ce sens :

- prévenir le gaspillage (éducation à l'école, information des consommateurs, sensibilisation des professionnels, audits des unités de production, de distribution, de restauration…) ;
- utilisation des invendus propres à la consommation humaine par la transformation ou le don ;
- valorisation à travers l'alimentation animale et autres débouchés ;
- utilisation à des fins de compost pour l'agriculture ou valorisation énergétique, notamment par la méthanisation.

Enfin, il est plus qu'urgent de reconsidérer la production de « valeur » des filières animales, qui est basée principalement sur la production de viande. Peu d'attention est portée aux coproduits (50%), qui pourraient être beaucoup mieux valorisés. Les besoins de recherche sont liés aux procédés d'extraction à mettre en œuvre, pour tenir compte de la variabilité des productions (filière allaitante, filière bio…) qui impacte la composition initiale des coproduits. L'accompagnement des filières de production jusqu'à la transformation est un enjeu de bio économie et de relocalisation des activités sur le territoire. Un des enjeux est contribuer à la durabilité de la filière des produits animaux à travers la valorisation des coproduits et sous-produits représentant le cinquième quartier (Règlement EU n°1069/2009 (Commission européenne, 2009a)) et jusqu'à 50% du poids des animaux destinés à la consommation humaine.

À signaler, finalement, que dans le choix des leviers à mettre en place il y aura probablement des compromis à trouver/arbitrages à faire entre le potentiel de réduction des pertes et gaspillages alimentaires, le coût économique et environnemental et la qualité d'image, tout en assurant la sécurité sanitaire des produits. La mise en place de leviers de réduction des pertes alimentaires a souvent un coût, économique (humain, matériel, énergie), environnemental (consommation d'énergie, de ressources, pollutions…), parfois aussi social (organisation et conditions de travail) et d'image du produit, de même qu'elle peut générer des bénéfices selon ces mêmes critères. Parfois, les retraits sont difficilement valorisables (taille des opérateurs, savoir-faire, débouchés…) ou seulement au travers de procédés coûteux que le marché ne

rémunère pas toujours (viande séparée mécaniquement par exemple). Pour cela privilégier des approches pluridisciplinaires et multicritères est incontournable car il est important de veiller à ce qu'une réduction des pertes à une étape de la chaîne alimentaire ne se reporte pas sur une autre étape.

Références bibliographiques

Abaye, A.O.; Allen, V.G.; Fontenot, J.P., 1994. Influence of grazing cattle and sheep together and separately on animal performance and forage quality. *Journal of Animal Science*, 72 (4): 1013-1022. http://dx.doi.org/10.2527/1994.7241013x

Adamsen, C.E.; Moller, J.K.S.; Laursen, K.; Olsen, K.; Skibsted, L.H., 2006. Zn-porphyrin formation in cured meat products: Effect of added salt and nitrite. *Meat Science*, 72 (4): 672-679. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.09.017

Ademe, 2016. *Pertes et gaspillages alimentaires : l'état des lieux et leur gestion par étapes de la chaîne alimentaire*. Paris: INCOME Consulting, AK2C, (N° de contrat : 1477C0040), 165 p. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/pertes-gaspillages-alimentaires-etat-lieux-201605-synt.pdf

Adenkola, A.Y.; Ayo, J.O., 2010. Physiological and behavioural responses of livestock to road transportation stress: A review. *African Journal of Biotechnology*, 9 (31): 4845-4856.

Afshin, A.; Penalvo, J.L.; Del Gobbo, L.; Silva, J.; Michaelson, M.; O'Flaherty, M.; Capewell, S.; Spiegelman, D.; Danaei, G.; Mozaffarian, D., 2017. The prospective impact of food pricing on improving dietary consumption: A systematic review and meta-analysis. *Plos One*, 12 (3). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0172277

Afssa, 2009. *Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments concernant les plans de surveillance de l'emploi de protéines animales dans l'alimentation des animaux de rente*. Paris: Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Saisine n°2008-SA-0157), 6 p.

Al-Baali, A.; Farid, M.M., 2006. Thermal sterilization of food Historical Review. *Sterilization of Food in Retort Pouches*. New York: Springer (Food Engineering Series), 1-16.

Alahakoon, A.U.; Oey, I.; Bremer, P.; Silcock, P., 2019. Quality and Safety Considerations of Incorporating Post-PEF Ageing into the Pulsed Electric Fields and Sous Vide Processing Chain. *Food and Bioprocess Technology*, 12 (5): 852-864. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-019-02254-6

Alahakoon, A.U.; Oey, I.; Silcock, P.; Bremer, P., 2017. Understanding the effect of pulsed electric fields on thermostability of connective tissue isolated from beef pectoralis muscle using a model system. *Food Research International*, 100: 261-267. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.025

Alarcon-Rojo, A.D.; Janacua, H.; Rodriguez, J.C.; Paniwnyk, L.; Mason, T.J., 2015. Power ultrasound in meat processing. *Meat Science*, 107: 86-93. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.015

Alejandre, M.; Poyato, C.; Ansorena, D.; Astiasaran, I., 2016. Linseed oil gelled emulsion: A successful fat replacer in dry fermented sausages. *Meat Science*, 121: 107-113. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.05.010

Aleson-Carbonell, L.; Fernandez-Lopez, J.; Sendra, E.; Sayas-Barbera, E.; Perez-Alvarez, J.A., 2004. Quality characteristics of a non-fermented dry-cured sausage formulated with lemon albedo. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (15): 2077-2084. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.1912

Andrade, M.J.; Thorsen, L.; Rodriguez, A.; Cordoba, J.J.; Jespersen, L., 2014. Inhibition of ochratoxigenic moulds by Debaryomyces hansenii strains for biopreservation of dry-cured meat products. *International Journal of Food Microbiology*, 170: 70-77. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.004

Ansari, M.I.A.; Datta, A.K., 2003. An overview of sterilization methods for packaging materials used in aseptic packaging systems. *Food and Bioproducts Processing*, 81 (C1): 57-65.

Anses, 2011. *Évaluation du risque sanitaire lié à l'introduction des protéines animales transformées dans l'alimentation de certains animaux de rente. Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective*. Paris: ANSES, 89 p.

Anses, 2015. *Avis et rapport de l'Anses relatif à la valorisation des insectes dans l'alimentation et l'état des lieux des connaissances scientifiques sur les risques sanitaires en lien avec la consommation des insectes*. Paris: ANSES, (Saisine n° 2014-SA-015), 42 p.

Anses, 2017. *Avis et rapport de l'Anses relatif à l'attribution des sources des maladies infectieuses d'origine alimentaire. Partie 1 : Revue des méthodes et inventaire des données*. Paris: Anses (Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective), 189 p. https://www.anses.fr/fr/system/files/BIORISK2015SA0162Ra.pdf

Ansorena, D.; Astiasaran, I., 2004. The use of linseed oil improves nutritional quality of the lipid fraction of dry-fermented sausages. *Food Chemistry*, 87 (1): 69-74. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.10.019

Aparicio, J.L.; Elizalde, M., 2015. Migration of Photoinitiators in Food Packaging: A Review. *Packaging Technology and Science*, 28 (3): 181-203. http://dx.doi.org/10.1002/pts.2099

Apostolidis, C.; McLeay, F., 2016. Should we stop meating like this? Reducing meat consumption through substitution. *Food Policy*, 65: 74-89. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2016.11.002

Appert, N., 1810. *L'art de conserver pendant plusieurs années toutes les substances animales et végétales*. Paris: Patris et Cie Imprimeurs-Libraires.

Arroyo, C.; Lascorz, D.; O'Dowd, L.; Noci, F.; Arimi, J.; Lyng, J.G., 2015. Effect of Pulsed Electric Field treatments at various stages during conditioning on quality attributes of beef longissimus thoracis et lumborum muscle. *Meat Science*, 99: 52-59. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.08.004

Astruc, T.; Terlouw, C.; Haye, E.; Berne, A.; Heyer, A., 2005. Interets d'une unite mobile pour abattre sur site de production: le bien-etre des animaux et qualite technologique des viandes. *Journées de la recherche porcine en France*, 113-118.

Aymerich, T.; Picouet, P.A.; Monfort, J.M., 2008. Decontamination technologies for meat products. *Meat Science*, 78 (1-2): 114-129. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.07.007

Ba, H.V.; Seo, H.W.; Cho, S.H.; Kim, Y.S.; Kim, J.H.; Ham, J.S.; Park, B.Y.; Nam, S.P., 2016. Antioxidant and anti-foodborne bacteria activities of shiitake by-product extract in fermented sausages. *Food Control*, 70: 201-209. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.053

Bain, M.M.; Nys, Y.; Dunn, I.C., 2016. Increasing persistency in lay and stabilising egg quality in longer laying cycles. What are the challenges? *British Poultry Science*, 57 (3): 330-338. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2016.1161727

Baladincz, P.; Hancsok, J., 2015. Fuel from waste animal fats. *Chemical Engineering Journal*, 282: 152-160. http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.003

Baldwin, D.E., 2012. Sous vide cooking: A review. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 1 (1): 15-30. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijgfs.2011.11.002

Bastide, N.M.; Chenni, F.; Audebert, M.; Santarelli, R.L.; Tache, S.; Naud, N.; Baradat, M.; Jouanin, I.; Surya, R.; Hobbs, D.A.; Kuhnle, G.G.; Raymond-Letron, I.; Gueraud, F.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2015. A Central Role for Heme Iron in Colon Carcinogenesis Associated with Red Meat Intake. *Cancer Research*, 75 (5): 870-879. http://dx.doi.org/10.1158/0008-5472.can-14-2554

Bastide, N.M.; Morois, S.; Cadeau, C.; Kangas, S.; Serafini, M.; Gusto, G.; Dossus, L.; Pierre, F.H.; Clavel-Chapelon, F.; Boutron-Ruault, M.C., 2016. Heme Iron Intake, Dietary Antioxidant Capacity, and Risk of Colorectal Adenomas in a Large Cohort Study of French Women. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, 25 (4): 640-647. http://dx.doi.org/10.1158/1055-9965.epi-15-0724

Bastide, N.M.; Naud, N.; Nassy, G.; Vendeuvre, J.L.; Tache, S.; Gueraud, F.; Hobbs, D.A.; Kuhnle, G.G.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2017. Red Wine and Pomegranate Extracts Suppress Cured Meat Promotion of Colonic Mucin-Depleted Foci in Carcinogen-Induced Rats. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 69 (2): 289-298. http://dx.doi.org/10.1080/01635581.2017.1263745

Bastide, N.M.; Pierre, F.H.; Corpet, D.E., 2011. Heme iron from meat and risk of colorectal cancer: a meta-analysis and a review of the mechanisms involved. *Cancer prevention research (Philadelphia, Pa.)*, 4 (2): 177-184. http://dx.doi.org/10.1158/1940-6207.capr-10-0113

Bechaux, J.; Gatellier, P.; Le Page, J.F.; Drillet, Y.; Sante-Lhoutellier, V., 2019. A comprehensive review of bioactive peptides obtained from animal byproducts and their applications. *Food & Function*, 10 (10): 6244-6266. http://dx.doi.org/10.1039/c9fo01546a

Bekker, G.A.; Fischer, A.R.H.; Tobi, H.; van Trijp, H.C.M., 2017a. Explicit and implicit attitude toward an emerging food technology: The case of cultured meat. *Appetite*, 108: 245-254. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2016.10.002

Bekker, G.A.; Tobi, H.; Fischer, A.R.H., 2017b. Meet meat: An explorative study on meat and cultured meat as seen by Chinese, Ethiopians and Dutch. *Appetite*, 114: 82-92. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2017.03.009

Benedini, R.; Raja, V.; Parolari, G., 2008. Zinc-protoporphyrin IX promoting activity in pork muscle. *Lwt-Food Science and Technology*, 41 (7): 1160-1166. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2007.08.005

Benjaminson, M.A.; Gilchriest, J.A.; Lorenz, M., 2002. In vitro edible muscle protein production system (MPPS): Stage 1, fish. *Acta Astronautica*, 51 (12): 879-889. http://dx.doi.org/10.1016/s0094-5765(02)00033-4

Benoit, M.; Laignel, G., 2010. Energy consumption in mixed crop-sheep farming systems: what factors of variation and how to decrease? *Animal*, 4 (9): 1597-1605. http://dx.doi.org/10.1017/s1751731110000480

Benoit, M.; Sabatier, R.; Lasseur, J.; Creighton, P.; Dumont, B., 2019. Optimising economic and environmental performances of sheep-meat farms does not fully fit with the meat industry demands. *Agronomy for Sustainable Development*, 39 (4). http://dx.doi.org/10.1007/s13593-019-0588-9

Beriain, M.J.; Gomez, I.; Petri, E.; Insausti, K.; Sarries, M.V., 2011. The effects of olive oil emulsified alginate on the physico-chemical, sensory, microbial, and fatty acid profiles of low-salt, inulin-enriched sausages. *Meat Science*, 88 (1): 189-197. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.024

Bermudez-Aguirre, D.; Barbosa-Canovas, G.V., 2011. An Update on High Hydrostatic Pressure, from the Laboratory to Industrial Applications. *Food Engineering Reviews*, 3 (1): 44-61. http://dx.doi.org/10.1007/s12393-010-9030-4

Berthelot, V.; Gruffat, D., 2018. 12. Fatty acid composition of muscles in cattle and lamb. In: Noziere, P.; Sauvant, D.; Delaby, L., eds. *Feeding system for ruminants*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 193-202.

Bhat, Z.F.; Morton, J.D.; Mason, S.L.; Mungure, T.E.; Jayawardena, S.R.; Bekhit, A.E.D.A., 2019. Effect of pulsed electric field on calpain activity and proteolysis of venison. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52: 131-135. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.006

Birlouez, E., 2019. *Que mangeaient nos ancêtres ? De la préhistoire à la première guerre mondiale*. Rennes: Editions Ouest France, 128 p.

Bolumar, T.; Bindrich, U.; Toepfl, S.; Toldra, F.; Heinz, V., 2014. Effect of electrohydraulic shockwave treatment on tenderness, muscle cathepsin and peptidase activities and microstructure of beef loin steaks from Holstein young bulls. *Meat Science*, 98 (4): 759-765. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.07.024

Bolumar, T.; Enneking, M.; Toepfl, S.; Heinz, V., 2013. New developments in shockwave technology intended for meat tenderization: Opportunities and challenges. A review. *Meat Science*, 95 (4): 931-939. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.04.039

Bombrun, L., 2013. *Analyse des transferts de masse et de l'adhésion entre muscles lors de la fabrication de charcuteries cuites à faible teneur en sel. Effet du traitement thermique et modélisation des pertes de poids*. Thèse de doctorat (Génie des procédés)). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand. 367 p.

Bonnet, C.; Bouamra-Mechemache, Z.; Corre, T., 2018. An Environmental Tax Towards More Sustainable Food: Empirical Evidence of the Consumption of Animal Products in France. *Ecological Economics*, 147: 48-61. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.12.032

Brambila-Macias, J.; Shankar, B.; Capacci, S.; Mazzocchi, M.; Perez-Cueto, F.J.A.; Verbeke, W.; Trail, W.B., 2011. Policy interventions to promote healthy eating: A review of what works, what does not, and what is promising. *Food and Nutrition Bulletin*, 32 (4): 365-375. http://dx.doi.org/10.1177/156482651103200408

Brody, A.L.; Bugusu, B.; Han, J.H.; Sand, C.K.; McHugh, T.H., 2008. Innovative food packaging solutions. *Journal of Food Science*, 73 (8): R107-R116. http://dx.doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00933.x

Brunner, T.A.; Delley, M.; Denkel, C., 2018. Consumers' attitudes and change of attitude toward 3D-printed food. *Food Quality and Preference*, 68: 389-396. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.12.010

Bryant, C.; Barnett, J., 2018. Consumer acceptance of cultured meat: A systematic review. *Meat Science*, 143: 8-17. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.04.008

Bucher, T.; Collins, C.; Rollo, M.E.; McCaffrey, T.A.; De Vlieger, N.; Van der Bend, D.; Truby, H.; Perez-Cueto, F.J.A., 2016. Nudging consumers towards healthier choices: a systematic review of positional influences on food choice. *British Journal of Nutrition*, 115 (12): 2252-2263. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114516001653

Bujak, J.W., 2015. New insights into waste management - Meat industry. *Renewable Energy*, 83: 1174-1186. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.007

Bundesinstitut für Risikobewertung, 2019. *XXXVI. Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt*. Berlin, Gemany: Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), 17 p. https://bfr.ble.de/kse/faces/resources/pdf/360.pdf

Bures, D.; Barton, L., 2018. Performance, carcass traits and meat quality of Aberdeen Angus, Gascon, Holstein and Fleckvieh finishing bulls. *Livestock Science*, 214: 231-237. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2018.06.017

Burkhart, M.; Aurich, J.C., 2015. Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle. In: Kara, S., ed. *22. Cirp Conference on Life Cycle Engineering*. Amsterdam: Elsevier Science Bv (Procedia CIRP), 408-413. http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.194

Buscemi, F., 2014. From killing cows to culturing meat. *British Food Journal*, 116 (6): 952-964. http://dx.doi.org/10.1108/bfj-11-2012-0288

Busch, G.; Kuhl, S.; Gauly, M., 2018. Consumer expectations regarding hay and pasture-raised milk in South Tyrol. *Austrian Journal of Agricultural Economics and Rural Studies*, 27 (11): 79-86. http://dx.doi.org/10.15203/OEGA_27.11

Cadario, R.; Chandon, P., 2019. Which healthy eating nudges work best? A meta-analysis of field experiments. *Marketing Science*. http://dx.doi.org/10.1287/mksc.2018.1128

Caillavet, F.; Fadhuile, A.; Nichèle, V., 2019. The evolution of consumption of animal products in France: multiple challenges. *Inra Productions Animales*, 32 (2): 131-146. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2502

Calo-Mata, P.; Arlindo, S.; Boehme, K.; de Miguel, T.; Pascoal, A.; Barros-Velazquez, J., 2008. Current Applications and Future Trends of Lactic Acid Bacteria and their Bacteriocins for the Biopreservation of Aquatic Food Products. *Food and Bioprocess Technology*, 1 (1): 43-63. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-007-0021-2

Calvo, M.M.; Garcia, M.L.; Selgas, M.D., 2008. Dry fermented sausages enriched with lycopene from tomato peel. *Meat Science*, 80 (2): 167-172. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.11.016

Camo, J.; Beltran, J.A.; Roncales, P., 2008. Extension of the display life of lamb with an antioxidant active packaging. *Meat Science*, 80 (4): 1086-1091. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.04.031

Campagnol, P.C.B.; dos Santos, B.A.; Wagner, R.; Terra, N.N.; Pollonio, M.A.R., 2012. Amorphous cellulose gel as a fat substitute in fermented sausages. *Meat Science*, 90 (1): 36-42. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.05.026

Campo, M.M.; Nute, G.R.; Hughes, S.I.; Enser, M.; Wood, J.D.; Richardson, R.I., 2006. Flavour perception of oxidation in beef. *Meat Science*, 72 (2): 303-311. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.07.015

Campos, S.; Doxey, J.; Hammond, D., 2011. Nutrition labels on pre-packaged foods: a systematic review. *Public Health Nutrition*, 14 (8): 1496-1506. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980010003290

Carlsson, F.; Frykblom, P.; Lagerkvist, C.J., 2007. Consumer willingness to pay for farm animal welfare: mobile abattoirs versus transportation to slaughter. *European Review of Agricultural Economics*, 34 (3): 321-344. http://dx.doi.org/10.1093/erae/jbm025

Carocho, M.; Morales, P.; Ferreira, I.C.F.R., 2015. Natural food additives: Quo vadis? *Trends in Food Science & Technology*, 45 (2): 284-295. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.06.007

Cascarosa, E.; Boldrin, A.; Astrup, T., 2013. Pyrolysis and gasification of meat-and-bone-meal: Energy balance and GHG accounting. *Waste Management*, 33 (11): 2501-2508. http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.014

Castellano, P.; Belfiore, C.; Fadda, S.; Vignolo, G., 2008. A review of bacteriocinogenic lactic acid bacteria used as bioprotective cultures in fresh meat produced in Argentina. *Meat Science*, 79 (3): 483-499. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.10.009

Castellari, E.; Marette, S.; Moro, D.; Sckokai, P., 2018. The Impact of Information on Willingness to Pay and Quantity Choices for Meat and Meat Substitute. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, 17 (1). http://dx.doi.org/10.1515/jafio-2017-0028

Catts, O.; Zurr, I., 2008. *The Ethics of Experiential Engagement with the Manipulation of Life*. Cambridge: M I T Press (*Tactical Biopolitics: Art, Activism, and Technoscience*).

CEPI, 2012. *Industry Guideline for the Compliance of Paper & Board Materials and Articles for Food Contact*. Brussels, Belgium: Confederation of European Paper Industries, Issue 2, 30 p. http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/foodcontact/2012/Industry%20guideline-updated2012final.pdf

Cerles, A.; Lherm, M.; Poux, X.; Agabriel, J., 2017. Foresight study of the ruminant meat sector in the Massif Central area of France in 2050. *Inra Productions Animales*, 30 (2): 179-195.

Chaillou, S.; Chaulot-Talmon, A.; Caekebeke, H.; Cardinal, M.; Christieans, S.; Denis, C.; Desmonts, M.H.; Dousset, X.; Feurer, C.; Hamon, E.; Joffraud, J.J.; La Carbona, S.; Leroi, F.; Leroy, S.; Lorre, S.; Mace, S.; Pilet, M.F.; Prevost, H.; Rivollier, M.; Roux, D.; Talon, R.; Zagorec, M.; Champomier-Verges, M.C., 2015. Origin and ecological selection of core and food-specific bacterial communities associated with meat and seafood spoilage. *Isme Journal*, 9 (5): 1105-1118. http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2014.202

Champomier-Verges, M.C.; Chaillou, S.; Cornet, M.; Zagorec, M., 2001. Lactobacillus sakei: recent developments and future prospects. *Research in Microbiology*, 152 (10): 839-848. http://dx.doi.org/10.1016/s0923-2508(01)01267-0

Chauvet, D.J., 2018. Should cultured meat be refused in the name of animal dignity? *Ethical Theory and Moral Practice*, 21 (2): 387-411. http://dx.doi.org/10.1007/s10677-018-9888-4

Cheftel, J.C.; Levy, J.; Dumay, E., 2000. Pressure-assisted freezing and thawing: Principles and potential applications. *Food Reviews International*, 16 (4): 453-483. http://dx.doi.org/10.1081/fri-100102319

Chenut, R., 2018. De la cage vers l'alternatif : quelles possibilités de conversion ? Quel modèle pour demain ? *Journée Nationale d'information des professionnels poules pondeuses et oeufs de consommation*. Cesson-Sévigné, 4 décembre 2018 ITAVI.

Chesneau, G.; Kerhoas, N., 2018. Bleu-Blanc-Coeur : un nouveau modèle agricole basé sur une démarche de filière dédiée à la santé de la terre, des animaux et des hommes. In: Berthelot, V., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier, 384-392.

Chian, F.M.; Kaur, L.; Oey, I.; Astruc, T.; Hodgkinson, S.; Boland, M.S., 2019. Effect of Pulsed Electric Fields (PEF) on the ultrastructure and in vitro protein digestibility of bovine longissimus thoracis. *Lwt-Food Science and Technology*, 103: 253-259. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.005

Chouliara, E.; Karatapanis, A.; Savvaidis, I.N.; Kontominas, M.G., 2007. Combined effect of oregano essential oil and modified atmosphere packaging on shelf-life extension of fresh chicken breast meat, stored at 4 degrees C. *Food Microbiology*, 24 (6): 607-617. http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2006.12.005

Christieans, S.; Picgirard, L.; Parafita, E.; Lebert, A.; Gregori, T., 2018. Impact of reducing nitrate/nitrite levels on the behavior of Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes in French dry fermented sausages. *Meat Science*, 137: 160-167. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.11.028

Cicatiello, C.; De Rosa, B.; Franco, S.; Lacetera, N., 2016. Consumer approach to insects as food: barriers and potential for consumption in Italy. *British Food Journal*, 118 (9): 2271-2286. http://dx.doi.org/10.1108/bfj-01-2016-0015

Circus, V.E.; Robison, R., 2019. Exploring perceptions of sustainable proteins and meat attachment. *British Food Journal*, 121 (2): 533-545. http://dx.doi.org/10.1108/BFJ-01-2018-0025

Clarkson, C.; Mirosa, M.; Birch, J., 2018. Consumer acceptance of insects and ideal product attributes. *British Food Journal*, 120 (12): 2898-2911. http://dx.doi.org/10.1108/bfj-11-2017-0645

Clifton, P.M.; Keogh, J.B., 2017. A systematic review of the effect of dietary saturated and polyunsaturated fat on heart disease. *Nutrition Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 27 (12): 1060-1080. http://dx.doi.org/10.1016/j.numecd.2017.10.010

Clinton, M.; Nandi, S.; Zhao, D.B.; Olson, S.; Peterson, P.; Burdon, T.; McBride, D., 2016. Real-Time Sexing of Chicken Embryos and Compatibility with in ovo Protocols. *Sexual Development*, 10 (4): 210-216. http://dx.doi.org/10.1159/000448502

Cole, M.; Morgan, K., 2011. Vegaphobia: derogatory discourses of veganism and the reproduction of speciesism in UK national newspapers. *British Journal of Sociology*, 62 (1): 134-153. http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-4446.2010.01348.x

Collineau, L.; Boerlin, P.; Carson, C.A.; Chapman, B.; Fazil, A.; Hetman, B.; McEwen, S.A.; Parmley, E.J.; Reid-Smith, R.J.; Taboada, E.N.; Smith, B.A., 2019. Integrating Whole-Genome Sequencing Data Into Quantitative Risk Assessment of Foodborne Antimicrobial Resistance: A Review of Opportunities and Challenges. *Frontiers in Microbiology*, 10. http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2019.01107

Commission européenne, 2004. Règlement (CE) n°853/2004 du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 fixant des règles spécifiques d'hygiène applicables aux denrées alimentaires d'origine animale. *JOUE L 139 du 30/04/2004, p.55 - 205*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32004R0853

Commission européenne, 2006. Règlement CE n°2023/2006 de la Commission du 22 décembre 2006 relatif aux bonnes pratiques de fabrication des matériaux et objets destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *OJ L 384, 29.12.2006, p. 75-78* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32006R2023

Commission européenne, 2009a. Règlement (CE) n°1069/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) no 1774/2002 (règlement relatif aux sous-produits animaux). *JOUE L 300, 14.11.2009, p. 1–33*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32009R1069

Commission européenne, 2009b. Règlement (CE) n°1099/2009 du Conseil du 24 septembre 2009 sur la protection des animaux au moment de leur mise à mort (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 303 du 18.11.2009, p. 1–30*.

Commission européenne, 2011. Règlement (UE) n ° 10/2011 de la Commission du 14 janvier 2011 concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec des denrées alimentaires Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *OJ L 12, 15.1.2011, p. 1–89*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX:32011R0010

Commission européenne, 2013. Règlement (UE) n° 56/2013 de la Commission du 16 janvier 2013 modifiant les annexes I et IV du règlement (CE) n° 999/2001 du Parlement européen et du Conseil fixant les règles pour la prévention, le contrôle et l'éradication de certaines encéphalopathies spongiformes transmissibles Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *JOUE L 21, 24.1.2013, p. 3–16*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0056

Commission européenne, 2016. Règlement d'exécution (UE) 2016/304 de la Commission du 2 mars 2016 enregistrant une dénomination dans le registre des spécialités traditionnelles garanties (Heumilch/Haymilk/Latte fieno/Lait de foin/Leche de heno (STG). *JOUE L 58 du 04.03.2016, p. 28-34*. https://www.laitdefoin.fr/wp-content/uploads/2018/09/RE%CC%80GLEMENT-DEXE%CC%81CUTION-UE-2016304-DE-LA-COMMISSION-du-2-mars-2016.pdf

Conseil national de l'alimentation, 2011. *Quelle place pour les protéines animales transformées (PAT) dans l'alimentation des porcs, des volailles et des poissons ?* Paris: CNA (Avis n°70), 111 p.

Conseil national de l'alimentation, 2019. *Education à l'alimentation*. Paris: CNA, 40 p. https://www.cna-alimentation.fr/v2/wp-content/uploads/2019/09/CNA-Avis-84-%C3%89ducation-%C3%A0-lalimentation.pdf

Cooksey, K., 2005. Effectiveness of antimicrobial food packaging materials. *Food Additives and Contaminants*, 22 (10): 980-987. http://dx.doi.org/10.1080/02652030500246164

Corpet, D.E., 2011. Red meat and colon cancer: should we become vegetarians, or can we make meat safer? *Meat Science*, 89 (3): 310-316. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.04.009

Coucke, N.; Vermeir, I.; Slabbinck, H.; Van Kerckhove, A., 2019. Show Me More! The Influence of Visibility on Sustainable Food Choices. *Foods*, 8 (6). http://dx.doi.org/10.3390/foods8060186

Cournut, S.; Bertrand, J.; Conrard, A.; Ingrand, S., 2012. Intérêt de la mixité d'espèces pour accroître la flexibilité des élevages: l'exemple des élevages bovin lait+ ovin viande en Auvergne. *Rencontres Recherches Ruminants*, 19: 273-276.

Couvreur, S., 2018. Production de viande bovine : élevage et finition des animaux. In: Ellies-Oury, M.P.; Hocquette, J.F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation*. Paris: Tec & Doc Lavoisir (Coll. *Sciences et techniques agroalimentaires*), Chapitre 1, 15-33.

Cutter, C.N., 2002. Microbial control by packaging: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 42 (2): 151-161. http://dx.doi.org/10.1080/10408690290825493

d'Alexis, S.; Sauvant, D.; Boval, M., 2014. Mixed grazing systems of sheep and cattle to improve liveweight gain: a quantitative review. *Journal of Agricultural Science*, 152 (4): 655-666. http://dx.doi.org/10.1017/s0021859613000622

de Batz, C.; Faucon, F.; Voynet, D., 2016. *Evaluation du programme national nutrition santé 2011-2015 et 2016 (PNNS 3) et du plan obésité 2010-2013*. Paris: : Inspection générale des affaires sociales, (2016-020R), 149 p.

de Boer, J.; Aiking, H., 2017. Pursuing a Low Meat Diet to Improve Both Health and Sustainability: How Can We Use the Frames that Shape Our Meals? *Ecological Economics*, 142: 238-248. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.037

de Boer, J.; Schosler, H.; Aiking, H., 2014. "Meatless days" or "less but better"? Exploring strategies to adapt Western meat consumption to health and sustainability challenges. *Appetite*, 76: 120-128. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2014.02.002

de Ciriano, M.G.I.; Berasategi, I.; Navarro-Blasco, I.; Astiasaran, I.; Ansorena, D., 2013. Reduction of sodium and increment of calcium and omega-3 polyunsaturated fatty acids in dry fermented sausages: effects on the mineral content, lipid profile and sensory quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (4): 876-881. http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5811

de Ciriano, M.G.I.; Garcia-Herreros, C.; Larequi, E.; Valencia, I.; Ansorena, D.; Astiasaran, I., 2009. Use of natural antioxidants from lyophilized water extracts of Borago officinalis in dry fermented sausages enriched in omega-3 PUFA. *Meat Science*, 83 (2): 271-277. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.05.009

De Vuyst, L.; Falony, G.; Leroy, F., 2008. Probiotics in fermented sausages. *Meat Science*, 80 (1): 75-78. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.038

Del Cont, V.C.; Friant-Perrot, M., 2011. Quel cadre normatif pour la viande clonée : enjeux sociaux, éthiques et juridiques. *Droit, sciences et techniques : quelles responsabilités*. Lexisnexis, Collection « Colloques et débats », 345-366.

Delaby, L.; Buckley, F.; Mchugh, N.; Blanc, F., 2018. Robust animals for grass based production systems. *27. General meeting of the European Grassland Federation (EGF) - Grassland Science in Europe vol. 23*. Jun 2018, Cork, Ireland, 389-400.

Demeyer, D.I.; De Smet, S., 2010. The recommendation to limit or avoid consumption of processed meat is justified because of the association with the incidence of colorectal cancer and justifies the use of alternatives for nitrite in meat processing. *Nitric Oxide-Biology and Chemistry*, 23 (2): 150-151. http://dx.doi.org/10.1016/j.niox.2010.05.001

Derossi, A.; Caporizzi, R.; Azzollini, D.; Severini, C., 2018. Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children. *Journal of Food Engineering*, 220: 65-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.05.015

Detilleux, L., 2016. *Comparative study of edible insect acceptance between Vietnam and Belgium and potentiality of cricket breeding in Southern Vietnam (Ho Chi Minh City).* Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée. Université de Liège,, Liège, Belgique. 59 p. + annexes.

Diaz-Falu, E.M.; Brizuela, M.A.; Cid, M.S.; Cibils, A.F.; Cendoya, M.G.; Bendersky, D., 2014. Daily feeding site selection of cattle and sheep co-grazing a heterogeneous subtropical grassland. *Livestock Science*, 161: 147-157. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2013.11.010

Dick, A.; Bhandari, B.; Prakash, S., 2019. 3D printing of meat. *Meat Science*, 153: 35-44. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.03.005

Doolaege, E.H.A.; Vossen, E.; Raes, K.; De Meulenaer, B.; Verhe, R.; Paelinck, H.; De Smet, S., 2012. Effect of rosemary extract dose on lipid oxidation, colour stability and antioxidant concentrations, in reduced nitrite liver pates. *Meat Science*, 90 (4): 925-931. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.11.034

Douglas, M., 1967. *Purity and Danger*. London: Routledge & Kegan Paul Ltd.

Douglas, M., 1972. Deciphering a meal. *Daedalus*, 101 (1): 61-81.

Dourmad, J.Y.; Guilbaud, T.; Tichitt, M.; Bonaudo, T., 2019. Animal production in a circular bioeconomy. *Inra Productions Animales*, 32 (2): 205-219. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2485

Doyle, M.P.; Buchanan, R.L., 2012. *Food Microbiology: Fundamentals and Frontiers*. ASM Press. https://books.google.fr/books?id=-furBAAAQBAJ

Drosinos, E.H.; Paramithiotis, S., 2012. Effective strategies towards healthier fermented meat products. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 23 (5): 42-44.

Dufey, P.A.; Chambaz, A.; Morel, I.; Chassot, A., 2002. Performances d'engraissement de boeufs de six races a viande. *Revue Suisse d'agriculture*, 34 (3): 117-124.

Dunn, I.C.; Ciccone, N.A.; Joseph, N.T., 2009. Endocrinology and Genetics of the Hypothalamic-Pituitary-Gonadal Axis. In: Hocking, P.M., ed. *Biology of Breeding Poultry*. Wallingford: Cabi Publishing-C a B Int (Poultry Science Symposium Series), 61-88. http://dx.doi.org/10.1079/9781845933753.0061

Dupuy, A., 2017. De l'entomophobie à l'entomophagie : les mangeurs humains seront-ils plus nombreux à apprécier les insectes ? In: Stengel, K.; de Saint Pol, T., eds. *Les enjeux sociaux des cuisines du futur et alimentation de demain,* . Paris: L'Harmattan, 29-51.

Duru, M., 2017. Les omégas 3 et 6, un enjeu de santé publique : quels rôles de l'agriculture, de l'élevage et de l'agroalimentaire ? *Sésame*, n°1: 54-57.

Duru, M.; Bastien, D.; Froidmont, E.; Graulet, B.; Gruffat, D., 2017a. How products from grass-fed cattle contribute to nutritient intake and consumer health. *Fourrages*, 230: 131-140.

Duru, M.; Benoit, M.; Donnars, C.; Dumont, B.; J., R., 2017b. Quelle place pour l'élevage, les prairies et les produits animaux dans les transitions agricoles et alimentaires ? *Fourrages*, n°232: 281-296.

Ecole des Mines-ParisTech, 2014. *Le retour des farines animales : controverse.*

Edjabou, L.D.; Smed, S., 2013. The effect of using consumption taxes on foods to promote climate friendly diets - The case of Denmark. *Food Policy*, 39: 84-96. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2012.12.004

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, 2012. Scientific Opinion on Mineral Oil Hydrocarbons in Food. *Efsa Journal*, 10 (6): 2704. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2704

Eide, A.L.; Glover, J.C., 1995. Development of the longitudinal projection patterns of lumbar primary sensory afferents in the chicken-embryo. *Journal of Comparative Neurology*, 353 (2): 247-259. http://dx.doi.org/10.1002/cne.903530207

Eim, V.S.; Simal, S.; Rossello, C.; Femenia, A., 2008. Effects of addition of carrot dietary fibre on the ripening process of a dry fermented sausage (sobrassada). *Meat Science*, 80 (2): 173-182. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.11.017

Eriksen, M.S.; Rodbotten, R.; Grondahl, A.M.; Friestad, M.; Andersen, I.L.; Mejdell, C.M., 2013. Mobile abattoir versus conventional slaughterhouse-Impact on stress parameters and meat quality characteristics in Norwegian lambs. *Applied Animal Behaviour Science*, 149 (1-4): 21-29. http://dx.doi.org/10.1016/j.applanim.2013.09.007

Esnouf, C.; Huyghe, C., 2015. Enjeux socio-économiques et impacts des pertes agricoles et alimentaires. *Innovations Agronomiques*, 48: 1-10.

Euromonitor International, 2011. *The war on meat. How low-meat and no-meat diets are impacting consumer mar*. London: Euromonitor International.

European Food Safety Authority, 2012. Update on the state of play of Animal Health and Welfare and Environmental Impact of Animals derived from SCNT Cloning and their Offspring, and Food Safety of Products Obtained from those Animals. *Efsa Journal*, 10 (7): 2794. http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2794

Evans, G.; de Challemaison, B.; Cox, D.N., 2010. Consumers' ratings of the natural and unnatural qualities of foods. *Appetite*, 54 (3): 557-563. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2010.02.014

Fadhil, A.B., 2013. Biodiesel Production from Beef Tallow Using Alkali-Catalyzed Transesterification. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (1): 41-47. http://dx.doi.org/10.1007/s13369-012-0418-8

Fall, P.A.; Leroi, F.; Chevalier, F.; Guerin, C.; Pilet, M.F., 2010. Protective Effect of a Non-Bacteriocinogenic Lactococcus piscium CNCM I-4031 Strain Against Listeria monocytogenes in Sterilized Tropical Cooked Peeled Shrimp. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 19 (2): 84-92. http://dx.doi.org/10.1080/10498850.2010.486910

Falorni, O.; Caullet, J.Y., 2016. *Rapport fait au nom de la commission d'enquête sur les conditions d'abattage des animaux de boucherie dans les abattoirs français. Tome 1*. Paris: Assemblée Nationale, (n°4038), 316 p.

FAO, 2011. *Global food losses and food waste–Extent, causes and prevention*. Roma: FAO, SAVE FOOD: An initiative on Food Loss and Waste Reduction, 29 p. http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf

FAO; Heinz, G.; García de Siles, J.L.; Igene, J.O., 1990. *Manual on simple methods of meat preservation*. Rome: FAO (FAO Animal Production and Health Paper, 79), 87 p. http://www.fao.org/3/x6932e/X6932E00.htm

Faridnia, F.; Ma, Q.L.; Bremer, P.J.; Burritt, D.J.; Hamid, N.; Oey, I., 2015. Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29: 31-40. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2014.09.007

Fernandez, A.; Soriano, E.; Lopez-Carballo, G.; Picouet, P.; Lloret, E.; Gavara, R.; Hernandez-Munoz, P., 2009. Preservation of aseptic conditions in absorbent pads by using silver nanotechnology. *Food Research International*, 42 (8): 1105-1112. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2009.05.009

Ferraro, V.; Anton, M.; Sante-Lhoutellier, V., 2016. The "sisters" alpha-helices of collagen, elastin and keratin recovered from animal by-products: Functionality, bioactivity and trends of application. *Trends in Food Science & Technology*, 51: 65-75. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.006

Ferraro, V.; Gaillard-Martinie, B.; Sayd, T.; Chambon, C.; Anton, M.; Sante-Lhoutellier, V., 2017. Collagen type I from bovine bone. Effect of animal age, bone anatomy and drying methodology on extraction yield, self-assembly, thermal behaviour and electrokinetic potential. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97: 55-66. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.068

Ferrocino, I.; Cocolin, L., 2017. Current perspectives in food-based studies exploiting multi-omics approaches. *Current Opinion in Food Science*, 13: 10-15. http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2017.01.002

FICT, 2018. *Réenchantons les charcuteries françaises. Rapport d'activité 2017*. Paris: FICT, 50 p. https://www.fict.fr/2018/06/28/fict-action-rapport-dactivite-2017/

Fourat, E., 2018. Inde. In: (ed), J.-P.P., ed. *Dictionnaire des cultures alimentaires*. Paris: Presses Universitaires de France (2nde édition augmentée), 755-787.

Fourat, E.; Lepiller, O., 2017. Forms of Food Transition: Sociocultural Factors Limiting the Diets' Animalisation in France and India. *Sociologia Ruralis*, 57 (1): 41-63. http://dx.doi.org/10.1111/soru.12114

Fournier, T.; Lepiller, O., 2019. Se nourrir de promesses. Enjeux et critiques de l'introduction de deux innovations dans le domaine alimentaire: test nutri-génétique et viande in vitro. *Socio. La nouvelle revue des sciences sociales*, (12): 73-95. http://dx.doi.org/10.4000/socio.4529

Fraeye, I.; Kratka, M.; Vandenburgh, H.; Thorrez, L., 2020. Sensorial and Nutritional Aspects of Cultured Meat in Comparison to Traditional Meat: Much to Be Inferred. *Frontiers in Nutrition*, 7 (35). http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2020.00035

FranceAgriMer; BLEZAT Consulting, 2013. *Etude sur la valorisation du 5ème quartier des filières bovine, ovine et porcine en France*. Paris: FranceAgriMar (*Les Etudes de FranceAgriMer*), 210 p.

Fraser, M.D.; Moorby, J.M.; Vale, J.E.; Evans, D.M., 2014. Mixed Grazing Systems Benefit both Upland Biodiversity and Livestock Production. *Plos One*, 9 (2). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0089054

Galli, R.; Preusse, G.; Schnabel, C.; Bartels, T.; Cramer, K.; Krautwald-Junghanns, M.E.; Koch, E.; Steiner, G., 2018. Sexing of chicken eggs by fluorescence and Raman spectroscopy through the shell membrane. *Plos One*, 13 (2). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0192554

Galli, R.; Preusse, G.; Uckermann, O.; Bartels, T.; Krautwald-Junghanns, M.E.; Koch, E.; Steiner, G., 2016. In Ovo Sexing of Domestic Chicken Eggs by Raman Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 88 (17): 8657-8663. http://dx.doi.org/10.1021/acs.analchem.6b01868

Galli, R.; Preusse, G.; Uckermann, O.; Bartels, T.; Krautwald-Junghanns, M.E.; Koch, E.; Steiner, G., 2017. In ovo sexing of chicken eggs by fluorescence spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 409 (5): 1185-1194. http://dx.doi.org/10.1007/s00216-016-0116-6

Galvez, A.; Abriouel, H.; Lopez, R.L.; Ben Omar, N., 2007. Bacteriocin-based strategies for food biopreservation. *International Journal of Food Microbiology*, 120 (1-2): 51-70. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.06.001

Garcia-Muros, X.; Markandya, A.; Romero-Jordan, D.; Gonzalez-Eguino, M., 2017. The distributional effects of carbon-based food taxes. *Journal of Cleaner Production*, 140: 996-1006. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.171

Garcia, M.L.; Dominguez, R.; Galvez, M.D.; Casas, C.; Selgas, M.D., 2002. Utilization of cereal and fruit fibres in low fat dry fermented sausages. *Meat Science*, 60 (3): 227-236. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00125-5

Gerber, P.J.; Steinfeld, H.; Henderson, B.; Mottet, A.; Opio, C.; Dijkman, J.; Falcucci, A.; Tempio, G., 2013. *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: FAO, 115 p. http://www.fao.org/docrep/018/i3437e/i3437e.pdf

Geueke, B.; Groh, K.; Muncke, J., 2018. Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *Journal of Cleaner Production*, 193: 491-505. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005

Ghaani, M.; Cozzolino, C.A.; Castelli, G.; Farris, S., 2016. An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51: 1-11. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008

Ghanbari, M.; Jami, M.; Domig, K.J.; Kneifel, W., 2013. Seafood biopreservation by lactic acid bacteria - A review. *Lwt-Food Science and Technology*, 54 (2): 315-324. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2013.05.039

Gibis, M., 2007. Effect of oil marinades with garlic, onion, and lemon juice on the formation of heterocyclic aromatic amines in fried beef patties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (25): 10240-10247. http://dx.doi.org/10.1021/jf071720t

Gillet, G.; Vitrac, O.; Tissier, D.; Saillard, P.; Desobry, S., 2009. Development of decision tools to assess migration from plastic materials in contact with food. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 26 (12): 1556-1573. http://dx.doi.org/10.1080/19440040903271355

Godoi, F.C.; Prakash, S.; Bhandari, B.R., 2016. 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *Journal of Food Engineering*, 179: 44-54. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025

Gohler, D.; Fischer, B.; Meissner, S., 2017. In-ovo sexing of 14-day-old chicken embryos by pattern analysis in hyperspectral images (VIS/NIR spectra): A non-destructive method for layer lines with gender-specific down feather color. *Poultry Science*, 96 (1): 1-4. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pew282

Gomez-Estaca, J.; Lopez-de-Dicastillo, C.; Hernandez-Munoz, P.; Catala, R.; Gavara, R., 2014. Advances in antioxidant active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 35 (1): 42-51. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2013.10.008

Goullieux, A.; Pain, J.P., 2014. Chapter 22 - Ohmic Heating. In: Sun, D.-W., ed. *Emerging Technologies for Food Processing*. San Diego: Academic Press, 399-426.

Graça, J.; Calheiros, M.M.; Oliveira, A., 2015a. Attached to meat? (Un)Willingness and intentions to adopt a more plant-based diet. *Appetite*, 95: 113-125. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2015.06.024

Graça, J.; Oliveira, A.; Calheiros, M.M., 2015b. Meat, beyond the plate. Data-driven hypotheses for understanding consumer willingness to adopt a more plant-based diet. *Appetite*, 90: 80-90. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2015.02.037

Gravely, E.; Fraser, E., 2018. Transitions on the shopping floor: Investigating the role of Canadian supermarkets in alternative protein consumption. *Appetite*, 130: 146-156. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2018.08.018

Graziose, M.M.; Downs, S.M.; O'Brien, Q.; Fanzo, J., 2018. Systematic review of the design, implementation and effectiveness of mass media and nutrition education interventions for infant and young child feeding. *Public Health Nutrition*, 21 (2): 273-287. http://dx.doi.org/10.1017/s1368980017002786

Gregor-Svetec, D., 2018. Intelligent Packaging. In: Cerqueira, M.Â.P.R.; Lagaron, J.M.; Pastrana Castro, L.M.; de Oliveira Soares Vicente, A.A.M., eds. *Nanomaterials for Food Packaging*. Elsevier Chapter 8 203-247. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-51271-8.00008-5

Gremmen, B.; Bruijnis, M.R.N.; Blok, V.; Stassen, E.N., 2018. A Public Survey on Handling Male Chicks in the Dutch Egg Sector. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 31 (1): 93-107. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-018-9712-0

Groh, K.J.; Backhaus, T.; Carney-Almroth, B.; Geueke, B.; Inostroza, P.A.; Lennquist, A.; Leslie, H.A.; Maffini, M.; Slunge, D.; Trasande, L.; Warhurst, A.M.; Muncke, J., 2019. Overview of known plastic packaging-associated chemicals and their hazards. *Science of the Total Environment*, 651: 3253-3268. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.015

Gueraud, F.; Tache, S.; Steghens, J.P.; Milkovic, L.; Borovic-Sunjic, S.; Zarkovic, N.; Gaultier, E.; Naud, N.; Helies-Toussaint, C.; Pierre, F.; Priymenko, N., 2015. Dietary polyunsaturated fatty acids and heme iron induce oxidative stress biomarkers and a cancer promoting environment in the colon of rats. *Free Radical Biology and Medicine*, 83: 192-200. http://dx.doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2015.02.023

Guillard, V.; Couvert, O.; Stahl, V.; Buche, P.; Hanin, A.; Denis, C.; Dibie, J.; Dervaux, S.; Loriot, C.; Vincelot, T.; Huchet, V.; Perret, B.; Thuault, D., 2017. MAP-OPT: A software for supporting decision-making in the field of modified atmosphere packaging of fresh non respiring foods. *Packaging Research*, 2 (1): 28. http://dx.doi.org/10.1515/pacres-2017-0004

Ha, M.; Dunshea, F.R.; Warner, R.D., 2017. A meta-analysis of the effects of shockwave and high pressure processing on color and cook loss of fresh meat. *Meat Science*, 132: 107-111. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.016

Haddadi, M.H.; Aiyelabegan, H.T.; Negahdari, B., 2018. Advanced biotechnology in biorefinery: a new insight into municipal waste management to the production of high-value products. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15 (3): 675-686. http://dx.doi.org/10.1007/s13762-017-1424-x

Hahladakis, J.N.; Velis, C.A.; Weber, R.; Iacovidou, E.; Purnell, P., 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344: 179-199. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014

Hamilton, C.A.; Alici, G.; Panhuis, M.I.H., 2018. 3D printing Vegemite and Marmite: Redefining "breadboards". *Journal of Food Engineering*, 220: 83-88. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.01.008

Hamilton, C.R., 2002. Real and perceived issues involving animal proteins. *Protein sources for the animal feed industry. FAO Expert Consultation and Workshop, Bangkok*. 255-276. http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/007/y5019e/y5019e13.pdf

Hartmann, C.; Shi, J.; Giusto, A.; Siegrist, M., 2015. The psychology of eating insects: A cross-cultural comparison between Germany and China. *Food Quality and Preference*, 44: 148-156. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.04.013

Hartmann, C.; Siegrist, M., 2017. Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 61: 11-25. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.006

Hedenus, F.; Wirsenius, S.; Johansson, D.J.A., 2014. The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets. *Climatic Change*, 124 (1-2): 79-91. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1104-5

Heising, J.K.; Dekker, M.; Bartels, P.V.; Van Boekel, M.A.J.S., 2014. Monitoring the Quality of Perishable Foods: Opportunities for Intelligent Packaging. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54 (5): 645-654. http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2011.600477

Hengstler, J.G.; Foth, H.; Gebel, T.; Kramer, P.J.; Lilienblum, W.; Schweinfurth, H.; Volkel, W.; Wollin, K.M.; Gundert-Remy, U., 2011. Critical evaluation of key evidence on the human health hazards of exposure to bisphenol A. *Critical Reviews in Toxicology*, 41 (4): 263-291. http://dx.doi.org/10.3109/10408444.2011.558487

Hocquette, J.F., 2016. Is in vitro meat the solution for the future? *Meat Science*, 120: 167-176. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.036

Hoek, A.C.; Pearson, D.; James, S.W.; Lawrence, M.A.; Friel, S., 2017. Shrinking the food-print: A qualitative study into consumer perceptions, experiences and attitudes towards healthy and environmentally friendly food behaviours. *Appetite*, 108: 117-131. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2016.09.030

Hoeksma, D.L.; Gerritzen, M.A.; Lokhorst, A.M.; Poortvliet, P.M., 2017. An extended theory of planned behavior to predict consumers' willingness to buy mobile slaughter unit meat. *Meat Science*, 128: 15-23. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.01.011

Hollands, G.J.; Shemilt, I.; Marteau, T.M.; Jebb, S.A.; Kelly, M.P.; Nakamura, R.; Suhrcke, M.; Ogilvie, D., 2013. Altering micro-environments to change population health behaviour: towards an evidence base for choice architecture interventions. *Bmc Public Health*, 13. http://dx.doi.org/10.1186/1471-2458-13-1218

Holman, B.W.B.; Kerry, J.P.; Hopkins, D.L., 2018. A Review of Patents for the Smart Packaging of Meat and Muscle-based Food Products. *Recent patents on food, nutrition & agriculture*, 9 (1): 3-13. http://dx.doi.org/10.2174/2212798409666171031114624

Hopkins, P.D.; Dacey, A., 2008. Vegetarian Meat: Could Technology Save Animals and Satisfy Meat Eaters? *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 21 (6): 579-596. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-008-9110-0

Hospido, A.; Vazquez, M.E.; Cuevas, A.; Feijoo, G.; Moreira, M.T., 2006. Environmental assessment of canned tuna manufacture with a life-cycle perspective. *Resources Conservation and Recycling*, 47 (1): 56-72. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.10.003

Hotchkiss, J.H., 1994. Packaging Muscle Foods. In: Kinsman, D.M.; Kotula, A.W.; Breidenstein, B.C., eds. *Muscle Foods*. Boston, MA: Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-5933-4_18

Huang, S.H.; Liu, P.; Mokasdar, A.; Hou, L., 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67 (5-8): 1191-1203. http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5

Hung, Y.; Hieke, S.; Grunert, K.G.; Verbeke, W., 2019. Setting Policy Priorities for Front-of-Pack Health Claims and Symbols in the European Union: Expert Consensus Built by Using a Delphi Method. *Nutrients*, 11 (2). http://dx.doi.org/10.3390/nu11020403

Huor, A.; Espinosa, J.C.; Vidal, E.; Cassard, H.; Douet, J.Y.; Lugan, S.; Aron, N.; Marin-Moreno, A.; Lorenzo, P.; Aguilar-Calvo, P.; Badiola, J.; Bolea, R.; Pumarola, M.; Benestad, S.L.; Orge, L.; Thackray, A.M.; Bujdoso, R.; Torres, J.M.; Andreoletti, O., 2019. The emergence of classical BSE from atypical/Nor98 scrapie. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116 (52): 26853-26862. http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1915737116

Insausti, K.; Beriain, M.J.; Purroy, A.; Alberti, P.; Gorraiz, C.; Alzueta, M.J., 2001. Shelf life of beef from local Spanish cattle breeds stored under modified atmosphere. *Meat Science*, 57 (3): 273-281. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(00)00102-9

Inzana, J.A.; Olvera, D.; Fuller, S.M.; Kelly, J.P.; Graeve, O.A.; Schwarz, E.M.; Kates, S.L.; Awad, H.A., 2014. 3D printing of composite calcium phosphate and collagen scaffolds for bone regeneration. *Biomaterials*, 35 (13): 4026-4034. http://dx.doi.org/10.1016/j.biomaterials.2014.01.064

ITAVI, 2019. *Situation du marché des oeufs et des ovoproduits : édition mars*. Paris: Service économie ITAVI, 9 p. https://www.itavi.asso.fr/download/10325

Jackson, M.A.; Van Asten, A.; Morrow, J.D.; Min, S.; Pfefferkorn, F.E., 2016. A Comparison of Energy Consumption in Wire-Based and Powder-Based Additive-Subtractive Manufacturing. In: Shih, A.; Wang, L., eds. *44. North American Manufacturing Research Conference, Namrc 44*. Amsterdam: Elsevier Science Bv (Procedia Manufacturing), 989-1005. http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.087

Jacobsen, T.; Budde, B.B.; Koch, A.G., 2003. Application of Leuconostoc carnosum for biopreservation of cooked meat products. *Journal of Applied Microbiology*, 95 (2): 242-249. http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01970.x

Jauneau, P.; Daudey, E.; Hoibian, S., 2016. *Baromètre de la perception des risques sanitaires 2015 : les risques sanitaires préoccupent moins*. Paris: CREDOC, 45 p.

Jay, J.A.; D'Auria, R.; Nordby, J.C.; Rice, D.A.; Cleveland, D.A.; Friscia, A.; Kissinger, S.; Levis, M.; Malan, H.; Rajagopal, D.; Reynolds, J.R.; Slusser, W.; Wang, M.; Wesel, E., 2019. Reduction of the carbon footprint of college freshman diets after a food-based environmental science course. *Climatic Change*, 154 (3-4): 547-564. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-019-02407-8

Jayathilakan, K.; Sultana, K.; Radhakrishna, K.; Bawa, A.S., 2012. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 49 (3): 278-293. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-011-0290-7

Jensen, C.; Lauridsen, C.; Bertelsen, G., 1998. Dietary vitamin E: Quality and storage a stability of pork and poultry. *Trends in Food Science & Technology*, 9 (2): 62-72. http://dx.doi.org/10.1016/s0924-2244(98)00004-1

Jeremiah, L.E., 2001. Packaging alternatives to deliver fresh meats using short- or long-term distribution. *Food Research International*, 34 (9): 749-772. http://dx.doi.org/10.1016/s0963-9969(01)00096-5

Jimenez-Colmenero, F., 2007. Healthier lipid formulation approaches in meat-based functional foods. Technological options for replacement of meat fats by non-meat fats. *Trends in Food Science & Technology*, 18 (11): 567-578. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2007.05.006

Jimenez-Colmenero, F.; Carballo, J.; Cofrades, S., 2001. Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Science*, 59 (1): 5-13. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00053-5

Jin, Y.; Du, J.K.; He, Y., 2017. Optimization of process planning for reducing material consumption in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 44: 65-78. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.05.003

Josquin, N.M.; Linssen, J.P.H.; Houben, J.H., 2012. Quality characteristics of Dutch-style fermented sausages manufactured with partial replacement of pork back-fat with pure, pre-emulsified or encapsulated fish oil. *Meat Science*, 90 (1): 81-86. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.06.001

Kaleta, E.F.; Redmann, T., 2008. Approaches to determine the sex prior to and after incubation of chicken eggs and of day-old chicks. *Worlds Poultry Science Journal*, 64 (3): 391-399. http://dx.doi.org/10.1017/s0043933908000111

Karabagias, I.; Badeka, A.; Kontominas, M.G., 2011. Shelf life extension of lamb meat using thyme or oregano essential oils and modified atmosphere packaging. *Meat Science*, 88 (1): 109-116. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.12.010

Karel, M.; Lund, D.B., 2003. *Physical Principles of Food Preservation: Revised and Expanded*. Taylor & Francis.

Kaur, L.; Astruc, T.; Venien, A.; Loison, O.; Cui, J.; Irastorza, M.; Boland, M., 2016. High pressure processing of meat: effects on ultrastructure and protein digestibility. *Food & Function*, 7 (5): 2389-2397. http://dx.doi.org/10.1039/c5fo01496d

Kellens, K.; Mertens, R.; Paraskevas, D.; Dewulf, W.; Duflou, J.R., 2017. Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM contribute to a more sustainable way of part manufacturing? In: Takata, S.; Umeda, Y.; Kondoh, S., eds. *24. Cirp Conference on Life Cycle Engineering*. Amsterdam: Elsevier Science Bv (Procedia CIRP), 582-587. http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.153

Kergourlay, G.; Taminiau, B.; Daube, G.; Verges, M.C.C., 2015. Metagenomic insights into the dynamics of microbial communities in food. *International Journal of Food Microbiology*, 213: 31-39. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.09.010

Kerry, J.P.; O'Grady, M.N.; Hogan, S.A., 2006. Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat Science*, 74 (1): 113-130. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.04.024

Khan, A.A.; Randhawa, M.A.; Carne, A.; Ahmed, I.A.M.; Barr, D.; Reid, M.; Bekhit, A.E.D.A., 2017. Effect of low and high pulsed electric field on the quality and nutritional minerals in cold boned beef M-longissimus et lumborum. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41: 135-143. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2017.03.002

Klingberg, T.D.; Axelsson, L.; Naterstad, K.; Elsser, D.; Budde, B.B., 2005. Identification of potential probiotic starter cultures for Scandinavian-type fermented sausages. *International Journal of Food Microbiology*, 105 (3): 419-431. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2005.03.020

Koenig, M.; Hahn, G.; Damme, K.; Schmutz, M., 2012. Utilization of laying-type cockerels as "coquelets": Influence of genotype and diet characteristics on growth performance and carcass composition. *Archiv Fur Geflugelkunde*, 76 (3): 197-202.

Kondjoyan, A.; Picard, B., 2019. *La viande : de l'élevage à l'assiette*. Clermont-Ferrand: Presses universitaires Blaise Pascal (PUBP), 64 p.

Kortenkamp, A., 2007. Ten Years of Mixing Cocktails: A Review of Combination Effects of Endocrine-Disrupting Chemicals. *Environmental Health Perspectives*, 115: 98-105. http://dx.doi.org/10.1289/ehp.9357

Kousani, A.Z.; Adams, S.; Whyte, D.J.; Oliver, R.; Hemsley, B.; Palmer, S.; Balandin, S., 2017. 3D printing of food for people with swallowing difficulties. In: S. o. E. Paul K. Collins, E., . Deakin University and Ian Gibson, School of Engineering, Deakin University, ed. *DesTech Conference Proceedings*.

Koutsoumanis, K.P.; Geornaras, I.; Sofos, J.N., 2006. Microbiology of land muscle food. In: Hui, Y.H., ed. *Handbook of Food Science. Vol. 1*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 52.1-43.

Krautwald-Junghanns, M.E.; Cramer, K.; Fischer, B.; Forster, A.; Galli, R.; Kremer, F.; Mapesa, E.U.; Meissner, S.; Preisinger, R.; Preusse, G.; Schnabel, C.; Steiner, G.; Bartels, T., 2018. Current approaches to avoid the culling of day-old male chicks in the layer industry, with special reference to spectroscopic methods. *Poultry Science*, 97 (3): 749-757. http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex389

Labadie, J., 1999. Consequences of packaging on bacterial growth. Meat is an ecological niche. *Meat Science*, 52 (3): 299-305. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(99)00006-6

Laestadius, L., 2015. Public Perceptions of the Ethics of In-vitro Meat: Determining an Appropriate Course of Action. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 28: 991-1009. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-015-9573-8

Laestadius, L.I.; Neff, R.A.; Barry, C.L.; Frattaroli, S., 2013. Meat consumption and climate change: the role of non-governmental organizations. *Climatic Change*, 120 (1-2): 25-38. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0807-3

Lago, M.A.; de Quiros, A.R.B.; Sendon, R.; Bustos, J.; Nieto, M.T.; Paseiro, P., 2015. Photoinitiators: a food safety review. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 32 (5): 779-798. http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2015.1014866

Lahteenmaki-Uutela, A.; Grmelova, N., 2016. European law on insects in food and feed. *European Food and Feed Law Review*, 11 (1): 2-8.

Lamberti, M.; Escher, F., 2007. Aluminium foil as a food packaging material in comparison with other materials. *Food Reviews International*, 23 (4): 407-433. http://dx.doi.org/10.1080/87559120701593830

Lamine, C., 2008. *Les intermittents du bio: pour une sociologie pragmatique des choix alimentaires émergents*. Paris: Quae, 341 p.

Latvala, T.; Niva, M.; Makela, J.; Pouta, E.; Heikkila, J.; Kotro, J.; Forsman-Hugg, S., 2012. Diversifying meat consumption patterns: Consumers' self-reported past behaviour and intentions for change. *Meat Science*, 92 (1): 71-77. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.014

Le Fur, B.; Wacogne, D.; Lorre, S.; Pilet, M.; Leroi, F., 2013. Applications de la biopréservation via des cultures microbiennes dans la filière des produits de la mer. *Journée d'information et d'échange sur l'utilisation des flores protectrices pour la conservation des aliments. Réseau Mixte Technologique. Archimer, Ifremer. 19p*.

Le Pape, Y.; Kerveno, Y.; Mer, R.; Le Perchec, S., 2004. ESB. Radioscopie d'une tourmente : témoignages et analyses. *Les Dossiers de l'Environnement de l'INRA*, n°28: 190 p.

Le Tohic, C.; O'Sullivan, J.J.; Drapala, K.P.; Chartrin, V.; Chan, T.; Morrison, A.P.; Kerry, J.P.; Kelly, A.L., 2018. Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese. *Journal of Food Engineering*, 220: 56-64. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.003

Leach, E., 1964. Anthropological Aspects of Language: Animal Categories and Verbal Abuse. In: Lenneberg, E., ed. *New Directions in the Study of Language*. Cambridge (MA): The MIT Press, 23-63.

Lebret, B.; Picard, B., 2015. The main components of carcasses and meat quality in various animal species. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 93-98.

Lechenet, M.; Deytieux, V.; Antichi, D.; Aubertot, J.N.; Barberi, P.; Bertrand, M.; Cellier, V.; Charles, R.; Colnenne-David, C.; Dachbrodt-Saaydeh, S.; Debaeke, P.; Dore, T.; Farcy, P.; Fernandez-Quintanilla, C.; Grandeau, G.; Hawes, C.; Jouy, L.; Justes, E.; Kierzek, R.; Kudsk, P.; Lamichhane, J.R.; Lescourret, F.; Mazzoncini, M.; Melander, B.; Messean, A.; Moonen, A.C.; Newton, A.C.; Nolot, J.M.; Panozzo, S.; Retaureau, P.; Sattin, M.; Schwarz, J.; Toque, C.; Vasileiadis, V.P.; Munier-Jolain, N., 2017. Diversity of methodologies to experiment Integrated Pest Management in arable cropping systems: Analysis and reflections based on a European network. *European Journal of Agronomy*, 83: 86-99. http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.012

Lee, D.H., 2018. Evidence of the Possible Harm of Endocrine-Disrupting Chemicals in Humans: Ongoing Debates and Key Issues. *Endocrinology and Metabolism*, 33 (1): 44-52. http://dx.doi.org/10.3803/EnM.2018.33.1.44

Legendre, V.; Sans, P.; Barrey, S.; Boutin, B., 2017. Controversies on meat consumption : lessons from a sociological perspective. *Inra Productions Animales*, 30 (5): 479-786.

Lepiller, O.; Fourat, E.; Mognard, E., 2016. *Evolutions et facteurs socioculturels de la consommation d'aliments d'origine animale en France et en Europe : état des connaissances*. Paris: INRA, Rôles, impacts et services issus des élevages et de leurs produits (Rapport d'expertise collective INRA-DEPE.

Leroi, F., 2010. Occurrence and role of lactic acid bacteria in seafood products. *Food Microbiology*, 27 (6): 698-709. http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2010.05.016

Leroi, F.; Cornet, J.; Chevalier, F.; Cardinal, M.; Coeuret, G.; Chaillou, S.; Joffraud, J.J., 2015. Selection of bioprotective cultures for preventing cold-smoked salmon spoilage. *International Journal of Food Microbiology*, 213: 79-87. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.05.005

Leygonie, C.; Britz, T.J.; Hoffman, L.C., 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review. *Meat Science*, 91 (2): 93-98. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013

Lherm, M.; Agabriel, J.; Devun, J., 2017. Status and trends of suckler beef production in France and in three European countries. *Inra Productions Animales*, 30 (2): 93-106.

Li, L.; Shao, J.H.; Zhu, X.D.; Zhou, G.H.; Xu, X.L., 2013. Effect of plant polyphenols and ascorbic acid on lipid oxidation, residual nitrite and N-nitrosamines formation in dry-cured sausage. *International Journal of Food Science and Technology*, 48 (6): 1157-1164. http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.12069

Li, Z.P.; Henning, S.M.; Zhang, Y.J.; Zerlin, A.; Li, L.Y.; Gao, K.; Lee, R.P.; Karp, H.; Thames, G.; Bowerman, S.; Heber, D., 2010. Antioxidant-rich spice added to hamburger meat during cooking results in reduced meat, plasma, and urine malondialdehyde concentrations. *American Journal of Clinical Nutrition*, 91 (5): 1180-1184. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.2009.28526

Liao, C.Y.; Kannan, K., 2014. A survey of bisphenol A and other bisphenol analogues in foodstuffs from nine cities in China. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 31 (2): 319-329. http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2013.868611

Lipinski, B.; Hanson, C.; Lomax, J.; Kitinoja, L.; Waite, R.; Searchinger, T., 2013. Reducing Food Loss and Waste, Installment 2 of Creating a Sustainable Food Future. *World Research Institute Working Paper*, 40.

Lipton, J.I., 2017. Printable food: the technology and its application in human health. *Current Opinion in Biotechnology*, 44: 198-201. http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2016.11.015

Lipton, J.I.; Cutler, M.; Nigi, F.; Cohen, D.; Lipson, H., 2015. Additive manufacturing for the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 43 (1): 114-123. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.02.004

Liu, Z.B.; Zhang, M.; Bhandari, B.; Wang, Y.C., 2017. 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 69: 83-94. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.018

Lorenzo, J.M.; Munekata, P.E.S.; Pateiro, M.; Campagnol, P.C.B.; Dominguez, R., 2016. Healthy Spanish salchichon enriched with encapsulated n-3 long chain fatty acids in konjac glucomannan matrix. *Food Research International*, 89: 289-295. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.012

Lumaret, J.P.; Errouissi, F., 2002. Use of anthelmintics in herbivores and evaluation of risks for the non target fauna of pastures. *Veterinary Research*, 33 (5): 547-562. http://dx.doi.org/10.1051/vetres:2002038

Luo, D.; Lin, Z.; Li, S.; Liu, S.J., 2017. Effect of nutritional supplement combined with exercise intervention on sarcopenia in the elderly: A meta-analysis. *International Journal of Nursing Sciences*, 4 (4): 389-401. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijnss.2017.09.004

Lupton, D., 2017. 'Download to delicious': Promissory themes and sociotechnical imaginaries in coverage of 3D printed food in online news sources. *Futures*, 93: 44-53. http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2017.08.001

Lupton, D.; Turner, B., 2016. Both fascinating and disturbing': Consumer responses to 3D food printing and implications for food activism. In: Schneider, K.E.T.; Dolan, C.; Ulijaszek, S., eds. *Digital Food Activism*. London: Routledge, p. 17.

Maheswarappa, N.B.; Mohan, K.; Jagadeesh, D.S., 2016. Meat Products Packaging. *Reference Module in Food Science*. Elsevier. http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03221-2

Majid, I.; Ahmad Nayik, G.; Mohammad Dar, S.; Nanda, V., 2018. Novel food packaging technologies: Innovations and future prospective. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17 (4): 454-462. http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2016.11.003

Marchiori, D.R.; Adriaanse, M.A.; De Ridder, D.T.D., 2017. Unresolved questions in nudging research: Putting the psychology back in nudging. *Social and Personality Psychology Compass*, 11 (1): e12297. http://dx.doi.org/10.1111/spc3.12297

Martin, B.; Lherm, M.; Beranger, C., 2014. Trends and perspectives of ruminant livestock farming in the French mountains. *Inra Productions Animales*, 27 (1): 5-16.

Martin, O.C.B.; Naud, N.; Tache, S.; Debrauwer, L.; Chevolleau, S.; Dupuy, J.; Chantelauze, C.; Durand, D.; Pujos-Guillot, E.; Blas-Y-Estrada, F.; Urbano, C.; Kuhnle, G.G.C.; Sante-Lhoutellier, V.; Sayd, T.; Viala, D.; Blot, A.; Meunier, N.; Schlich, P.; Attaix, D.; Gueraud, F.; Scislowski, V.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2018. Targeting Colon Luminal Lipid Peroxidation Limits Colon Carcinogenesis Associated with Red Meat Consumption. *Cancer Prevention Research*, 11 (9): 569-580. http://dx.doi.org/10.1158/1940-6207.Capr-17-0361

Mauriello, G.; De Luca, E.; La Storia, A.; Villani, F.; Ercolini, D., 2005. Antimicrobial activity of a nisin-activated plastic film for food packaging. *Letters in Applied Microbiology*, 41 (6): 464-469. http://dx.doi.org/10.1111/j.1472-765X.2005.01796.x

McMillin, K.W., 2008. Where is MAP Going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat. *Meat Science*, 80 (1): 43-65. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2008.05.028

McMillin, K.W., 2017. Advancements in meat packaging. *Meat Science*, 132: 153-162. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.015

McMillin, K.W.; Belcher, J.N., 2012. Advances in the packaging of fresh and processed meat products. In: Kerry, J.P., ed. *Advances in meat, poultry and seafood packaging*. Elsevier, 173-204.

Melchior, G.; Garot, G., 2019. *Rapport d'information déposé par la commission des affaires économiques sur l'évaluation de la loi n° 2016-138 du 11 février 2016 relative à la lutte contre le gaspillage alimentaire*. Paris: Assemblée Nationale, 68 p. http://www.assemblee-nationale.fr/15/pdf/rap-info/i2025.pdf

Mendoza, E.; Garcia, M.L.; Casas, C.; Selgas, M.D., 2001. Inulin as fat substitute in low fat, dry fermented sausages. *Meat Science*, 57 (4): 387-393. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(00)00116-9

Meynard, J.M.; Dedieu, B.; Bos, A.P.B., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Darnhofer, I.; Gibbon, A.; Dedieu, B., eds. *Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic*. Springer, 405-429. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_18

Michel, J.F., 1985. Epidemiology and Control of Gastrointestinal Helminths in Domestic Animals. In: Bossche, H.V.; Thienpont, D.; Janssens, P.G., eds. *Chemotherapy of Gastrointestinal Helminths. Handbook of Experimental Pharmacology (Continuation of Handbuch der experimentellen Pharmakologie), vol 77*. Berlin, Heidelberg: Springer, 67-123. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-69527-8_3

Mohebi, E.; Marquez, L., 2015. Intelligent packaging in meat industry: An overview of existing solutions. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 52 (7): 3947-3964. http://dx.doi.org/10.1007/s13197-014-1588-z

Mollard, A.; Pecqueur, B., 2007. De l'hypothèse au modèle du panier de biens et de services. Histoire succincte d'une recherche. *Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires*, (300): 110-114. http://dx.doi.org/10.4000/economierurale.2270

Mollard, A.; Rambonilaza, M.; Vollet, D., 2006. Environmental amenities and services-differentiation: the case of the rural tourism market in France. *Revue d'Economie Politique*, 116 (2): 251-275.

Molnar, A.; Maertens, L.; Ampe, B.; Buyse, J.; Kempen, I.; Zoons, J.; Delezie, E., 2016. Changes in egg quality traits during the last phase of production: is there potential for an extended laying cycle? *British Poultry Science*, 57 (6): 842-847. http://dx.doi.org/10.1080/00071668.2016.1209738

Mora-Gallego, H.; Guardia, M.D.; Serra, X.; Gou, P.; Arnau, J., 2016. Sensory characterisation and consumer acceptability of potassium chloride and sunflower oil addition in small-caliber non-acid fermented sausages with a reduced content of sodium chloride and fat. *Meat Science*, 112: 9-15. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.10.008

Morel, K.; Farrie, J.P.; Renon, J.; Manneville, V.; Agabriel, J.; Devun, J., 2016. Environmental impacts of cow-calf beef systems with contrasted grassland management and animal production strategies in the Massif Central, France. *Agricultural Systems*, 144: 133-143. http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.006

Morin-Desailly, C., 2013. *Proposition de résolution tendant à la création d'un droit européen pour le consommateur à la maîtrise et à la parfaite connaissance de son alimentation*. Paris: Sénat, 39 p.

Morris, C.; Brody, A.L.; Wicker, L., 2007. Non-thermal food processing/preservation technotogies: A review with packaging implications. *Packaging Technology and Science*, 20 (4): 275-286. http://dx.doi.org/10.1002/pts.789

Mughini-Gras, L.; Kooh, P.; Augustin, J.C.; David, J.; Fravalo, P.; Guillier, L.; Jourdan-Da-Silva, N.; Thebault, A.; Sanaa, M.; Watier, L., 2018. Source Attribution of Foodborne Diseases: Potentialities, Hurdles, and Future Expectations. *Frontiers in Microbiology*, 9: 5. http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2018.01983

Muguerza, E.; Ansorena, D.; Astiasaran, I., 2003. Improvement of nutritional properties of Chorizo de Pamplona by replacement of pork backfat with soy oil. *Meat Science*, 65 (4): 1361-1367. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(03)00058-5

Muguerza, E.; Fista, G.; Ansorena, D.; Astiasaran, I.; Bloukas, J.G., 2002. Effect of fat level and partial replacement of pork backfat with olive oil on processing and quality characteristics of fermented sausages. *Meat Science*, 61 (4): 397-404. http://dx.doi.org/10.1016/s0309-1740(01)00210-8

Muguerza, E.; Gimeno, O.; Ansorena, D.; Astiasaran, I., 2004. New formulations for healthier dry fermented sausages: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 15 (9): 452-457. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2003.12.010

Murimi, M.W.; Kanyi, M.; Mupfudze, T.; Amin, M.R.; Mbogori, T.; Aldubayan, K., 2017. Factors Influencing Efficacy of Nutrition Education Interventions: A Systematic Review. *Journal of Nutrition Education and Behavior*, 49 (2): 142-+. http://dx.doi.org/10.1016/j.jneb.2016.09.003

Mutbukumarasamy, P.; Holley, R.A., 2006. Microbiological and sensory quality of dry fermented sausages containing alginate-microencapsulated Lactobacillus reuteri. *International Journal of Food Microbiology*, 111 (2): 164-169. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.036

Nguyen, P.M.; Goujon, A.; Sauvegrain, P.; Vitrac, O., 2013. A Computer-Aided Methodology to Design Safe Food Packaging and Related Systems. *Aiche Journal*, 59 (4): 1183-1212. http://dx.doi.org/10.1002/aic.14056

Nguyen, P.M.; Julien, J.M.; Breysse, C.; Lyathaud, C.; Thebault, J.; Vitrac, O., 2017. Project SafeFoodPack Design: case study on indirect migration from paper and boards. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 34 (10): 1703-1720. http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2017.1315777

Nguyen, T.T.H.; van der Werf, H.M.G.; Eugene, M.; Veysset, P.; Devun, J.; Chesneau, G.; Doreau, M., 2012. Effects of type of ration and allocation methods on the environmental impacts of beef-production systems. *Livestock Science*, 145 (1-3): 239-251. http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2012.02.010

Niemyjska, A.; Cantarero, K.; Byrka, K.; Bilewicz, M., 2018. Too humanlike to increase my appetite: Disposition to anthropomorphize animals relates to decreased meat consumption through empathic concern. *Appetite*, 127: 21-27. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2018.04.012

Nikodinoska, I.; Baffoni, L.; Di Gioia, D.; Manso, B.; Garcia-Sanchez, L.; Melero, B.; Rovira, J., 2019. Protective cultures against foodborne pathogens in a nitrite reduced fermented meat product. *Lwt-Food Science and Technology*, 101: 293-299. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.022

Njisane, Y.Z.; Muchenje, V., 2017. Farm to abattoir conditions, animal factors and their subsequent effects on cattle behavioural responses and beef quality - A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30 (6): 755-764. http://dx.doi.org/10.5713/ajas.16.0037

Nollet, L.M.L.; Toldra, F., 2011. *Handbook of analysis of edible animal by-products*. Boca Raton: CRC Press, 472 p. http://dx.doi.org/10.1201/b10785

Noort, M.; van Bommel, K.; Renzetti, S., 2017. 3D-Printed Cereal Foods. *Cereal Foods World*, 62 (6): 272-277. http://dx.doi.org/10.1094/cfw-62-6-0272

O'Riordan, K.; Fotopoulou, A.; Stephens, N., 2017. The first bite: Imaginaries, promotional publics and the laboratory grown burger. *Public Understanding of Science*, 26 (2): 148-163. http://dx.doi.org/10.1177/0963662516639001

O'Shea, N.; Arendt, E.K.; Gallagher, E., 2012. Dietary fibre and phytochemical characteristics of fruit and vegetable by-products and their recent applications as novel ingredients in food products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16: 1-10. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2012.06.002

Olivares, A.; Navarro, J.L.; Salvador, A.; Flores, M., 2010. Sensory acceptability of slow fermented sausages based on fat content and ripening time. *Meat Science*, 86 (2): 251-257. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.005

Orr, R.J.; Griffith, B.A.; Rivero, M.J.; Lee, M.R.F., 2019. Livestock Performance for Sheep and Cattle Grazing Lowland Permanent Pasture: Benchmarking Potential of Forage-Based Systems. *Agronomy*, 9 (2): 101. http://dx.doi.org/10.3390/agronomy9020101

Orsat, V.; Raghavan, G.S.V., 2014. Chapter 21 - Radio-Frequency Processing. In: Sun, D.-W., ed. *Emerging Technologies for Food Processing*. San Diego: Academic Press, 385-398.

Orzechowski, A., 2015. Artificial meat? Feasible approach based on the experience from cell culture studies. *Journal of Integrative Agriculture*, 14 (2): 217-221. http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(14)60882-0

Ostergren, K.; Gustavsson, J.; Bos-Brouwers, H.; Timmermans, T.; Hansen, O.J.; Moller, H.; Anderson, G.; O'Connor, C.; Soethoudt, H.; Quested, T.; Politano, A.; Bellettato, C.; Canali, M.; Falasconi, L.; Gaiani, S.; Vittuari, M.; Schneider, F.; Moate, G.; Waldron, K.; Redlingshofer, B., 2014. *FUSIONS definitional framework for food waste*. Wageningen: FUSIONS Project, (European Commission (FP7), Coordination and Support Action – CSA - Contract number: 311972), 133 p. https://www.eu-fusions.org/index.php/download?download=5:fusions-definitional-framework-for-food-waste

Pacquit, A.; Frisby, J.; Diamond, D.; Lau, K.T.; Farrell, A.; Quilty, B.; Diamond, D., 2007. Development of a smart packaging for the monitoring of fish spoilage. *Food Chemistry*, 102 (2): 466-470. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.052

Page, B.D.; Lacroix, G.M., 1995. The occurrence of phthalate ester and di-2-ethylhexyl adipate plasticizers in Canadian packaging and food sampled in 1985-1989 - A survey. *Food Additives and Contaminants*, 12 (1): 129-151. http://dx.doi.org/10.1080/02652039509374287

Pan, L.; Zhang, W.; Sun, Y.; Gu, X.; Ma, L.; Li, Z.; Hu, P.; Tu, K., 2016. Gender determination of early chicken hatching eggs embryos by hyperspectral imaging. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32 (1): 181-186.

Paredes, C.L.L.; Werteker, M.; Rossmann, B.; Keplinger, J.; Olschewski, I.L.; Schreiner, M., 2018. Discrimination of haymilk and conventional milk via fatty acid profiles. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 12 (2): 1391-1398. http://dx.doi.org/10.1007/s11694-018-9753-0

Parise, F., 2018. Les aliments disruptifs, au carrefour de l'innovation et des représentations anthropologiques. *The Conversation*, 26 août.

Pence, B.C.; Landers, M.; Dunn, D.M.; Shen, C.L.; Miller, M.F., 1998. Feeding of a well-cooked beef diet containing a high heterocyclic amine content enhances colon and stomach carcinogenesis in 1,2-dimethylhydrazine-treated rats. *Nutrition and Cancer-an International Journal*, 30 (3): 220-226. http://dx.doi.org/10.1080/01635589809514667

Perea-Sanz, L.; Montero, R.; Belloch, C.; Flores, M., 2019. Microbial changes and aroma profile of nitrate reduced dry sausages during vacuum storage. *Meat Science*, 147: 100-107. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.08.026

Piazza, J.; Ruby, M.B.; Loughnan, S.; Luong, M.; Kulik, J.; Watkins, H.M.; Seigerman, M., 2015. Rationalizing meat consumption. The 4Ns. *Appetite*, 91: 114-128. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2015.04.011

Pichner, R.; Hechelmann, H.; Gareis, M.; Steinruck, H., 2006. Shigatoxin producing Escherichia coli (STEC) in conventionally and organically produced salami products. *Fleischwirtschaft*, 86 (10): 112-114.

Pierre, F.; Freeman, A.; Tache, S.; Van der Meer, R.; Corpet, D.E., 2004. Beef meat and blood sausage promote the formation of azoxymethane-induced mucin-depleted foci and aberrant crypt foci in rat colons. *Journal of Nutrition*, 134 (10): 2711-2716.

Pierre, F.; Peiro, G.; Tache, S.; Cross, A.J.; Bingham, S.A.; Gasc, N.; Gottardi, G.; Corpet, D.E.; Gueraud, F., 2006. New marker of colon cancer risk associated with heme intake: 1,4-dihydroxynonane mercapturic acid. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, 15 (11): 2274-2279. http://dx.doi.org/10.1158/1055-9965.epi-06-0085

Pierre, F.; Santarelli, R.; Tache, S.; Gueraud, F.; Corpet, D.E., 2008. Beef meat promotion of dimethylhydrazine-induced colorectal carcinogenesis biomarkers is suppressed by dietary calcium. *British Journal of Nutrition*, 99 (5): 1000-1006. http://dx.doi.org/10.1017/s0007114507843558

Pierre, F.H.; Martin, O.C.; Santarelli, R.L.; Tache, S.; Naud, N.; Gueraud, F.; Audebert, M.; Dupuy, J.; Meunier, N.; Attaix, D.; Vendeuvre, J.L.; Mirvish, S.S.; Kuhnle, G.C.; Cano, N.; Corpet, D.E., 2013. Calcium and alpha-tocopherol suppress cured-meat

promotion of chemically induced colon carcinogenesis in rats and reduce associated biomarkers in human volunteers. *American Journal of Clinical Nutrition*, 98 (5): 1255-1262. http://dx.doi.org/10.3945/ajcn.113.061069

Plessz, M.; Dubuisson-Quellier, S.; Gojard, S.; Barrey, S., 2016. How consumption prescriptions affect food practices: Assessing the roles of household resources and life-course events. *Journal of Consumer Culture*, 16: (1): 101-123. http://dx.doi.org/10.1177/1469540514521077

Podeur, G., 2014. *Quantification des bactéries histaminogènes et maîtrise de la formation d'histamine dans les produits marins par biopréservation*. Thèse de doctorat (Microbiologie, Agroalimentaire). Université de Nantes, Faculté des sciences et techniques, Nantes. 283 p. https://www6.angers-nantes.inra.fr/secalim/content/download/4059/43959/version/1/file/manuscrit_gaetanpodeur.pdf

Polkinghorne, R.; Philpott, J.; Gee, A.; Doljanin, A.; Innes, J., 2008. Development of a commercial system to apply the Meat Standards Australia grading model to optimise the return on eating quality in a beef supply chain. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48 (11): 1451-1458. http://dx.doi.org/10.1071/ea05181

Ponnampalam, E.N.; Hopkins, D.L.; Jacobs, J.L., 2018. Increasing omega-3 levels in meat from ruminants under pasture-based systems. *Revue Scientifique Et Technique-Office International Des Epizooties*, 37 (1): 57-70. http://dx.doi.org/10.20506/rst.37.1.2740

Portanguen, S.; Tournayre, P.; Sicard, J.; Astruc, T.; Mirade, P.S., 2019. Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 86: 188-198. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.023

Poulain, J.P., 2012. Modèle alimentaire. *Dictionnaire des cultures alimentaires*. Paris: Presses Universitaires de France, 881-888.

Poulain, J.P.; Tibere, L.; Dupuy, A., 2007. Consumers views about farm animal Welfare. French case study. In: Evans, A.; Miele, M., eds. *Animal Welfare quality: science and society to improve animal welfare. Cardiff University (4).* 323-370.

Poyatos-Racionero, E.; Ros-Lis, J.V.; Vivancos, J.L.; Martinez-Manez, R., 2018. Recent advances on intelligent packaging as tools to reduce food waste. *Journal of Cleaner Production*, 172: 3398-3409. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.075

Prache, S., 2014. Advances, Issues and Challenges in Organic Lamb Meat Quality. In: Bellon, S.; Penvern, S., eds. *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures: Prototype for Sustainable Agricultures*. Dordrecht: Springer Netherlands, 313-324. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-7927-3_17

Prache, S.; Caillat, H.; Lagriffoul, G., 2018. Diversité dans la filière petits ruminants : une source de résilience? *Innovations Agronomiques*, 68: 171-191.

Prache, S.; Theriez, M., 1988. Production d'agneaux à l'herbe. *Inra Productions Animales*, 1 (1): 25-33.

Provenza, F.D.; Kronberg, S.L.; Gregorini, P., 2019. Is Grassfed Meat and Dairy Better for Human and Environmental Health? *Frontiers in Nutrition*, 6. http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2019.00026

Rad, A.S.; Nia, M.H.; Ardestani, F.; Nayebzadeh, H., 2018. Esterification of Waste Chicken Fat: Sulfonated MWCNT Toward Biodiesel Production. *Waste and Biomass Valorization*, 9 (4): 591-599. http://dx.doi.org/10.1007/s12649-016-9732-9

Raes, K.; De Smet, S.; Demeyer, D., 2004. Effect of dietary fatty acids on incorporation of long chain polyunsaturated fatty acids and conjugated linoleic acid in lamb, beef and pork meat: a review. *Animal Feed Science and Technology*, 113 (1-4): 199-221. http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2003.09.001

Ramos-Elorduy, J., 2009. Anthropo-entomophagy: Cultures, evolution and sustainability. *Entomological Research*, 39 (5): 271-288. http://dx.doi.org/10.1111/j.1748-5967.2009.00238.x

Redlingshofer, B.; Coudurier, B.; Bareille, N., 2019. Food loss and potential use of animal by-products in the livestock sector. *Inra Productions Animales*, 32 (1): 67-84. http://dx.doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.1.2454

Redlingshofer, B.; Coudurier, B.; M., G., 2015. Etat des lieux et leviers pour réduire les pertes alimentaires dans les filières françaises. *Innovations Agronomiques*, 48: 23-57.

Redondo-Solano, M.; Valenzuela-Martinez, C.; Cassada, D.A.; Snow, D.D.; Juneja, V.K.; Burson, D.E.; Thippareddi, H., 2013. Effect of meat ingredients (sodium nitrite and erythorbate) and processing (vacuum storage and packaging atmosphere) on germination and outgrowth of Clostridium perfringens spores in ham during abusive cooling. *Food Microbiology*, 35 (2): 108-115. http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2013.02.008

Regnier, F.; Adamiec, C., 2019. Digital devices to bridge the nutritional divide? Sociological study from two experiments among low-income population. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 54 (6): 326-335. http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2019.09.002

Regnier, F.; Dugre, M.; Darcel, N.; Adamiec, C., 2018. Providing a Smart Healthy Diet for the Low-Income Population: Qualitative Study on the Usage and Perception of a Designed Cooking App. *Jmir Mhealth and Uhealth*, 6 (11): e11176. http://dx.doi.org/10.2196/11176

Reipurth, M.F.S.; Horby, L.; Gregersen, C.G.; Bonke, A.; Cueto, F., 2019. Barriers and facilitators towards adopting a more plant-based diet in a sample of Danish consumers. *Food Quality and Preference*, 73: 288-292. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.10.012

Reisch, L.A.; Sunstein, C.R.; Gwozdz, W., 2017. Beyond carrots and sticks: Europeans support health nudges. *Food Policy*, 69: 1-10. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.01.007

République Française, 2018. Loi n°2018-938 du 30 octobre 2018 pour l'équilibre des relations commerciales dans le secteur agricole et alimentaire et une alimentation saine, durable et accessible à tous. *JORF n°0253 du 1 novembre 2018*.

République Française, 2019. Décret n° 2019-324 du 15 avril 2019 relatif à l'expérimentation de dispositifs d'abattoirs mobiles. *JORF n°0090 du 16 avril 2019, texte n° 34*

Risius, A.; Hamm, U., 2018. Exploring Influences of Different Communication Approaches on Consumer Target Groups for Ethically Produced Beef. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 31 (3): 325-340. http://dx.doi.org/10.1007/s10806-018-9727-6

Rouger, A.; Tresse, O.; Zagorec, M., 2017. Bacterial Contaminants of Poultry Meat: Sources, Species, and Dynamics. *Microorganisms*, 5 (3). http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms5030050

Ruiz-Capillas, C.; Triki, M.; Herrero, A.M.; Rodriguez-Salas, L.; Jimenez-Colmenero, F., 2012. Konjac gel as pork backfat replacer in dry fermented sausages: Processing and quality characteristics. *Meat Science*, 92 (2): 144-150. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.028

Russo, G.; Barbato, F.; Cardone, E.; Fattore, M.; Albrizio, S.; Grumetto, L., 2018. Bisphenol A and Bisphenol S release in milk under household conditions from baby bottles marketed in Italy. *Journal of Environmental Science and Health Part B-Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*, 53 (2): 116-120. http://dx.doi.org/10.1080/03601234.2017.1388662

Rustad, T.; Storro, I.; Slizyte, R., 2011. Possibilities for the utilisation of marine by-products. *International Journal of Food Science and Technology*, 46 (10): 2001-2014. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02736.x

Safa, H.; Gatellier, P.; Berdague, J.L.; Kondjoyan, N.; Mercier, F.; Portanguen, S.; Favier, R.; Mirade, P.S., 2016. Physicochemical, Biochemical and Instrumental Attributes and Consumer Acceptability of Dry-Fermented Sausages Elaborated with Combined Partial Substitutions of Sodium Chloride and Pork Backfat *Food and Nutrition Sciences*, 7 (14): 1297-1314. http://dx.doi.org/10.4236/fns.2016.714119

Safa, H.; Gatellier, P.; Lebert, A.; Picgirard, L.; Mirade, P.S., 2015. Effect of Combined Salt and Animal Fat Reductions on Physicochemical and Biochemical Changes During the Manufacture of Dry-Fermented Sausages. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (10): 2109-2122. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-015-1563-3

Safa, H.; Portanguen, S.; Mirade, P.S., 2017. Reducing the levels of sodium, saturated animal fat, and nitrite in dry-cured pork meat products: A major challenge. *Food and Nutrition Sciences*, 8 (4): 419-443.

Salazar, P.; Garcia, M.L.; Selgas, M.D., 2009. Short-chain fructooligosaccharides as potential functional ingredient in dry fermented sausages with different fat levels. *International Journal of Food Science and Technology*, 44 (6): 1100-1107. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2009.01923.x

Sall, S., 2018. Environmental Food Taxes and Inequalities: Simulation of a Meat Tax in Sweden. *Food Policy*, 74: 147-153. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.12.007

Sanchez-Zapata, E.; Diaz-Vela, J.; Perez-Chabela, M.L.; Perez-Alvarez, J.A.; Fernandez-Lopez, J., 2013. Evaluation of the Effect of Tiger Nut Fibre as a Carrier of Unsaturated Fatty Acids Rich Oil on the Quality of Dry-Cured Sausages. *Food and Bioprocess Technology*, 6 (5): 1181-1190. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-011-0733-1

Sandilands, V., 2011. The laying hen and bone fractures. *Veterinary Record*, 169 (16): 411-412. http://dx.doi.org/10.1136/vr.d6564

Santarelli, R.L.; Naud, N.; Tache, S.; Gueraud, F.; Vendeuvre, J.L.; Zhou, L.; Anwar, M.M.; Mirvish, S.S.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2013. Calcium inhibits promotion by hot dog of 1,2-dimethylhydrazine- induced mucin-depleted foci in rat colon. *International Journal of Cancer*, 133 (11): 2533-2541. http://dx.doi.org/10.1002/ijc.28286

Santarelli, R.L.; Vendeuvre, J.L.; Naud, N.; Tache, S.; Gueraud, F.; Viau, M.; Genot, C.; Corpet, D.E.; Pierre, F.H.F., 2010. Meat Processing and Colon Carcinogenesis: Cooked, Nitrite-Treated, and Oxidized High-Heme Cured Meat Promotes Mucin-Depleted Foci in Rats. *Cancer Prevention Research*, 3 (7): 852-864. http://dx.doi.org/10.1158/1940-6207.capr-09-0160

Saraoui, T.; Cornet, J.; Guillouet, E.; Pilet, M.F.; Chevalier, F.; Joffraud, J.J.; Leroi, F., 2017. Improving simultaneously the quality and safety of cooked and peeled shrimp using a cocktail of bioprotective lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 241: 69-77. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.09.024

Schluchter, S.; Eberhard, P.; Kneubuhler, H.; Hadorn, R.S., 2010. Manufacture of Dry-Fermented Sausages Containing Different Levels of Nitrate of Natural or Synthetic Origin. *Viandes & Produits carnés*, 28: 3-7.

Scollan, N.D.; Greenwood, P.L.; Newbold, C.J.; Ruiz, D.R.Y.; Shingfield, K.J.; Wallace, R.J.; Hocquette, J.F., 2011. Future research priorities for animal production in a changing world. *Animal Production Science*, 51 (1): 1-5. http://dx.doi.org/10.1071/an10051

Sepahpour, S.; Selamat, J.; Khatib, A.; Manap, M.Y.A.; Razis, A.F.A.; Hajeb, P., 2018. Inhibitory effect of mixture herbs/spices on formation of heterocyclic amines and mutagenic activity of grilled beef. *Food Additives and Contaminants Part a-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 35 (10): 1911-1927. http://dx.doi.org/10.1080/19440049.2018.1488085

Severini, C.; Derossi, A.; Azzollini, D., 2016. Variables affecting the printability of foods: Preliminary tests on cereal-based products. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 38: 281-291. http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2016.10.001

Severini, C.; Derossi, A.; Ricci, I.; Caporizzi, R.; Fiore, A., 2018. Printing a blend of fruit and vegetables. New advances on critical variables and shelf life of 3D edible objects. *Journal of Food Engineering*, 220: 89-100. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.025

Shanjani, Y.; Kang, Y.Q.; Zarnescu, L.; Bowden, A.K.; Koh, J.T.; Ker, D.F.E.; Yang, Y.Z., 2017. Endothelial pattern formation in hybrid constructs of additive manufactured porous rigid scaffolds and cell-laden hydrogels for orthopedic applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 65: 356-372. http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.08.037

Sibra, C.; Schmidely, P.; Martin, B., 2018. Maîtrise en élevage des qualités du lait, du beurre et du fromage. In: (coord.), B.V., ed. *Alimentation des animaux et qualité de leurs produits*. Paris: Tec & Doc Lavoisier (Coll. Agriculture d'Aujourd'hui) Chapitre 4, 93-171.

Siegrist, M.; Sutterlin, B., 2017. Importance of perceived naturalness for acceptance of food additives and cultured meat. *Appetite*, 113: 320-326. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2017.03.019

Siegrist, M.; Sutterlin, B.; Hartmann, C., 2018. Perceived naturalness and evoked disgust influence acceptance of cultured meat. *Meat Science*, 139: 213-219. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.02.007

Siegrist, M.; Visschers, V.H.M.; Hartmann, C., 2015. Factors influencing changes in sustainability perception of various food behaviors: Results of a longitudinal study. *Food Quality and Preference*, 46: 33-39. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.07.006

Simpson, R.; Acevedo, C.; Almonacid, S., 2009. Mass transfer of CO2 in MAP systems: Advances for non-respiring foods. *Journal of Food Engineering*, 92 (2): 233-239. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.10.035

Siragusa, G.R.; Cutter, C.N.; Willett, J.L., 1999. Incorporation of bacteriocin in plastic retains activity and inhibits surface growth of bacteria on meat. *Food Microbiology*, 16 (3): 229-235. http://dx.doi.org/10.1006/fmic.1998.0239

Skov, L.R.; Lourenco, S.; Hansen, G.L.; Mikkelsen, B.E.; Schofield, C., 2013. Choice architecture as a means to change eating behaviour in self-service settings: a systematic review. *Obesity Reviews*, 14 (3): 187-196. http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-789X.2012.01054.x

Slade, P., 2018. If you build it, will they eat it? Consumer preferences for plant-based and cultured meat burgers. *Appetite*, 125: 428-437. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2018.02.030

Smith, J.P.; Daifas, D.P.; El-Khoury, W.; Koukoutsis, J.; El-Khoury, A., 2004. Shelf life and safety concerns of bakery products - A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 44 (1): 19-55. http://dx.doi.org/10.1080/10408690490263774

Sojic, B.; Pavlic, B.; Ikonic, P.; Tomovic, V.; Ikonic, B.; Zekovic, Z.; Kocic-Tanackov, S.; Jokanovic, M.; Skaljac, S.; Ivic, M., 2019. Coriander essential oil as natural food additive improves quality and safety of cooked pork sausages with different nitrite levels. *Meat Science*, 157 (O, 2008, ISO 6579). http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107879

Solomon, S.E., 2002. The oviduct in chaos. *Worlds Poultry Science Journal*, 58 (1): 41-48. http://dx.doi.org/10.1079/wps20020006

Soutjis, B., 2020. The new digital face of the consumerist mediator: the case of the 'Yuka' mobile app. *Journal of Cultural Economy*, 13 (1 (Special Issue)): 114-131. http://dx.doi.org/10.1080/17530350.2019.1603116

Spiteri, M.; Martinovic, L.; Combris, P.; Soler, L.G.; Enderli, G.; Ait-Dahmane, S.; Armand, M.; Balage, J.M.; Klein, A.; Kuitcheng Manegoum, C.; Lebrun, E.; Lescene, L.; Narayanane, G., 2016. *Caractérisation des produits reformulés dans le cadre d'engagements volontaires de progrès nutritionnel*, 174 p.

Spiteri, M.; Soler, L.G., 2018. Food reformulation and nutritional quality of food consumption: an analysis based on households panel data in France. *European Journal of Clinical Nutrition*, 72 (2): 228-235. http://dx.doi.org/10.1038/s41430-017-0044-3

Springmann, M.; Mason-D'Coz, D.; Robinson, S.; Wiebe, K.; Godfrey, H.C.J.; Rayner, M.; Scarborough, P., 2018. Health-motivated taxes on red and processed meat: A modelling study on optimal tax levels and associated health impacts. *Plos One*, 13 (11). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0204139

Stanley, D.W., 1991. Biological membrane deterioration and associated quality losses in food tissues. *Critical reviews in food science and nutrition*, 30 (5): 487-553. http://dx.doi.org/10.1080/10408399109527554

Stenmarck, A.; Jensen, C.; Quested, T.; Moates, G.; Buksti, M.; Cseh, B.; Juul, S.; Parry, A.; Politano, A.; Redlingshofer, B., 2016. *Estimates of European food waste levels*: IVL Swedish Environmental Research Institute, (9188319016), 79 p. https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/378674

Stoll-Kleemann, S.; Schmidt, U.J., 2017. Reducing meat consumption in developed and transition countries to counter climate change and biodiversity loss: a review of influence factors. *Regional Environmental Change*, 17 (5): 1261-1277. http://dx.doi.org/10.1007/s10113-016-1057-5

Sun, J.; Peng, Z.; Yan, L.K.; Fuh, J.Y.H.; Hong, G.S., 2015a. 3D food printing-An innovative way of mass customization in food fabrication. *International Journal of Bioprinting*, 1 (1): 27-38. http://dx.doi.org/10.18063/ijb.2015.01.006

Sun, J.; Zhou, W.B.; Huang, D.J.; Fuh, J.Y.H.; Hong, G.S., 2015b. An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (8): 1605-1615. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-015-1528-6

Sunstein, C.R., 2014. Nudging: a very short guide. *Journal of Consumer Policy*, 37 (4): 583-588. http://dx.doi.org/10.1007/s10603-014-9273-1

Sunstein, C.R., 2018. Misconceptions about nudges. *Journal of Behavioral Economics for Policy*, 2 (1): 61-67.

Sutton, C.; Dibb, S., 2013. *Prime Cuts: valuing the meat we eat*. Godalming, UK: World Wildlife Fund, Food Ethics Council: , 45 p.

Suwandy, V.; Carne, A.; van de Ven, R.; Bekhit, A.E.A.; Hopkins, D.L., 2015. Effect of Repeated Pulsed Electric Field Treatment on the Quality of Cold-Boned Beef Loins and Topsides. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (6): 1218-1228. http://dx.doi.org/10.1007/s11947-015-1485-0

Talon, R.; Leroy, S.; Vermassen, A.; Christieans, S., 2015. Réduction des nitrates, nitrites dans les produits carnés: quelles conséquences ? Quelles solutions ? *Innovations Agronomiques*, 44: 25-34.

Tan, H.S.G.; Fischer, A.R.H.; van Trijp, H.C.M.; Stieger, M., 2016. Tasty but nasty? Exploring the role of sensory-liking and food appropriateness in the willingness to eat unusual novel foods like insects. *Food Quality and Preference*, 48: 293-302. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2015.11.001

Tarrant, P.V., 1990. Transportation of cattle by road. *Applied Animal Behaviour Science*, 28 (1-2): 153-170. http://dx.doi.org/10.1016/0168-1591(90)90051-E

Terlouw, E.M.C., 2018. Période de pré-abattage et d'abattage : procédures, stress, bien-être animal et qualités des viandes. In: Ellies-Oury, M.-P.; Hocquette, J.-F., eds. *La chaîne de la viande bovine. Production, transformation, valorisation et consommation*. Paris: Lavoisier, 35-50.

Terlouw, E.M.C.; Arnould, C.; Auperin, B.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Lefevre, F.; Lensink, J.; Mounier, L., 2007. Impact des conditions de pré-abattage sur le stress et le bien-être des animaux d'élevage. *Inra Productions Animales*, 20 (1): 93-100.

Terlouw, E.M.C.; Cassar-Malek, I.; Picard, B.; Bourguet, C.; Deiss, V.; Arnould, C.; Berri, C.; Le Bihan-Duval, E.; Lefevre, F.; Lebret, B., 2015. Stress during rearing and at slaughter: influence on meat quality. *Inra Productions Animales*, 28 (2): 169-182.

Thaler, R.H.; Sunstein, C.R., 2008. *Nudge: Improving decisions about health, wealth, and happiness*. New Haven: Yale University Press, 293 p,.

Thow, A.M.; Downs, S.; Jan, S., 2014. A systematic review of the effectiveness of food taxes and subsidies to improve diets: Understanding the recent evidence. *Nutrition Reviews*, 72 (9): 551-565. http://dx.doi.org/10.1111/nure.12123

Tittlemier, S.A.; Pepper, K.; Seymour, C.; Moisey, J.; Bronson, R.; Cao, X.L.; Dabeka, R.W., 2007. Dietary exposure of Canadians to perfluorinated carboxylates and perfluorooctane sulfonate via consumption of meat, fish, fast foods, and food items prepared in their packaging. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (8): 3203-3210. http://dx.doi.org/10.1021/jf0634045

Tobler, C.; Visschers, V.H.M.; Siegrist, M., 2011. Eating green. Consumers' willingness to adopt ecological food consumption behaviors. *Appetite*, 57 (3): 674-682. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2011.08.010

Toepfl, S.; Heinz, V.; Knorr, D., 2007. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 46 (6): 537-546. http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2006.07.011

Toldra, F.; Aristoy, M.C.; Mora, L.; Reig, M., 2012. Innovations in value-addition of edible meat by-products. *Meat Science*, 92 (3): 290-296. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.004

Toldra, F.; Mora, L.; Reig, M., 2016. New insights into meat by-product utilization. *Meat Science*, 120: 54-59.

Toldra, F.; Reig, M., 2011. Innovations for healthier processed meats. *Trends in Food Science & Technology*, 22 (9): 517-522. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2011.08.007

Toohey, E.S.; Kerr, M.J.; van de Ven, R.; Hopkins, D.L., 2011. The effect of a kiwi fruit based solution on meat traits in beef m. semimembranosus (topside). *Meat Science*, 88 (3): 468-471. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.01.028

Troy, D.J.; Kerry, J.P., 2010. Consumer perception and the role of science in the meat industry. *Meat Science*, 86 (1): 214-226. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.05.009

Tsang, Y.F.; Kumar, V.; Samadar, P.; Yang, Y.; Lee, J.; Ok, Y.S.; Song, H.; Kim, K.H.; Kwon, E.E.; Jeon, Y.J., 2019. Production of bioplastic through food waste valorization. *Environment International*, 127: 625-644. http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.076

Tsoukalas, D.S.; Katsanidis, E.; Marantidou, S.; Bloukas, J.G., 2011. Effect of freeze-dried leek powder (FDLP) and nitrite level on processing and quality characteristics of fermented sausages. *Meat Science*, 87 (2): 140-145. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.10.003

Tucker, C.A., 2014. The significance of sensory appeal for reduced meat consumption. *Appetite*, 81: 168-179. http://dx.doi.org/10.1016/j.appet.2014.06.022

Union Européenne, 2011. Règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires, modifiant les règlements (CE) n°1924/2006 et (CE) n°1925/2006 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 87/250/CEE de la Commission, la directive 90/496/CEE du Conseil, la directive 1999/10/CE de la Commission, la directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil, les directives 2002/67/CE et 2008/5/CE de la Commission et le règlement (CE) n°608/2004 de la Commission Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. *JOUE L 304 du 22/11/2011 p. 0018–0063*. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32011R1169&qid=1469527903985

Union Européenne, 2012. Règlement (UE) n°1151/2012 du Parlement européen et du Conseil du 21 novembre 2012 relatif aux systèmes de qualité applicables aux produits agricoles et aux denrées alimentaires. *JOUE L 343 du 14.12.2012, p. 1–29*. 1-19. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32012R1151

Union Européenne, 2015. Règlement (UE) 2015/2283 du Parlement européen et du Conseil du 25 novembre 2015 relatif aux nouveaux aliments, modifiant le règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant le règlement (CE) n°258/97 du Parlement européen et du Conseil et le règlement (CE) n°1852/2001 de la Commission (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). *JOUE L 327 du 11.12.2015, p. 1-22*.

Union Européenne, 2017. Règlement (UE) 2017/625 du Parlement européen et du Conseil du 15 mars 2017 concernant les contrôles officiels et les autres activités officielles servant à assurer le respect de la législation alimentaire et de la législation relative aux aliments pour animaux ainsi que des règles relatives à la santé et au bien-être des animaux, à la santé des végétaux et aux produits phytopharmaceutiques. *JOUE L 95 du 07.04.2017*.

Utrilla, M.C.; Ruiz, A.G.; Soriano, A., 2014. Effect of partial replacement of pork meat with an olive oil organogel on the physicochemical and sensory quality of dry-ripened venison sausages. *Meat Science*, 97 (4): 575-582. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.03.001

Valencia, I.; Ansorena, D.; Astiasaran, I., 2007. Development of dry fermented sausages rich in docosahexaenoic acid with oil from the microalgae Schizochytrium sp.: Influence on nutritional properties, sensorial quality and oxidation stability. *Food Chemistry*, 104 (3): 1087-1096. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.021

Valta, K.; Damala, P.; Orli, E.; Papadaskalopoulou, C.; Moustakas, K.; Malamis, D.; Loizidou, M., 2015. Valorisation opportunities related to wastewater and animal by-products exploitation by the greek slaughtering industry: current status and future potentials. *Waste and Biomass Valorization*, 6 (5): 927-945. http://dx.doi.org/10.1007/s12649-015-9368-1

Van Huis, A.; Van Itterbeeck, J.; Klunder, H.; Mertens, E.; Halloran, A.; Muir, G.; Vantomme, P., 2013. *Edible insects: future prospects for food and feed security*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO Forestry Paper n°171), (9251075964), 187 p.

Vayre, J.S.; Cochoy, F., 2019. L'intelligence artificielle des marchés : comment les systèmes de recommandation modélisent et mobilisent les consommateurs. *Les Études Sociales*, 169 (1): 177-201. http://dx.doi.org/10.3917/etsoc.169.0177

Verbeke, W., 2015. Profiling consumers who are ready to adopt insects as a meat substitute in a Western society. *Food Quality and Preference*, 39: 147-155. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.07.008

Verbeke, W.; Marcu, A.; Rutsaert, P.; Gaspar, R.; Seibt, B.; Fletcher, D.; Barnett, J., 2015a. 'Would you eat cultured meat?': Consumers' reactions and attitude formation in Belgium, Portugal and the United Kingdom. *Meat Science*, 102: 49-58. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.11.013

Verbeke, W.; Sans, P.; Van Loo, E.J., 2015b. Challenges and prospects for consumer acceptance of cultured meat. *Journal of Integrative Agriculture*, 14 (2): 285-294. http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(14)60884-4

Vermeiren, L.; Devlieghere, F.; Debevere, J., 2004. Evaluation of meat born lactic acid bacteria as protective cultures for the biopreservation of cooked meat products. *International Journal of Food Microbiology*, 96 (2): 149-164. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.016

Vialles, N., 1988. La viande ou la bête. *Terrain*, n° 10: 86-96. http://dx.doi.org/10.4000/terrain.2932

Villette, Y.; Theriez, M., 1981. Influence of birth-weight on lamb performances .2. Carcass and chemical-composition of lambs slaughtered at the same weight. *Annales De Zootechnie*, 30 (2): 169-182. http://dx.doi.org/10.1051/animres:19810204

Vollet, D.; Huguenin-Elie, O.; Martin, B.; Dumont, B., 2017. Bundles of services in grassland-based cheese production systems from preserved environment areas. *Inra Productions Animales*, 30 (4): 333-349.

Wakamatsu, J.; Hayashi, N.; Nishimura, T.; Hattori, A., 2010. Nitric oxide inhibits the formation of zinc protoporphyrin IX and protoporphyrin IX. *Meat Science*, 84 (1): 125-128. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.08.036

Wakamatsu, J.; Nishimura, T.; Hattori, A., 2004. A Zn-porphyrin complex contributes to bright red color in Parma ham. *Meat Science*, 67 (1): 95-100. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2003.09.012

Wakamatsu, J.I.; Okui, J.; Hayashi, N.; Nishimura, T.; Hattori, A., 2007. Zn protoporphyrin IX is formed not from heme but from protoporphyrin IX. *Meat Science*, 77 (4): 580-586. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.05.008

Wang, L.; Zhang, M.; Bhandari, B.; Yang, C.H., 2018. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220: 101-108. http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.029

Warner, R.D., 2019. Review: Analysis of the process and drivers for cellular meat production. *Animal*: 1-18. http://dx.doi.org/10.1017/S1751731119001897

Warner, R.D.; McDonnell, C.K.; Bekhit, A.E.D.A.; Claus, J.; Vaskoska, R.; Sikes, A.; Dunshea, F.R.; Ha, M., 2017. Systematic review of emerging and innovative technologies for meat tenderisation. *Meat Science*, 132: 72-89. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.04.241

Wegrzyn, T.F.; Golding, M.; Archer, R.H., 2012. Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 27 (2): 66-72. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2012.04.006

Weibel, C.; Ohnmacht, T.; Schaffner, D.; Kossmann, K., 2019. Reducing individual meat consumption: An integrated phase model approach. *Food Quality and Preference*, 73: 8-18. http://dx.doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.011

Weissmann, A.; Reitemeier, S.; Hahn, A.; Gottschalk, J.; Einspanier, A., 2013. Sexing domestic chicken before hatch: A new method for in ovo gender identification. *Theriogenology*, 80 (3): 199-205. http://dx.doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.04.014

Welin, S.; Van der Weele, C., 2012. Cultured meat: will it separate us from nature? In: Potthast, T.; Meisch, S., eds. *Climate change and sustainable development*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 348-351. http://dx.doi.org/10.3920/978-90-8686-753-0_52

Westhoek, H.; Rood, T.; Van den Berg, M.; Janse, J.; Nijdam, D.; Reudink, M.; Stehfest, E., 2011. *The protein puzzle : The consumption and production of meat, dairy and fish in the European Union*. The Hague: PBL Netherlands: Environmental Assessment Agency, 30 p.

Whitehead, C.C., 2004. Overview of bone biology in the egg-laying hen. *Poultry Science*, 83 (2): 193-199. http://dx.doi.org/10.1093/ps/83.2.193

Wiernasz, N.; Cornet, J.; Cardinal, M.; Pilet, M.F.; Passerini, D.; Leroi, F., 2017. Lactic Acid Bacteria Selection for Biopreservation as a Part of Hurdle Technology Approach Applied on Seafood. *Frontiers in Marine Science*, 4. http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2017.00119

World Economic Forum, 2019. *Meat : the Future series Alternative Proteins*: Oxford Martin School, Oxford University, 31 p.

Yang, F.L.; Zhang, M.; Bhandari, B.; Liu, Y.P., 2018. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *Lwt-Food Science and Technology*, 87: 67-76. http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.054

Yoon, H.S.; Lee, J.Y.; Kim, H.S.; Kim, M.S.; Kim, E.S.; Shin, Y.J.; Chu, W.S.; Ahn, S.H., 2014. A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1 (3): 261-279. http://dx.doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0

Zagorec, M.; Champomier-Verges, M.C.; Chaillou, S.; Leroy, S.; Christieans, S., 2015. La connaissance approfondie des communautés bactériennes des aliments et ses conséquences pour l'utilisation de la biopréservation. *Innovations Agronomiques*, 44: 15-24.

Zhang, W.A.; Xiao, S.; Samaraweera, H.; Lee, E.J.; Ahn, D.U., 2010. Improving functional value of meat products. *Meat Science*, 86 (1): 15-31. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.018

Zhang, Z.H.; Wang, L.H.; Zeng, X.A.; Han, Z.; Brennan, C.S., 2019. Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54 (1): 1-13. http://dx.doi.org/10.1111/ijfs.13903

Zhou, G.H.; Xu, X.L.; Liu, Y., 2010. Preservation technologies for fresh meat - A review. *Meat Science*, 86 (1): 119-128. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.04.033

Zhu, X.J.; Kaur, L.; Boland, M., 2018a. Thermal inactivation of actinidin as affected by meat matrix. *Meat Science*, 145: 238-244. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.027

Zhu, X.J.; Kaur, L.; Staincliffe, M.; Boland, M., 2018b. Actinidin pretreatment and sous vide cooking of beef brisket: Effects on meat microstructure, texture and in vitro protein digestibility. *Meat Science*, 145: 256-265. http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.029

Zhu, Y.; Guillemat, B.; Vitrac, O., 2019. Rational Design of Packaging: Toward Safer and Ecodesigned Food Packaging Systems. *Frontiers in Chemistry*, 7. http://dx.doi.org/10.3389/fchem.2019.00349

Conclusions

Auteurs : Sophie Prache et Véronique Santé-Lhoutellier (coord), Camille Adamiec, Thierry Astruc, Elisabeth Baeza-Campone, Pierre-Etienne Bouillot, Antoine Clinquart, Cyril Feidt, Estelle Fourat, Joël Gautron, Laurent Guillier, Emmanuelle Kesse-Guyot, Bénédicte Lebret, Florence Lefèvre, Bruno Martin, Pierre-Sylvain Mirade, Fabrice Pierre, Didier Rémond, Pierre Sans, Isabelle Souchon.

Sommaire

Conclusions 1002

1 Les propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale et les méthodes pour les évaluer 1002

2 Variabilité des propriétés des aliments d'origine animale 1004

2.1 Beaucoup de facteurs impliqués tout au long de la chaîne d'élaboration et des antagonismes à gérer 1004

2.2 Des propriétés stables, d'autres variables 1006

2.3 Des étapes majeures où se construit et où s'altère la qualité 1007

3 Authentification des conditions d'élaboration des aliments et de leur origine 1008

4 La recherche de compromis par l'analyse multicritère 1009

5 Les aliments d'origine animale et la santé humaine 1010

5.1. La couverture des besoins 1010

5.2 La question des antibiotiques dans les aliments d'origine animale 1010

5.3 Les études d'épidémiologie nutritionnelle : des risques accrus ou diminués selon les groupes d'aliments d'origine animale et un besoin de meilleure connexion entre communautés scientifiques 1010

5.4 Une consommation de protéines d'origine animale qu'il est possible de réduire pour certaines populations ; des sources protéiques alternatives en développement 1011

6. Les aliments d'origine animale standards et sous signe de qualité : quel équilibre entre les propriétés constitutives de la qualité, et quelle coexistence ? 1012

7. Enseignements pour la recherche et l'action publique 1015

7.1 Consommateurs : évolution des attentes et des comportements, information et formation 1015

7.2 Encourager des pratiques et systèmes d'élevage favorables à la qualité des aliments d'origine animale 1016

7.3 Développer des outils d'évaluation, de prévision, de pilotage et de contrôle de la qualité 1018

7.4 Lien entre la consommation des aliments d'origine animale et la santé humaine 1019

7.5 Inscrire les produits animaux dans une logique d'économie circulaire 1019

Conclusions

Les aliments d'origine animale font actuellement l'objet de débats sociétaux, notamment autour de questions d'éthique et d'impacts sur l'environnement et la santé humaine. Le niveau de consommation des produits d'origine animale par habitant est élevé dans les pays développés et la demande continue de croître au niveau mondial. Le niveau de consommation de viande, exprimé en total équivalent carcasse (TEC), était évalué à 85 kg par habitant et par an, en France, en 2015, et à 43 kg TEC/hab/an, au niveau mondial, en 2017. La consommation de viande par habitant a, cependant, tendance à diminuer aux échelles européenne et française (-3% et -12% entre 1990 et 2013).

Cette expertise collective, qui vise à analyser comment la qualité des aliments d'origine animale est élaborée et modulée par les conditions d'élevage et de transformation, contribue à éclairer ces débats. Elle considère les différentes propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale, c'est-à-dire qui leur confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites d'un utilisateur, ainsi que leurs effets sur la santé de l'homme. Les aliments d'origine animale considérés dans le périmètre de cette expertise comprennent les viandes de monogastriques (porcs, volailles) et de ruminants (bovins, ovins), la chair des poissons d'élevage, le lait (de vache, brebis et chèvre), les œufs de poule et les produits transformés qui en sont issus, qu'ils soient « standards » ou sous signe de qualité. Les procédés de transformation des produits bruts ont pour but de stabiliser les aliments d'un point de vue sanitaire, d'augmenter la durée de conservation, de valoriser les pièces les moins nobles et/ou les moins demandées (viande bovine à braiser utilisée en steaks hachés, pièces de porc valorisées dans pâtés, ou plats cuisinés, *etc.*), de diversifier l'offre et de proposer des produits faciles à cuisiner, faciles à conserver, voire prêts à consommer. Un des moyens fréquemment utilisés pour répondre aux enjeux microbiologiques et de durée de conservation est l'emploi d'ingrédients, notamment d'additifs alimentaires.

Cette expertise s'est également attachée à comprendre les comportements des consommateurs vis-à-vis de la qualité des aliments d'origine animale. Le statut d'omnivore des humains se caractérise par la capacité de leur appareil digestif à absorber des aliments, aussi bien d'origine végétale que d'origine animale ; les éléments nutritifs nécessaires à leur survie proviennent, ainsi, d'une variété d'aliments issus d'animaux et de végétaux. Ce statut concède aux mangeurs, à la fois une grande liberté d'adaptation aux biotopes, même les plus hostiles, mais les expose également au risque de contamination possiblement mortelle, les contraignant à manger des aliments reconnus culturellement. Les mangeurs oscillent donc entre plaisir et anxiété, néophilie et néophobie, pour élaborer leurs choix alimentaires. Ainsi, l'évaluation des risques face aux aliments ne saurait se réduire à des dimensions sanitaires objectives.

La question de l'authentification des procédés d'élaboration des aliments d'origine animale et de leur origine (race/souche animale, origine géographique), qui modulent leurs propriétés et donc *in fine* leur qualité, a également été abordée. Les demandes des consommateurs et l'engagement de certaines filières à travers des cahiers des charges, la complexité de la chaîne d'élaboration des produits et les risques de fraudes renforcent l'importance de ces questions, comme l'atteste la croissance exponentielle des études sur ce sujet.

Cette expertise se situe à la croisée d'évènements et de questionnements concernant l'alimentation et l'élevage, avec les récents Etats Généraux de l'Alimentation (EGA), fin 2017, et la mise en place du Programme National de l'Alimentation et de la Nutrition (PNAN), en 2019.

1 Les propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale et les méthodes pour les évaluer

Les propriétés des aliments d'origine animale constitutives de leur qualité ont été classées selon sept dimensions.

Les **propriétés sanitaires** d'un aliment sont relatives aux dangers associés à sa consommation (par exemple, flore bactérienne pathogène, résidus chimiques, contaminants environnementaux, composés néoformés lors des étapes de transformation). Elles sont des prérequis du fait du caractère périssable des aliments d'origine animale et des risques associés, et font l'objet d'une réglementation précise. Il convient de signaler que, quel que soit le type d'aliment, les opérateurs qui les produisent, les transforment et les distribuent sont légalement responsables en matière de sécurité sanitaire ; il leur revient d'analyser et de maîtriser les risques associés à ces aliments. Il faut préciser que, si la composition des produits bruts est assez bien documentée, la présence de composés issus des transformations (composés néoformés) et la question de

l'évaluation des risques associés (toxicité, interactions entre composés) est peu accessible ou de façon parcellaire dans la littérature scientifique.

Les **propriétés commerciales** sont à la base du paiement aux éleveurs et intéressent particulièrement les professionnels des filières animales. Elles dépendent du type de produit. Pour le lait, au-delà du volume livré, elles sont basées sur des critères sanitaires et de composition. Pour les autres produits animaux (viandes, poissons, œufs), elles reposent sur des critères de poids et d'aspect, voire d'homogénéité du lot. Elles ne préjugent pas d'autres propriétés importantes pour les consommateurs, telles que les propriétés organoleptiques et/ou nutritionnelles. Il y a ainsi un constat de primauté accordé aux propriétés commerciales et sanitaires des produits animaux, en Europe. Des études récentes sur la viande de ruminants s'intéressent à faire évoluer cette hiérarchie : elles visent à prédire, à l'abattoir, certaines propriétés organoleptiques de la viande pour les intégrer dans l'information aux consommateurs et le paiement aux éleveurs. Ces études s'inspirent d'un système développé en Australie que certains acteurs de différents pays européens travaillent à adapter, compte tenu des différences, entre l'Europe et l'Australie, dans les préférences des consommateurs et les types d'animaux produits. Le sujet fait débat : cette méthodologie est bien reçue par certains professionnels qui s'en inspirent, mais d'autres craignent qu'elle fasse concurrence au signe de qualité Label Rouge et qu'elle conduise à dévaloriser le troupeau allaitant au profit du troupeau laitier. Pour l'instant, au-delà de leur poids, le classement des carcasses des bovins, ovins et porcins est harmonisé au niveau européen : il est fondé sur la conformation et l'état d'engraissement pour les bovins et les ovins, selon la classification EUROP, et sur la teneur en viande maigre pour les porcins. Pour les filières bovines et ovines, l'évaluation de ces critères est souvent réalisée visuellement par des opérateurs agréés avec une part de subjectivité ; pour les porcins, des méthodes objectives de classement sont utilisées depuis plusieurs décennies. A l'instar des analyses rapides utilisées pour le paiement du lait à la qualité, le développement et l'application en ligne de méthodes spectrales pourraient également permettre d'élargir la gamme des propriétés évaluées pour la viande et la chair de poisson : organoleptiques (par exemple, persillé dans la viande), nutritionnelles (par exemple, profil en acides gras des lipides), sanitaires (par exemple, charge bactérienne, présence de résidus), technologiques (par exemple, capacité de rétention d'eau).

Les **propriétés organoleptiques** correspondent aux caractéristiques perçues par les organes sensoriels : couleur, texture, jutosité, odeur et flaveur. Elles intéressent particulièrement les consommateurs et affectent/motivent ? l'acte d'achat. Leur évaluation se heurte (1) à des difficultés méthodologiques : débat sur l'utilisation de jurys entraînés ou de consommateurs dits 'naïfs', dont les résultats ne sont pas toujours concordants, complexité des déterminants de la texture, de l'odeur et de la flaveur qui peut rendre fragile l'utilisation d'indicateurs, manque de méthodes prédictives robustes utilisables en ligne sur une chaîne d'abattage, et (2) à la variabilité des préférences entre pays/régions et entre consommateurs, liées à des habitudes alimentaires ou culturelles, ce qui questionne l'extrapolation des résultats obtenus dans une zone géographique donnée à une autre.

Les **propriétés nutritionnelles** d'un aliment reflètent sa capacité à répondre aux besoins alimentaires des consommateurs, capacité liée aux teneurs en nutriments. La biodisponibilité des nutriments est également importante. Les aliments riches en nutriments essentiels comparativement à leur apport calorique, et contenant des quantités modérées de nutriments à limiter (acides gras saturés, sodium, sucres) favorisent un bon état de santé. Des indicateurs nutritionnels, comme le Nutri-Score, récemment proposé en France, ont ainsi été développés pour classer les aliments en fonction de l'équilibre de leur composition en nutriments bénéfiques ou à limiter. Du fait de l'évolution des connaissances (par exemple, controverse sur le cholestérol, remise en cause du lien entre consommation d'acides gras saturés et maladies cardio-vasculaires) et des recommandations, les critères d'évaluation des propriétés nutritionnelles sont en constante évolution. Les études et modèles basés sur des indicateurs des propriétés nutritionnelles doivent, ainsi, être réactualisés en conséquence.

Les **propriétés technologiques** relèvent de l'aptitude de la matière première à la transformation (rendement après salage, fumage, affinage, cuisson, par exemple) et à la conservation, en lien avec sa composition (sensibilité à l'oxydation, au développement de microorganismes) et les modalités de conservation (durée, température, type d'emballage). Elles intéressent essentiellement les industriels de l'agroalimentaire. Les critères et indicateurs d'évaluation varient avec le type d'aliment (par exemple, viande *vs* lait) et le type de transformation (fromage au lait cru *vs* lait UHT, jambon cuit *vs* saucisson, par exemple). Certains critères physico-chimiques permettent de prévoir, en partie, le comportement de la matière première (pH des viandes, par exemple), mais on relève une difficulté de prédiction de ces propriétés sur la matière première.

Les **propriétés d'usage** renvoient à la praticité de l'aliment (économie de temps et d'efforts pour les consommateurs). Elles sont appréciées par le biais d'enquêtes. On relève que, même si ces propriétés prennent de l'importance avec le

développement des produits transformés « prêts à manger », les méthodes d'évaluation sont encore peu formalisées dans la littérature scientifique.

Les **propriétés d'image** découlent de la perception qu'ont les consommateurs des propriétés de l'aliment lui-même et/ou des processus qui ont conduit à son élaboration. Ces propriétés interagissent fortement avec les autres. Il y a, ainsi, souvent un écart de qualité « perçue », une fois les informations communiquées aux consommateurs sur les conditions d'élaboration de l'aliment et son origine, alors qu'en absence d'information, les consommateurs ne perçoivent pas forcément de différences sur les propriétés intrinsèques de l'aliment. Ces propriétés, très peu prises en compte il y a encore quelques années, ont désormais beaucoup d'importance dans l'acte d'achat, et de nombreux éléments peuvent jouer un rôle (éthique, bien-être animal, naturalité, proximité, impacts environnementaux, signes de qualité ou mentions valorisantes, *etc.*). Les méthodes, critères et indicateurs correspondants peuvent donc être nombreux et très variés. Ils sont également complexes à appréhender, définir et harmoniser. Les demandes des consommateurs et les recherches sont très évolutives, notamment sur l'étiquetage environnemental et du bien-être animal. Les impacts environnementaux occupent une place croissante dans ces propriétés d'image, mais sont complexes à évaluer. Ils peuvent varier fortement selon les systèmes d'élevage, mais le classement de ces derniers est largement dépendant du type d'impact (global, local) et de l'unité fonctionnelle choisie. Ainsi, des études récentes proposent de prendre en compte la qualité nutritionnelle de l'aliment dans le critère relatif à son impact climatique, par exemple en remplaçant l'indicateur d'émission de GES (kg éqCO_2) par kg de produit par celui d'émission de GES (kg éqCO_2) par g d'acides gras polyinsaturés n-3 contenus dans le produit. L'étiquetage du bien-être animal en cours de discussion au niveau de la France et de l'UE peut s'appuyer sur de récentes études à l'échelle européenne qui ont permis de développer des référentiels d'évaluation du bien-être animal dans les différentes filières animales. Enfin, la proximité et les circuits courts sont également des éléments de confiance qui influencent grandement les consommateurs.

Un front de science sur des outils de prévision de la qualité

L'analyse des méthodes utilisées pour évaluer les différentes propriétés biotechniques (commerciales, sanitaires, organoleptiques, nutritionnelles et technologiques) souligne leur grande diversité (chimique, biochimique, physique, évaluation sensorielle par jurys ou consommateurs, enquêtes), avec souvent la contrainte d'effectuer des prélèvements destructifs, qui ne peuvent être réalisés que tardivement dans la chaîne d'élaboration des aliments, et l'inconvénient d'analyses souvent longues et onéreuses. Les scientifiques travaillent actuellement au développement **d'outils peu ou pas invasifs**, utilisables en ligne pour **caractériser et prédire les propriétés des aliments** (ou de la matière première), ainsi que **gérer leur variabilité** en orientant l'aliment vers différents segments de marché, et la matière première vers différents procédés de transformation, ainsi qu'authentifier les conditions d'élaboration de l'aliment. Dans le domaine de la viande, des recherches s'intéressent également à des outils de prédiction applicables sur l'animal vivant pour détecter précocement les défauts de qualité afin d'orienter la viande vers un procédé de transformation adapté, voire orienter les pratiques d'élevage. Par exemple, un marqueur sanguin est en cours de développement pour essayer de repérer les porcs dont les viandes présenteront le défaut dit de « viande déstructurée ». Différentes démarches sont ainsi menées pour développer des outils prédictifs basés sur plusieurs types de marqueurs, biologiques (génomiques ou phénotypiques), physiques (méthodes spectroscopiques), ou pour développer des bases de données reliant les propriétés organoleptiques de la viande avec certaines caractéristiques des animaux, des carcasses et des viandes, en interaction avec les modalités de transformation (cuisson). On trouve des exemples dans la littérature, jusqu'à des niveaux de preuves de concept ; cependant, l'opérationnalisation reste encore faible, en raison des coûts associés, de la vitesse d'exécution ou encore du niveau de fiabilité.

2 Variabilité des propriétés des aliments d'origine animale

2.1 Beaucoup de facteurs impliqués tout au long de la chaîne d'élaboration et des antagonismes à gérer

L'analyse des facteurs responsables de la variabilité des propriétés des aliments d'origine animale montre que leur **qualité se construit** depuis les phases amont de l'élevage jusqu'à leur consommation, et que **la qualité peut s'améliorer**

ou se dégrader tout au long de la chaîne d'élaboration. Beaucoup de facteurs de variation sont impliqués dans cette variabilité, avec de possibles interactions entre eux, depuis les caractéristiques des animaux (espèce, type racial, type sexuel, âge), les conditions d'élevage, de transport et d'abattage pour la viande et la chair de poisson, de transformation, de conservation, de commercialisation, jusqu'à la préparation et la consommation. La littérature est abondante, notamment sur les facteurs d'élevage, mais il y a **peu de méta-analyses** sur l'effet de ces facteurs de variation.

En outre, il y a parfois des **antagonismes entre les différentes propriétés constitutives de la qualité**. Plusieurs études sur la viande de porc montrent, par exemple, une **altération des propriétés organoleptiques** (viande plus claire et plus exsudative) **et technologiques** (diminution de la capacité de rétention d'eau et du rendement technologique) **conjointement aux progrès réalisés sur les propriétés commerciales** (teneur en viande maigre). Par ailleurs, **une pratique d'élevage peut avoir des effets positifs sur certaines propriétés et des effets négatifs sur d'autres**. Par exemple, en pisciculture, le remplacement des matières premières alimentaires d'origine marine par des matières premières d'origine végétale terrestre améliore les propriétés d'image (moindre impact sur une ressource sauvage) et les propriétés sanitaires (moindre risques de contaminants dont les teneurs peuvent être élevées dans les farines et huiles de poisson), mais dégrade les propriétés nutritionnelles (baisse des teneurs en acides gras eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA)) et commerciales (baisse des rendements de découpe en lien avec une adiposité accrue). Pour la viande porcine, la non castration des porcs mâles est favorable aux propriétés d'image (bien-être animal) et commerciales (teneur en viande maigre plus élevée), mais défavorable aux propriétés organoleptiques (risques d'odeurs indésirables à la cuisson). Pour la viande ovine, l'élevage à l'herbe est favorable aux propriétés nutritionnelles et d'image du produit, mais défavorable à ses propriétés organoleptiques (risques d'odeurs indésirables) et commerciales (risque d'état d'engraissement insuffisant). Ces antagonismes potentiels renforcent la nécessité de la mise en œuvre d'évaluations multicritères de la qualité.

La palette des aliments à base de produits d'origine animale est très large car **les procédés de transformation physiques, mécaniques, biochimiques ou enzymatiques** sont multiples. Ces procédés ont, notamment, pour objectif de garantir la conservation des produits et d'en faciliter la distribution. A l'origine, il y a toujours une recette, souvent traditionnelle. Les établissements agro-alimentaires vont de la petite exploitation familiale traditionnelle à l'usine fortement mécanisée. Il ne faut pas oublier la restauration hors foyer et à domicile pour lesquelles les étapes de préparation peuvent être très variées (durée, température de chauffage…), et peuvent inclure une étape de réchauffage au four à micro-ondes. D'une manière générale, les transformations permettent de créer de la valeur dans un marché concurrentiel où les entreprises agro-alimentaires sont dans une perpétuelle recherche d'innovations, ce qui explique la rapide évolution technique dans ces industries. Cependant, des étapes et procédés de transformation peuvent être délétères pour certaines propriétés. Par exemple, pour les volailles, la formulation des nuggets conduit à passer d'un produit riche en protéines et à faible teneur en lipides (filet) à un produit élaboré riche en lipides, sucres et sel. La formulation est partie intégrante des recettes pour lesquelles divers ingrédients sont ajoutés, dont des additifs alimentaires (conservateurs, exhausteurs de goût, antioxydants, épaississants, colorants, …). Les aliments eux-mêmes peuvent résulter d'un assemblage plus ou moins complexe de différentes matières premières agricoles qui sont associées à des opérations de cuisson, de mélange, de fractionnement, de réassemblage, de formulation, *etc.*

Concernant les additifs alimentaires utilisés pendant la transformation des produits, leurs évaluations et autorisations sont réglementées au niveau européen, avec une liste positive d'additifs autorisés et pour beaucoup d'entre eux des teneurs maximales autorisées. L'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) réalise actuellement une réévaluation systématique des additifs autorisés avant le 20 janvier 2009. Celle-ci a débuté avec les colorants, et s'il est peu utilisé pendant la transformation des produits d'origine animale, le cas du E171 (dioxyde de titane) est emblématique. Des travaux récents chez le rongeur ayant permis d'identifier un danger potentiel associé à sa consommation (risque de promotion de la carcinogenèse colorectale), la mise sur le marché des denrées contenant cet additif a été suspendue au 1er janvier 2020. Cet exemple souligne le fait qu'aucune étude n'a encore évalué chez l'homme l'effet de l'exposition, via l'alimentation, aux cocktails d'additifs sur la santé. Si les teneurs maximales autorisées, établies principalement à partir d'études toxicologiques *in vitro/in vivo*, protègent en théorie des potentiels effets nocifs de chacun des additifs, les conséquences d'un apport cumulé et de potentiels effets cocktails restent très mal connus. Aucune étude n'a encore évalué les effets de l'apport simultané d'un large spectre d'additifs sur la santé chez l'Homme et ses liens avec le risque de pathologies telles que le cancer. Un projet vient de débuter impliquant l'INSERM, INRAE et le CIRC et combinant des études épidémiologiques et expérimentales pour quantifier les apports en additifs au niveau de la population française, quantifier leur association avec le risque de différents cancers et identifier les potentiels mécanismes impliqués. L'utilisation des nitrites

dans les charcuteries (E250 pour le nitrite de sodium, utilisé comme conservateur car il permet de limiter le développement de bactéries pathogènes), est actuellement débattue. S'il y a consensus pour conclure que la consommation de charcuteries est associée à une augmentation du risque de cancer colorectal, le rôle des nitrites dans cette association n'est pas tranché, les données épidémiologiques à disposition ne permettant pas de conclure quant au poids des nitrites dans cette association. L'EFSA a récemment rappelé que les nitrites contribuent à la formation des nitrosamines, dont certaines sont cancérigènes, mais qu'aux doses actuelles, les nitrites apportés par les charcuteries ne représentent pas un risque pour la population consommatrice. Toutefois, des travaux expérimentaux sur modèles animaux montrent un rôle des nitrites (en association avec le fer héminique des charcuteries) dans la promotion du cancer. Face à ces données parfois contradictoires sur le risque associé aux nitrites, il y a actuellement un débat sur la stratégie à adopter : interdire les nitrites (position de la Ligue contre le Cancer), taxer son utilisation (proposition d'amendement parlementaire) ou modifier les procédés de fabrication des charcuteries pour limiter le risque. Il convient aussi d'évaluer l'effet collatéral de leur suppression sur le risque sanitaire et les propriétés organoleptiques (couleur). Des recherches sont en cours actuellement sur des alternatives, pour garantir une innocuité sanitaire et un rendu organoleptique acceptable pour les consommateurs.

Par ailleurs, les modes de production des animaux peuvent impacter la charge en contaminants de leurs produits, dont les résidus de pesticides via les végétaux ingérés, pour lesquels l'impact des transformations est rarement étudié.

Plus globalement, il existe à ce jour un débat pour évaluer/quantifier le degré de formulation (composition) et de transformation (traitement thermique, séchage, …) sur la base de données fiables et robustes. En effet, aujourd'hui, les aliments qualifiés « d'industriels » sont au cœur de questionnements quant à leur incidence sur notre santé et notre environnement. Le nouveau Programme National Nutrition Santé (PNNS), en recommandant de privilégier l'utilisation de produits bruts et de diminuer la consommation d'aliments dits « ultra-transformés », souvent riches en lipides, en sel et en sucre, incite les scientifiques à affiner les classifications des aliments existantes. Cela reste encore un défi méthodologique. Les produits d'origine animale sont à la base de nombreux produits ou ingrédients entrant dans des recettes très diverses, avec des formulations et des procédés de transformation aussi très variés. Pour aider les consommateurs dans leurs choix, des classifications sont proposées, comme, par exemple, la classification NOVA, développée par des chercheurs brésiliens. Elle comporte quatre classes selon le degré de transformation/formulation, la quatrième contenant à elle seule 95 % des aliments, ce qui la rend peu discriminante. Cette classification manque cependant d'une base scientifique explicitant le niveau de transformation et de formulation, qui pourrait permettre de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents aux associations établies récemment entre la consommation d'aliments dits « ultra-transformés » et la santé.

Un point important pour proposer des leviers d'amélioration de la qualité des aliments d'origine animale est de distinguer les propriétés les plus variables de celles qui sont les plus stables tout au long de la chaîne d'élaboration, et les étapes majeures auxquelles se construit ou s'altère la qualité.

2.2 Des propriétés stables, d'autres variables

Certaines **propriétés varient peu avec les conditions d'élevage et de transformation**. C'est le cas, par exemple, des teneurs en protéines et minéraux et du profil en acides aminés de la viande et de la chair de poisson qui sont stables pour une espèce et un type de muscle et très peu affectés par le génotype, l'âge de l'animal et ses conditions d'élevage. De même, pour le lait, si sa teneur en protéines totales est variable, en revanche, la composition de celles-ci varie nettement moins. Le constat est le même pour les œufs. Il y a donc peu de leviers pour modifier cette composition, qui d'ailleurs est déjà quasiment optimale en regard des besoins nutritionnels de l'homme.

D'autres **propriétés sont au contraire très variables selon les conditions d'élaboration** de l'aliment. C'est le cas, par exemple, de la teneur en lipides des produits bruts, ainsi que de la composition en acides gras de ces lipides, qui influencent les propriétés nutritionnelles et organoleptiques, et qui varient beaucoup selon les conditions d'élevage et notamment d'alimentation de l'animal, ainsi que de transformation. On constate un effort de recherche dans toutes les filières animales, pour augmenter la teneur en Acides Gras PolyInsaturés (AGPI) n-3 (= oméga 3) des produits, en association avec des antioxydants pour préserver ou améliorer leurs propriétés nutritionnelles, sanitaires (effet antimicrobien de certains ingrédients antioxydants), organoleptiques (correction de la flaveur, limitation du rancissement), et technologiques (limitation de la peroxydation lipidique). Ces propriétés peuvent se construire aux deux étapes, à la fois, durant l'élevage (à

travers l'alimentation de l'animal) et lors de la transformation, en limitant les traitements thermiques à haute température et en conservant l'aliment en l'absence d'oxygène, par exemple. Chez les herbivores, l'alimentation à l'herbe permet d'obtenir de manière naturelle des produits laitiers et carnés de haute valeur nutritionnelle, plus riches à la fois en AGPI n-3 (acide alpha-linolénique (ALA), mais aussi en acides eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA)), en acide linoléique conjugué (CLA) et en antioxydants, et qui présentent une flaveur plus intense que ceux issus de systèmes d'élevage plus intensifs ; ces propriétés sont souvent valorisées à travers des Signes d'Identification de la Qualité et de l'Origine (SIQO). Ces intérêts nutritionnels, organoleptiques et d'image des produits laitiers et carnés issus d'animaux alimentés à l'herbe sont encore accrus avec de l'herbe de prairies diversifiées et/ou de montagne.

2.3 Des étapes majeures où se construit et où s'altère la qualité

Certaines étapes sont à risque pour la qualité de l'aliment, d'autres, à l'inverse, permettent de restaurer de la qualité ou de compenser une qualité médiocre à l'issue des étapes précédentes, ou encore d'anticiper des défauts de qualité. Enfin, certaines étapes peuvent agir en synergie dans la construction finale de la qualité de l'aliment.

2.3.1 Des étapes à risque pour la qualité

Certaines étapes de l'élaboration des aliments d'origine animale présentent des **risques majeurs de dégradation de sa qualité** :

Etape d'élevage. Dans certaines espèces animales, une sous-alimentation de la mère en gestation peut affecter le poids et la conformation de la carcasse de l'animal à naître, ainsi que le poids de certaines pièces nobles, même avec des conditions d'alimentation plus favorables ultérieurement ; la construction de la qualité commence alors avant même la naissance de l'animal. C'est le cas en élevage ovin viande ; au-delà, dans cette espèce, une sous-alimentation de la mère en gestation peut affecter la croissance ultérieure du jeune et obérer sa finition à l'herbe (favorable aux propriétés nutritionnelles et d'image de la viande) avant la fin de la saison de pâturage. En élevage laitier, la conservation de l'herbe sous forme d'ensilage peut favoriser la présence dans le lait de spores butyriques et induire ultérieurement des gonflements du fromage, en particulier à pâte pressée cuite, et des goûts/odeurs désagréables liés au développement de micro-organismes produisant de l'acide butyrique, ce qui conduit certaines filières fromagères à interdire cette pratique. L'étape d'élevage est également à risque pour la contamination chimique. L'accès au plein air expose les animaux aux contaminants environnementaux (contact ou ingestion de contaminants chimiques dans les sols et les végétaux, contamination par des agents pathogènes présents dans l'écosystème et la faune), avec des répercussions possibles sur la viande, le lait et surtout les œufs qui captent particulièrement les contaminants chimiques. L'autoconsommation d'œufs à partir d'élevages 'de fond de jardin' conduit aux expositions les plus élevées et pose des questions de santé publique. La contamination peut aussi s'effectuer par les aliments composés et le contact avec des matériaux traités (bâtiments) ou des litières issues de matières recyclées. Une préconisation serait de réaliser un diagnostic de l'environnement (dont les matériaux et bâtiments) avant l'installation des élevages, incluant les activités émettrices à proximité, présentes et passées.

Etape d'abattage. Les conditions de pré-abattage et d'abattage des animaux, quelle que soit l'espèce, revêtent une importance capitale car elles peuvent affecter l'ensemble des propriétés constitutives de la qualité, notamment les propriétés sanitaires, organoleptiques et technologiques. Outre l'impact évident sur le bien-être animal et l'image négative que renvoient de mauvaises conditions d'abattage, le stress de pré-abattage et une mauvaise maîtrise de la technologie d'abattage (système d'étourdissement, saignée et éviscération, refroidissement et stockage des carcasses) peuvent conduire à des défauts de qualité de la viande et de la chair de poisson.

Etape de cuisson. L'étape de cuisson, qui est essentielle pour la maîtrise des dangers microbiologiques, est également à risque pour les propriétés organoleptiques (défaut de texture si la durée et la température de cuisson sont mal adaptées) et nutritionnelles, ainsi que pour les effets sur la santé, à travers la formation de certains composés néoformés. Si certains de ces composés ont un rôle positif en concourant au développement de l'odeur et du goût, d'autres sont délétères pour la santé comme les amines hétérocycliques aromatiques (AHA) ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui sont cancérigènes. Il faut noter que c'est surtout la cuisson au barbecue (charbon de bois) qui génère les AHA et les HAP. Cependant, les effets de l'étape de cuisson à l'échelle domestique restent très peu renseignés dans la littérature.

2.3.2. Des étapes restauratrices de qualité, compensatrices ou anticipatrices de défauts de qualité

A l'inverse, certaines étapes de l'élaboration des aliments d'origine animale permettent de **restaurer** de la qualité ou de **compenser une qualité médiocre à l'issue des étapes précédentes** ou encore **d'anticiper des défauts de qualité**.

Etape d'élevage. C'est le cas, par exemple, des stratégies d'alimentation des poissons qui peuvent permettre de restaurer en fin de phase d'élevage les teneurs en EPA et DHA après une période d'alimentation végé-substituée (substitution des produits animaux d'origine aquatique par des produits végétaux terrestres).

Etape de transformation. L'étape de transformation peut permettre également de corriger un défaut de qualité. Les traitements thermiques appliqués au lait avant sa transformation, en limitant les risques de développements de bactéries pathogènes ou indésirables, permettent de corriger des défauts d'hygiène lors de la traite ou la collecte du lait. Le hachage de la viande bovine solutionne les défauts de tendreté pour les morceaux de l'avant de la carcasse riches en collagène. En filière porcine, les transformateurs cherchent à repérer les viandes de mâles non castrés qui présentent des odeurs indésirables, pour les valoriser, tout en réduisant le risque de rejet des aliments par les consommateurs, en les diluant en faible proportion dans les mêlées de produits de charcuterie, par l'ajout d'arômes et épices, ou par l'élaboration d'aliments à consommer froids ou fumés. L'ajout d'antioxydants dans l'alimentation animale ou pendant la transformation de la viande permet de limiter les effets délétères éventuels sur les propriétés nutritionnelles et la valeur santé (limitation de la peroxydation lipidique et de la nitrosation dans le tractus digestif).

Etape de consommation. Les pratiques alimentaires peuvent permettre de limiter de potentiels effets délétères de certains aliments d'origine animale lorsqu'ils sont consommés en excès. Pour les consommateurs peu sensibles aux recommandations de limiter la consommation de viande rouge et de charcuteries, une proposition est d'associer ces aliments au cours du repas avec un produit laitier riche en calcium ou un aliment riche en antioxydants afin de limiter la peroxydation lipidique et le risque de carcinogénèse colorectale.

2.3.3. Des étapes qui ont des effets synergiques sur la qualité

La qualité des aliments peut aussi se **construire et s'améliorer aux différentes étapes de leur élaboration, par une synergie entre facteurs influençant les propriétés qualitatives.** Par exemple, en filières porcine ou fromagère, la race des animaux, leurs conditions d'élevage et d'alimentation (élevage extensif, ressources alimentaires locales), l'âge et le poids à l'abattage, ou les conditions de conservation et de collecte, le cas échéant, et les conditions spécifiques de transformation (matières premières mises en œuvre, conditions et durée de maturation/affinage) interagissent pour aboutir à des aliments aux propriétés organoleptiques, nutritionnelles et d'image spécifiques, souvent valorisées par des Appellations d'Origine Protégée.

3 Authentification des conditions d'élaboration des aliments et de leur origine

L'analyse de la littérature montre qu'il y a beaucoup plus d'études sur **l'authentification des conditions d'élevage** de l'animal dont est issu l'aliment que sur celle **des conditions de transformation et de conservation** de l'aliment. Si les méthodes de contrôle de **l'adultération d'espèce** (mélanges frauduleux de viandes ou de laits de différentes espèces animales) sont opérationnelles, les travaux conduits jusqu'à présent sur les autres enjeux d'authentification (élevage à l'herbe de l'animal, par exemple) ont, pour beaucoup, été de type **'preuve de concept'**. Ils ont en effet comparé des modalités contrastées d'élaboration de l'aliment ou de son origine, favorables à la discrimination de ces modalités (par exemple, alimentation à l'herbe de l'animal *vs*. alimentation à base de concentrés ou d'ensilage de maïs), avec souvent un nombre assez faible d'échantillons. Il est nécessaire maintenant de tester la fiabilité de ces méthodes dans de multiples conditions d'élevage, sur des effectifs plus importants et de développer des bases de données suffisantes pour passer au stade opérationnel.

4 La recherche de compromis par l'analyse multicritère

Des antagonismes ayant été identifiés entre les différentes propriétés constitutives de la qualité ou entre les attentes des utilisateurs, un des moyens de gérer ces antagonismes, tout en prenant en compte la durabilité des systèmes de production et de transformation, est de procéder à une **analyse multicritère**. L'impact environnemental qui quantifie la consommation de ressources et l'émission de substances polluantes et/ou dangereuses, est souvent évalué au moyen d'une analyse du cycle de vie (ACV). L'ACV est une méthode d'évaluation normalisée qui permet de comparer entre eux des aliments, des procédés ou des services, sur la base d'une unité fonctionnelle dont le choix est primordial. Dans les ACV portant sur les produits alimentaires, l'unité fonctionnelle dominante est la masse de produit, mais des études montrent qu'une **unité fonctionnelle en lien avec la composition du produit** (émissions de GES (kg éqCO_2) par g d'acides gras polyinsaturés n-3 contenus dans le produit, ou par surface en terres arables nécessaires à la production d'une tonne de protéines) permet d'améliorer la compréhension de l'impact environnemental lié à la fonction essentielle de l'alimentation, se nourrir. La question de la méthode d'allocation des impacts environnementaux entre les différents co-produits est aussi cruciale. Il s'agit de décider sur quelle base répartir les impacts entre, par exemple, le lait et la viande au sein d'un élevage laitier, ou entre les différentes fractions obtenues après la découpe d'un animal (viande, graisses, os, peau…).

Les évaluations multicritères portant sur les produits laitiers se concentrent beaucoup sur la production à la ferme, beaucoup moins sur la transformation, excepté la transformation en quelques produits laitiers bien ciblés : fromages, yaourts, beurre ou leurs substituts végétaux (margarine, par exemple). La plupart des études ayant trait à la viande s'arrêtent à la sortie de l'exploitation agricole, et calculent les impacts liés à la production d'un kilogramme d'animal vivant. Les études prenant en compte l'impact des étapes aval comme le transport, l'abattage, la découpe, la transformation, la conservation au froid et la consommation sont rares, car elles requièrent l'intégration de données propres aux filières, notamment celles en lien avec la transformation qui sont souvent protégées par le secret industriel. Les études prenant en compte la durabilité des procédés de transformation portent souvent sur l'opération de nettoyage, à cause de son impact environnemental élevé (énergie, utilisation et rejet de produits chimiques), notamment en industrie laitière. Cependant, ces études ne prennent que très peu en compte la qualité des produits transformés sur toute la chaîne allant de la production à la consommation.

Les bases méthodologiques sont donc aujourd'hui disponibles pour évaluer les antagonismes et **proposer des compromis,** en lien avec les différents volets de la qualité et les attentes des différents acteurs de la chaîne alimentaire. Les connaissances scientifiques permettent également de construire les indicateurs correspondant aux sept propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale. Leur mise en œuvre nécessite, cependant, de définir les objectifs de l'évaluation et les critères à évaluer, de choisir et développer les indicateurs correspondants et de construire le modèle d'évaluation.

Certaines évaluations multicritères s'appuient sur des consultations d'experts des différents maillons des filières, dès le début du processus d'analyse, pour le choix des indicateurs et la manière d'agréger les critères, alors que d'autres évaluations mobilisent beaucoup moins ces compétences et uniquement en fin du processus, lorsque les arbitrages (pondérations) sont à faire. Plusieurs niveaux d'utilisation de ces méthodes et indicateurs sont donc envisageables. Au niveau des entreprises, les méthodes d'optimisation multicritères basées sur des modèles mathématiques et/ou physiques sont des outils pertinents d'amélioration de la performance. En revanche, dans le cas d'une prise de décision concernant le choix de systèmes de production et/ou pratiques d'élevage, de transformation et le mode de consommation, les méthodes d'analyses multicritères servant à identifier l'ensemble des solutions possibles doivent être couplées à des outils d'aide à la décision afin d'identifier la ou les solutions offrant le meilleur compromis. Si les scientifiques peuvent aider à déterminer les différents indicateurs à prendre en compte dans l'analyse, les décideurs/représentants ont un rôle essentiel dans la définition des scénarios à évaluer et dans la pondération à donner aux différents critères en fonction de leurs objectifs. Cependant, des études sont encore à mener afin de réellement intégrer les dimensions économiques et sociales dans ces approches. L'évaluation économique des systèmes de production et de transformation consiste à traduire l'impact économique de ces systèmes en termes de coûts/bénéfices et donc, de valeurs monétaires. Faute de données suffisantes, l'évaluation de l'impact social reste, à ce jour, très peu abordé en comparaison des impacts environnementaux et économiques, malgré le développement du concept d'ACV « sociale ». L'analyse multicritères est **un front de science, avec un besoin de recherche important.**

5 Les aliments d'origine animale et la santé humaine

5.1. La couverture des besoins

Les aliments d'origine animale ont longtemps bénéficié d'une image très positive (le 'cœur' de la fourniture de protéines, en particulier pour la viande). Une des caractéristiques majeures des aliments d'origine animale est leur **teneur élevée en protéines de bonne qualité nutritionnelle** ; la **vitamine B12** et les **AGPI à longues chaînes** leur sont également spécifiques. Sans la consommation de ces aliments, il est nécessaire de recourir à des compléments alimentaires pour couvrir les apports nutritionnels conseillés (ANC) en vitamine B12 et DHA. Les aliments d'origine animale permettent également de couvrir plus facilement que les aliments d'origine végétale les besoins en de nombreux **minéraux** (fer pour la viande, calcium pour le lait, par exemple), et ainsi d'éviter les déficits voire les carences, notamment chez les personnes les plus à risque (personnes âgées, femmes en âge de procréer, enfants). Les effets à long terme d'une absence de consommation d'aliments d'origine animale sur la santé ne sont pas encore bien connus. Il est difficile, en effet, de réaliser des études épidémiologiques d'envergure sur les populations végétaliennes, car elles sont peu représentées, y compris à l'échelle mondiale. Au niveau de la population européenne, on observe une **consommation moyenne insuffisante en AGPI n-3 et un rapport AGPI n-6/AGPI n-3 trop élevé**. Ce constat a poussé les filières animales à repenser les modalités d'élaboration des aliments d'origine animale pour améliorer la qualité nutritionnelle de leur fraction lipidique.

5.2 La question des antibiotiques dans les aliments d'origine animale

L'utilisation d'intrants médicamenteux, dont les antibiotiques, pour soigner les animaux malades, éviter la propagation de maladies, ou jusque dans les années 2000 pour protéger des animaux en situation de fragilité et favoriser ainsi leur croissance, s'est développée avec l'augmentation du niveau de productivité des filières animales. L'emploi d'antibiotiques chez les animaux d'élevage pose la question des conséquences pour la santé humaine, particulièrement en raison de la transmission de l'animal vers l'Homme de bactéries résistantes à un ou plusieurs antibiotique(s). Le non-respect des règles d'utilisation des antibiotiques (posologie, voie d'administration, délai entre la dernière administration et la commercialisation du produit) peut conduire à la présence de résidus dans les aliments au-delà de la Limite Maximale de Résidus fixée réglementairement. Les plans de contrôle officiels montrent que les non-conformités sont rares (0% pour le lait, 0,24% et 0,7% pour les viandes de volailles et les viandes bovines, 0,43% pour les œufs).

Par ailleurs, les pouvoirs publics ont mis en place des plans destinés à un usage plus raisonné des antibiotiques : leur utilisation dans l'alimentation des animaux comme facteurs de croissance a ainsi été interdite dans l'UE en 2006. Les méthodes préventives basées sur les bonnes pratiques en élevage et la biosécurité, ainsi que des alternatives aux antibiotiques (probiotiques, prébiotiques, symbiotiques, phytothérapie) ont permis de relever ce défi. Un rapport de l'ANSES montre qu'en France, l'exposition globale des animaux d'élevage aux antibiotiques a diminué de 38,4%, entre 2011 et 2017. Enfin, des règles plus strictes d'utilisation de certaines classes d'antibiotiques (dits antibiotiques critiques) ont été établies, dans le but de limiter l'apparition des résistances bactériennes. La liste de ces antibiotiques est régulièrement mise à jour pour tenir compte de l'avancée des connaissances scientifiques dans le domaine (ANSM, 2016).

5.3 Les études d'épidémiologie nutritionnelle : des risques accrus ou diminués selon les groupes d'aliments d'origine animale et un besoin de meilleure connexion entre communautés scientifiques

La place des aliments d'origine animale dans notre alimentation en lien avec la santé est questionnée avec de nombreux articles issus d'études épidémiologiques et des études mécanistiques pour certaines pathologies. Les données épidémiologiques issues de méta-analyses montrent que la consommation d'aliments d'origine animale peut avoir des effets positifs sur la santé, ou des effets négatifs **s'ils sont consommés en excès**. Elles montrent que la consommation de **poisson** est associée à une diminution de 7% du risque de mortalité et que celle de **produits laitiers** est associée à une diminution

de 13% du risque de cancer colorectal, avec un niveau de preuve élevé dans les deux cas. A l'inverse, des risques accrus sont liés à des consommations excessives de **charcuteries** et de **viandes de boucherie** hors volailles, ce qui conduit à recommander des seuils de consommation pour ces groupes de produits, repris dans le PNAN. Pour les charcuteries, une augmentation de consommation de 50 g/j est associée à une augmentation du risque de mortalité et du risque du cancer colorectal (de 23% et 16%, respectivement), avec un niveau de preuve convaincant ; les recommandations sont de limiter la consommation de ces aliments à 150 g/semaine. Ces études montrent également qu'une augmentation de 100 g/j de la consommation de viandes de boucherie augmente le risque de mortalité et de cancer colorectal (de 10% et 12%, respectivement), avec un niveau de preuve probable, les recommandations étant de limiter la consommation de ces aliments à 500 g/semaine. Les données de consommation en France obtenues soit à partir d'enquêtes alimentaires, soit à partir des statistiques de la FAO établies sur la base des abattages et des importations/exportations sont concordantes : elles s'établissent à **53 g/j pour la viande de boucherie et 35 g/j pour la charcuterie** ; deux tiers des français dépassent le niveau de consommation recommandé pour la charcuterie et un tiers celui recommandé pour la viande de boucherie.

Ces études épidémiologiques et recommandations nutritionnelles **ne prennent cependant pas en compte la grande variabilité de composition des aliments liée à leur élaboration** (conditions d'élevage des animaux dont ils sont issus, fractions (maigre, gras) entrant dans leur préparation, degré ou type de transformation ou de formulation, composés néoformés, exposition à des contaminants, *etc.*). Par exemple, au sein des deux classes de produits que sont la charcuterie et la viande de boucherie, on trouve une grande variété d'aliments ayant des compositions très variées (teneurs en lipides, fer, sel, nitrites, antioxydants, profil en acides gras, *etc.*) et ayant subi des procédés technologiques divers (cuisson, séchage, fermentation, …). Le même constat peut être fait pour les produits laitiers. **Il manque indubitablement un indicateur composite** reflétant le degré de changements de composition et de structure opérés par la(es) transformation(s) des aliments. Par ailleurs, si des liens ont été établis entre le niveau de consommation d'aliments dits « ultra-transformés » et la santé, les classifications actuelles des aliments manquent d'une base scientifique explicitant les niveaux de transformation et de formulation pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et orienter les conditions d'élaboration des aliments.

Les études épidémiologiques à la base de l'évaluation de l'effet santé des aliments d'origine animale ne permettent donc pas d'évaluer l'impact de la variabilité des caractéristiques de ces aliments sur leur effet santé. **Il apparait donc un besoin d'une meilleure connexion et d'une interdisciplinarité renforcée entre les communautés scientifiques à l'échelle de l'élevage, de la transformation, des nutritionnistes et de l'épidémiologie,** pour mieux comprendre les liens entre la qualité des aliments d'origine animale et la santé, identifier les mécanismes sous-jacents à l'échelle de l'élevage (par exemple, conditions d'élevage, utilisation des antibiotiques, résidus de pesticides, produits standards *vs.* sous SIQO, *etc.*), de la transformation et de la formulation (utilisation d'additifs, produits néoformés…) et de la consommation des aliments (produits néoformés lors de la préparation à domicile), pour aller au-delà des associations établies actuellement.

Enfin, sur ces aliments associés, à la fois à des risques et à des bénéfices nutritionnels, le soutien au développement des approches bénéfices/risques (Approche EVCI « espérance de vie corrigée de l'incapacité » ou DALY en anglais « Disability Adjusted Life Years ») pourrait permettre d'élaborer une image globale de l'effet santé des aliments d'origine animale. Les données sont pour beaucoup disponibles et d'un point de vue méthodologique, cet objectif est atteignable.

5.4 Une consommation de protéines d'origine animale qu'il est possible de réduire pour certaines populations ; des sources protéiques alternatives en développement

En Europe, la consommation moyenne de protéines entre 18 et 65 ans dépasse de beaucoup les quantités requises pour couvrir les besoins minimaux de l'organisme. En France, la consommation moyenne dans cette tranche d'âge est de 1,14 g/kg/j (ANSES 2017), pour une recommandation de 0,83 g/kg/j (ANSES, 2019). Par ailleurs, l'OMS recommande un équilibre alimentaire de 50:50 entre les protéines animales et végétales, alors que dans les pays occidentaux, le rapport est proche de 65:35. Dans un contexte d'augmentation de la demande mondiale en aliments d'origine animale, lié à l'augmentation de la population mondiale et à l'élévation de son niveau de vie, il est raisonnable de réduire la consommation de protéines animales dans les pays occidentaux pour des raisons de sécurité alimentaire mondiale et d'équilibre alimentaire. Cette transition alimentaire vers des repas moins riches en protéines animales est actuellement poussée par les débats sur l'éthique et l'impact environnemental de l'élevage. Il ne faut cependant pas oublier que ces chiffres globaux cachent des disparités. Même dans les pays développés, on observe des populations pour lesquelles la consommation en protéines, et

particulièrement d'origine animale, est très limitée voire insuffisante (personnes âgées, populations en situation de précarité). Le message de réduction de consommation d'aliments d'origine animale **devrait cibler ainsi, en premier lieu, les gros consommateurs de produits carnés**.

Les débats autour de la consommation d'aliments d'origine animale sont à l'origine d'études sur des sources de protéines alternatives (protéines végétales ou alternatives plus radicales) et leur acceptabilité. Des études prospectives sur des aliments qui n'existent pas encore sur le marché (viande *in vitro*) ou méconnus de nos aires culturelles (aliments à base d'insectes) montrent i) que la **viande issue de l'élevage demeure profondément inscrite dans les habitudes alimentaires** et ii) que les nouveaux aliments (*disruptive foods*) nécessitent de ressembler à de la viande (exemple des simili viandes ou *meat analogs* d'origine végétale), ou bien de s'éloigner d'une origine animale (exemple des barres protéinées). **La viande est un marqueur social**. Chez les classes supérieures plus riches et éduquées, sa valeur a été modifiée par les questions d'éthique, d'impact environnemental et de santé qu'elle soulève, expliquant que, dans ces catégories socioprofessionnelles, sa consommation diminue globalement et se concentre sur les produits les plus nobles. Pour les populations de plus faible statut socio-économique, sa consommation augmente grâce à une gamme d'aliments d'origine animale très accessible financièrement, souvent au détriment de leur qualité nutritionnelle ; il faut donc signaler qu'une taxation sur la viande, parfois proposée pour en réduire la consommation et les impacts environnementaux correspondants, toucherait donc plus ces populations. **Des recherches sur l'adoption d'alternatives à la viande** sont nécessaires**, pour comprendre les leviers et les freins aux pratiques de substitution entre aliments selon les populations, les facteurs déclenchants de cette adoption à l'échelle individuelle** (parcours de vie) **et les modalités de la transition d'un régime alimentaire vers l'autre** (passage par les *meat analogs* ou non, par exemple).

6. Les aliments d'origine animale standards et sous signe de qualité : quel équilibre entre les propriétés constitutives de la qualité, et quelle coexistence ?

6.1 Deux grandes tendances de fond en parallèle : l'augmentation de la consommation d'aliments préparés et « prêts à manger » et l'augmentation de la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique

Deux grandes tendances de fond caractérisent l'évolution des comportements de consommation : d'un côté, un transfert des produits bruts vers les produits transformés, avec, en particulier, une **augmentation de la consommation de produits élaborés, voire 'prêts à manger'** et, de l'autre, une **augmentation de la consommation de produits issus de l'agriculture biologique** (qu'ils soient bruts ou transformés). Ces deux dynamiques concernent toutes les filières, bien qu'à des degrés variables. Leur évolution rapide invite à **mieux anticiper les attentes des consommateurs** et plus largement les attentes sociétales, **mieux comprendre les motivations sous-jacentes**, pour **mieux orienter les changements correspondants dans les conditions d'élaboration des aliments d'origine animale**. Les plans de filière français, proposés à la suite des EGA, fin 2017, se placent dans une perspective d'augmentation de la part du bio, et plus largement des produits sous SIQO.

6.2 Différents modèles de production/transformation : quel équilibre entre les propriétés constitutives de la qualité et quelle co-existence ?

Il y a une grande diversité dans les modèles de production/transformation, qui co-existent, avec deux modèles extrêmes. Un modèle « dominant agro-industriel » qui produit pour un marché 'de masse', avec un objectif de rendement maximal, de produits homogènes, toujours disponibles et vendus à des prix accessibles au plus grand nombre. Un modèle « alternatif » mettant sur le marché des produits différenciés, pour lequel la concurrence porte largement sur des dimensions hors-prix (différenciation par la qualité).

Le premier modèle privilégie la productivité par animal (voire par unité de surface, ou par 'atelier') et les propriétés commerciales du produit, ce qui a fortement orienté la sélection génétique dans les filières animales, et les pratiques d'élevage. Cette priorité sur le rendement et les propriétés commerciales a permis des gains considérables (de production quantitative, rendement, vitesse de croissance, efficacité alimentaire, proportion de viande maigre dans la carcasse, *etc.*) dans toutes les filières, et a contribué à l'exportation de produits animaux vers l'Europe ou les pays tiers. Cependant, elle a parfois conduit à des effets délétères sur certaines propriétés des produits, ainsi que sur le bien-être des animaux et plus largement l'acceptabilité sociale des modèles d'élevage correspondants. On observe ainsi des effets négatifs collatéraux à ce choix « monolithique ». Un des exemples emblématiques concerne la prévalence des défauts du tissu musculaire et de qualité de la viande dans les productions de volailles et de porcs. Ainsi, dans la production de poulet standard, sélectionné sur le rendement en filet, deux types de défauts du tissu musculaire sont désormais largement présents : le « wooden breast » et le « white stripping », dont la prévalence a fortement progressé au cours de la dernière décennie, en France, en Europe et dans le Monde. La physiologie et la fonction du tissu musculaire sont altérées, avec le développement d'une fibrose et l'accumulation de tissu adipeux, qui au-delà du bien-être des animaux, altèrent les propriétés organoleptiques, nutritionnelles et technologiques, et conduisent à valoriser ces filets dans des aliments 'prêts à consommer'. Chez le porc, le défaut dit de « viande déstructurée », détectable seulement après l'abattage, se traduit par la perte de l'intégrité tissulaire et l'apparition de défauts d'aspect et de texture du jambon cuit (trous dans les tranches, texture « pommade ») entrainant des pertes économiques importantes. A ce jour, l'étiologie de ces défauts n'est pas totalement élucidée. Ces deux exemples soulèvent des interrogations sur les effets collatéraux d'une sélection basée majoritairement sur un critère de productivité/rendement.

Par ailleurs, cette priorité sur la productivité par animal et les propriétés commerciales du produit a fortement orienté la sélection génétique et le type d'animal vers une spécialisation pour une seule fonction productive. Cette orientation conduit à des difficultés de valorisation d'animaux ou de produits ne rentrant pas dans les 'canons' de la qualité commerciale ou n'étant pas calibrés pour les procédés industriels (poussins mâles dans la filière poules pondeuses, chevreaux mâles dans la filière caprin lait, veaux mâles issus des troupeaux laitiers dans certains pays). Ces difficultés relancent l'intérêt pour les races ou souches mixtes, qui présentent un bon compromis entre œufs et viande ou lait et viande, et pour le croisement de races. Des recherches sont ainsi en cours dans la filière œufs sur l'utilisation de lignées de poules à double finalité (production d'œufs et de viande), afin de trouver des réponses à ces questions éthiques. Une autre alternative à l'étude est la détection du *sexe in ovo*. Enfin, la priorité donnée au rendement et aux propriétés commerciales peut rendre difficile l'adoption de pratiques plus agro-écologiques dans certaines filières animales. Ainsi, la sélection pour l'accroissement de la masse musculaire chez les bovins et les ovins allaitants rend maintenant difficile la finition des jeunes animaux à l'herbe, pourtant favorable aux propriétés nutritionnelles et d'image de la viande ; après le sevrage, les jeunes bovins mâles issus des systèmes allaitants sont en majorité exportés vers des ateliers d'engraissement, où ils sont alimentés avec des rations à base d'ensilage de maïs et/ou de concentrés. Des recherches étudient actuellement l'intérêt d'un croisement de races bovines françaises, classiquement tardives, avec des races herbagères précoces (type Angus) pour produire de la viande à partir d'animaux jeunes engraissés à l'herbe.

Les produits animaux sous SIQO trouvent souvent leur place dans le second modèle. L'analyse de différents cahiers des charges (CDC) des produits sous Signes d'Identification de la Qualité et de l'Origine (Agriculture Biologique AB, Appellation d'Origine Protégée AOP, Indication Géographique Protégée IGP, Label Rouge LR, Spécialité Traditionnelle Garantie STG) et de trois mentions (Haute Valeur Environnementale HVE, produits fermiers, produits de montagne) montre des points communs. Tous les CDC s'affichent sur les propriétés d'image. Pour certains SIQO, les spécifications des CDC renvoient aux propriétés organoleptiques : le LR s'engage sur une qualité supérieure et les AOP et IGP mettent en avant des propriétés organoleptiques différentes, basées sur la typicité et la spécificité du produit. Les spécifications des CDC renvoient aussi à certaines propriétés sanitaires (par exemple : limitation des traitements médicamenteux, interdiction des traitements hormonaux et des pesticides pour l'AB). Comme pour l'AB, certains des engagements des SIQO LR, AOP, IGP, STG peuvent avoir un impact positif sur les autres propriétés, en particulier nutritionnelles et sanitaires, du produit. Par ailleurs, si tous les produits issus d'un élevage en AB peuvent potentiellement être commercialisés sous ce signe de qualité, ce n'est pas le cas pour d'autres SIQO, notamment le LR où les produits issus d'un même élevage ne sont pas tous labellisables, en raison d'obligations de résultats sur des indicateurs de qualité ; par exemple, les bovins mâles entiers et certaines carcasses de conformation et/ou d'état d'engraissement jugés insuffisants ne sont pas éligibles à labellisation dans le LR Gros Bovins de

boucherie. L'analyse des spécifications des CDC de jambon sec (caractéristiques de l'animal, conditions d'élevage, d'abattage, de transformation et de conditionnement) montre que les différents SIQO n'accordent pas la même importance aux différentes étapes de la chaine d'élaboration, les CDC LR et AB étant polyvalents et garantissant un à plusieurs items des spécifications listées plus haut, alors que le STG porte uniquement sur les conditions de transformation et n'intègre pas les dimensions amont sur l'animal et ses conditions d'élevage.

Le Label Rouge Gros Bovins de boucherie est un bon exemple de construction et d'amélioration de la qualité tout au long de la chaîne d'élaboration du produit, à travers des choix initiaux (race), des engagements quant aux conditions d'élevage, de transport et d'abattage, ainsi que de maturation de la viande et des tris successifs (sur le type d'animal, les carcasses et les viandes éligibles).

Hormis le Label Rouge régi au niveau français, les SIQO sont régis par la règlementation européenne. En AB, le cahier des charges officiel est régi par un règlement européen depuis 2008, qui autorise des mises en application spécifiques par les Etats membres, lesquelles sont difficiles d'accès et non recensées de façon officielle. C'est le cas, par exemple, du poulet de chair AB, dont l'âge minimum à l'abattage est de 81 jours en France, alors qu'il est de 70 jours au niveau européen. Ce choix a été imposé en France pour éviter une concurrence avec le SIQO Label Rouge. Il a des implications sur les souches utilisées et les coûts de production. Ces spécificités nationales signifient que les résultats d'études sur la qualité de la viande de poulet AB obtenus dans un pays donné ne sont pas toujours généralisables à d'autres pays, les souches utilisées et l'âge de l'animal à l'abattage ayant des effets importants sur la qualité de la viande et notamment ses propriétés organoleptiques.

Deux méta-analyses portant sur les propriétés nutritionnelles du lait de vache et de la viande produits en AB ont été publiées récemment, ainsi que des études concernant l'impact de la consommation de produits AB sur la santé, dont deux études épidémiologiques comparant de grands *vs*. petits consommateurs de produits AB. La méta-analyse sur le lait montre des propriétés nutritionnelles plus favorables pour le lait AB (augmentation des teneurs en AGPI n-3 et en vitamine E, diminution du rapport LA/ALA), en lien avec l'alimentation des animaux (augmentation de la part d'herbe et diminution de la part de concentrés et d'ensilage de maïs dans la ration, augmentation de la part des légumineuses dans les fourrages), tout en signalant que les produits issus de systèmes d'élevage herbagers non conduits en AB peuvent offrir des propriétés nutritionnelles similaires voire supérieures. La méta-analyse sur la viande est moins robuste, car basée sur beaucoup moins d'études, en particulier dans certaines espèces, et possiblement biaisée par la moindre teneur en lipides des viandes AB. Ces deux méta-analyses soulignent la grande variabilité des pratiques d'élevage, à la fois en élevage biologique et en élevage conventionnel, ce qui questionne la généricité des résultats. Comme les différences de propriétés nutritionnelles observées sont essentiellement liées à l'alimentation des animaux, quels seraient les résultats si les pratiques d'alimentation en AB s'intensifiaient, en réponse à la forte demande de produits AB (notion de 'conventionnalisation' de l'AB) ? Pour le lait AB, par exemple, la réduction de la part d'herbe dans la ration au profit de l'ensilage de maïs diminue la plus-value sur les propriétés nutritionnelles. Certaines études proposent alors d'associer des engagements précis sur les pratiques d'alimentation (par exemple, lait produit à l'herbe) en plus du signe de qualité AB, afin de garantir les propriétés nutritionnelles. Les méthodes d'authentification des pratiques d'alimentation peuvent ici être utiles.

Au-delà des propriétés nutritionnelles, les études scientifiques montrent des **antagonismes, pour les produits AB, entre les différentes propriétés constitutives de la qualité** ; ces antagonismes ont été explicités pour les différents produits 'bruts'. Par exemple, l'élevage à l'herbe et notamment le pâturage de prairies riches en légumineuses, pratique d'élevage plus fréquente en AB qu'en conventionnel, est favorable aux propriétés nutritionnelles de la viande d'agneau (meilleur profil en acides gras), mais défavorables à ses propriétés organoleptiques (risques d'odeurs indésirables). Les études s'accordent aussi sur une **plus grande variabilité des propriétés** constitutives de la qualité pour les produits issus de l'AB, liée en particulier à une moindre sélection des animaux (volailles), à une moindre utilisation d'intrants (ruminants) et une plus grande variabilité des pratiques d'élevage (conduite alimentaire, type d'habitat pour les porcins). La question se pose alors des conséquences, pour la transformation, de ces produits bruts présentant une plus grande variabilité de leurs propriétés, question qui n'est pas abordée dans la littérature scientifique. Concernant les effets de la consommation d'aliments issus de l'AB sur la santé, les études sont peu nombreuses et récentes. Elles montrent une diminution des risques de cancer, de surpoids et d'allergies et une moindre prévalence de diabète chez les consommateurs d'aliments issus de l'AB, mais ces études ne sont pas centrées spécifiquement sur les aliments d'origine animale. Par ailleurs, une étude montre que les viandes de monogastriques produites en AB sont moins susceptibles d'abriter des bactéries résistantes aux antibiotiques. Il y a donc eu récemment de nouvelles études sur les aliments issus de l'AB, mais cet effort de recherche est à poursuivre,

notamment sur les aliments d'origine animale encore peu étudiés comme les poissons ainsi que les produits transformés issus des différentes filières animales.

Ces deux modèles de production/transformation, situés aux extrêmes d'un continuum, coexistent, mais concernent des volumes de produits très inégaux. Il y a, en fait, une tension importante entre des objectifs de compétitivité économique et des objectifs sociétaux, dont la montée en gamme des produits alimentaires (demande d'une partie des consommateurs français, relayée par les EGA), l'acceptabilité sociale de l'élevage et l'agro-écologie. Ces constats amènent à poser la question de la durabilité de certains choix monolithiques, compte tenu des différentes dimensions de la qualité et des possibles antagonismes entre elles. Ils interrogent également les politiques d'incitation ou de soutien financier pour les éleveurs dont les systèmes d'élevage sont favorables à la qualité des produits. La question se pose aussi d'une réorientation des systèmes d'élevage et des types d'animaux vers une **moindre spécialisation**, d'une meilleure prise en compte à la fois des **performances**, du **bien-être animal**, de l'ensemble des **propriétés des produits animaux** et de **l'environnement**. Des compromis sont à trouver, des arbitrages à faire. Ils dépendront, au moins en partie d'une meilleure connaissance des **différentes demandes des consommateurs et de leurs évolutions**, mais aussi de leur propension à accepter le différentiel de prix entre les produits issus de différents modèles, le prix restant une dimension majeure de la décision d'achat pour nombre d'acheteurs. Au-delà, il existe une tension importante entre une demande quantitative pour les aliments d'origine animale qui augmente hors Europe, alors qu'en Europe, cette demande stagne, voire baisse, et s'oriente plutôt vers une demande de montée en gamme de la qualité. L'équilibre entre les différents modèles est difficile, car les politiques nationales cherchent à maintenir la compétitivité de leurs filières d'élevage face à des concurrents européens et mondiaux qui privilégient surtout le modèle agro-industriel dominant. Parallèlement au développement du modèle « alternatif », un des enjeux pour la production française est d'intégrer des exigences croissantes des consommateurs dans la production agricole «standard » (montée en gamme), sans trop dégrader l'équilibre économique fragile de l'ensemble des acteurs des filières.

7. Enseignements pour la recherche et l'action publique

7.1 Consommateurs : évolution des attentes et des comportements, information et formation

L'évolution rapide des comportements alimentaires et des attentes sociétales invite à ***mieux anticiper les attentes des consommateurs et des citoyens ainsi que les arbitrages qu'ils font***, ***mieux comprendre les motivations sous-jacentes***, pour analyser les changements et ***anticiper les évolutions souhaitées des conditions d'élaboration*** (production et transformation) des aliments en les adaptant au mieux aux attentes variées, de même qu'anticiper ***l'évolution de la place des différents aliments d'origine animale dans le régime alimentaire***. Ces évolutions peuvent induire des changements dans les modalités d'élevage et de transformation des aliments qu'il est nécessaire d'anticiper au mieux. Il y a des besoins de recherche pour savoir ***comment construire/instruire des solutions en rupture face à ces évolutions dans les attentes sociétales et de la réglementation***, comme, par exemple i) le sexage *in ovo* et/ou l'utilisation de poules à double finalité en production d'œufs, en réponse aux questions d'éthique soulevées par la destruction des poussins mâles, ii) la re-conception de systèmes d'élevage pour favoriser l'adoption de pratiques plus agro-écologiques (par exemple, production de lait et viande de ruminants à l'herbe). En terme d'action publique, un observatoire des signaux faibles serait utile pour permettre d'anticiper ces évolutions et de réaliser des prospectives sur la consommation des aliments d'origine animale.

Le ***coût des aliments et plus globalement de l'alimentation*** est important. Les déterminants des propriétés commerciales de l'aliment ont été considérés dans le périmètre de cette expertise, mais pas le coût de l'aliment ni les coûts relatifs à son élaboration. Il y a besoin de recherches pour évaluer les coûts de production des aliments, notamment des aliments sous SIQO, et pour évaluer les dispositions des consommateurs à payer pour la qualité des aliments. L'action publique peut, elle, intervenir à travers le soutien à une alimentation plus qualitative.

Il y a besoin de ***développer des outils d'étiquetage intégrant les différentes composantes de la qualité*** (valeur nutritionnelle du produit, mode d'élevage et bien-être des animaux, etc.). A ce jour, plus de 240 industriels de

l'agroalimentaire et distributeurs en France se sont engagés à apposer le logo Nutri-Score sur leurs produits, ce qui représente plus de 5 000 références en magasins et plus de 12 000 références en e-commerce. Cette démarche est jusqu'à présent volontaire, ne faudrait-il pas la rendre obligatoire sur tous les produits transformés ? Par ailleurs, il faut noter que seuls les aspects nutritionnels sont pris en compte dans calcul du Nutri-Score, cet indicateur n'intégrant pas d'autres dimensions (comme les teneurs en certains composés délétères potentiellement générés avec certains procédés de transformation qu'ils soient industriels, artisanaux ou domestiques, les additifs, *etc.*), ni au-delà les dimensions d'impact environnemental. En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de score global prenant en compte simultanément ces différentes dimensions. Il y a besoin de recherches sur les procédés de préparation les plus optimaux en termes nutritionnel et environnemental (énergie, par exemple) pour i) comprendre les effets de la transformation, ainsi que de la formulation, sur la qualité des aliments et les conséquences sur la santé, ii) comprendre les mécanismes sous-jacents et contribuer à améliorer les pratiques de transformation/formulation, iii) informer les consommateurs pour les aider dans leurs choix.

Des recherches sont nécessaires sur les ***pratiques de substitution entre aliments pour comprendre les leviers et les freins à l'adoption d'alternatives végétales à la viande*** : valeurs associées aux substituts, connaissances culinaires, environnement matériel et social, caractéristiques sociodémographiques et socio-économiques (âge, sexe, niveau d'éducation, catégories socio-professionnelles, lieu de vie, personnes vivant dans le foyer, restant à vivre). Ces recherches pourraient inclure une enquête quantitative auprès d'un échantillon représentatif de la population française de manière à révéler les attitudes vis-à-vis de ces aliments de substitution ; ainsi qu'une enquête qualitative et participative avec des groupes ciblés, et basée sur l'observation de pratiques culinaires et la formulation de solutions pour favoriser l'adoption des alternatives.

Des questionnements apparaissent pour ***identifier les enjeux moraux et sociaux au développement d'aliments qui n'auront d'origine animale que l'aspect ou une cellule souche originelle*** : sur la remise en question du rôle économique, environnemental et social des animaux s'ils ne sont plus élevés, sur l'impact de l'hyper-intrusion technologique et du numérique dans l'alimentation (par exemple, imprimante 3D) et de la dépendance à ces innovations, sur la reconfiguration des pratiques culinaires, modes de consommation et des rôles sociaux, sur les inégalités sociales d'accès à ces nouveaux aliments.

Il y a par ailleurs besoin de ***définir et d'encadrer les analogues/alternatives aux aliments d'origine animale***.

Les campagnes d'information sur les politiques nutritionnelles de santé publique (PNAN) permettent d'encourager l'adhésion à ces politiques. Le suivi de leur impact permet d'évaluer le niveau d'atteinte de leurs objectifs. On observe une baisse de la consommation de viande rouge et une augmentation de la consommation de produits AB, mais en même temps des pratiques défavorables, comme l'augmentation de la consommation d'aliments « prêts à consommer » et de produits « ultra-transformés ».

Cette augmentation de la consommation d'aliments « prêts à consommer » va de pair avec une ***perte du savoir-faire culinaire***. Il faut réfléchir à ***renforcer l'éducation en milieu scolaire*** sur la connaissance des aliments (de leur production à leur préparation) et sur les recommandations nutritionnelles. Par ailleurs, il y a un besoin de recherches sur les pratiques culinaires à domicile, qui sont mal renseignées dans la littérature scientifique, leur transmission et leur évolution, et sur l'analyse de leurs impacts sur les propriétés sanitaires et nutritionnelles des aliments.

7.2 Encourager des pratiques et systèmes d'élevage favorables à la qualité des aliments d'origine animale

Soutien des acteurs ayant des pratiques favorables à la qualité ou incitation à évoluer vers ces pratiques : accompagnement dans cette transition (investissements, conversion), aides à la formation, et reconnaissance des efforts à travers le paiement des services écosystémiques fournis, dont la qualité des produits.

Il peut, par exemple, s'agir d'un soutien aux produits issus d'animaux nourris à l'herbe, dont un soutien en faveur des prairies et pour la valorisation des produits correspondants (des créneaux se développent dans différents pays européens autour du lait de pâturage, par exemple) et d'un soutien dans la transition vers (et le maintien dans) la production de produits sous signes de qualité, dont l'agriculture biologique.

Il y a des besoins de recherches pour savoir comment aller vers ces pratiques/systèmes d'élevage plus favorables à la qualité des produits (systèmes d'élevage de ruminants plus pâturants, par exemple). Il y a également des besoins de recherche pour

évaluer les coûts de production des produits, notamment ceux sous SIQO. A cet égard, il y a besoin d'augmenter le dimensionnement des systèmes de suivi des coûts de production des produits, pour mieux évaluer les coûts de production des aliments selon leur qualité.

Soutien à des actions collectives relatives à l'amélioration du bien-être animal à toutes les étapes (élevage, transport et abattage), qui est un des éléments clés de la qualité des aliments d'origine animale, et à sa reconnaissance :

Elimination ou valorisation difficile d'animaux ne rentrant pas dans les canons des propriétés commerciales requises actuellement. Le gouvernement français vient d'annoncer (28/01/2020) l'interdiction du broyage des poussins mâles ainsi que l'arrêt de la castration à vif des porcelets, à la fin de l'année 2021. On peut relever aussi les cas d'animaux d'autres filières qui sont très mal valorisés, car ne rentrant pas dans les 'canons' des propriétés commerciales : filières laitières bovine et caprine (chevreaux et chèvres de réforme équarris, veaux laitiers valorisés dans le *pet food* dans certains pays européens).

Il y a besoin de recherches pour savoir comment construire/instruire des solutions innovantes face à ces évolutions (dont des techniques et pratiques d'élevage, voire de re-conception de systèmes) pour :

i) mieux valoriser les animaux des deux sexes (poussins mâles, chevreaux et veaux mâles, bovins mâles engraissés sur le territoire au lieu d'une vente en broutards,…),
ii) allonger les carrières de production des femelles (poules pondeuses, par ex.) et mieux les valoriser (poules pondeuses, chèvres de réforme, par ex.),
iii) concilier des attentes sociétales parfois divergentes (par exemple, éthique *vs.* autres dimensions de la qualité, prix ; augmentation de la demande en fromages frais de chèvres toute l'année alors qu'il s'agit d'un produit saisonné, conduisant à une production accrue de chevreaux très mal valorisés).

Enfin, il y a des *besoins d'accompagnement des éleveurs* dans les évolutions correspondantes des systèmes d'élevage.

Facilitation du maillage sur le territoire des outils d'abattage, notamment les dispositifs d'abattoirs mobiles et multi-espèces. Ici, il y a un besoin de recherches pour évaluer les risques associés (sanitaires, BEA) aux dispositifs d'abattoirs mobiles et développer des procédures pour les maitriser et mieux gérer les effluents produits par l'abattage.

Accompagnement des filières animales dans des plans de progrès (référentiels de bien-être animal, information, formation, évolution des cahiers des charges, évolution des bâtiments d'élevage, communication). Ici, il y a un besoin de recherches pour poursuivre les recherches en éthologie appliquée afin d'harmoniser la caractérisation, l'objectivation et l'évaluation du BEA, de la sensibilité et de la douleur chez les animaux d'élevage.

Reconnaissance des efforts des acteurs et information des consommateurs au travers d'un étiquetage du niveau de bien-être de l'animal dont est issu le produit (et contrôles pour garantir la conformité de l'information/étiquetage), ainsi qu'une valorisation correspondante suffisante. Des réflexions sont en cours au niveau de l'UE pour un système européen d'étiquetage sur le bien-être animal. Des initiatives ont été déjà été proposées et appliquées pour la viande de volailles, par l'Association Etiquette Bien-Etre Animal (AEBEA) qui regroupe des ONG de protection animale, des distributeurs et des producteurs de volailles : 5 niveaux de bien-être animal renseignés par une lettre de A à E, A étant le plus élevé, E correspondant au niveau minimal réglementaire, et accompagnés d'informations sur le mode d'élevage des volailles - parcours arboré, accès à l'extérieur, bâtiment amélioré, bâtiment en progrès, en bâtiment. Cette association annonce un autre référentiel, en 2020, pour la viande de porc, puis pour d'autres filières animales. Cette initiative est en phase avec le souhait des consommateurs de plus de transparence sur les modes d'élevage des animaux ; l'étiquetage devrait également permettre de mieux identifier les produits issus des modes d'élevage les plus favorables en termes de qualité des produits, de bien-être animal et pour l'environnement).

Evolution de la réglementation pour la réalisation d'un diagnostic environnemental du milieu avant l'installation d'un nouvel élevage, incluant les activités émettrices à proximité, présentes et passées, pour limiter l'exposition des animaux aux contaminants chimiques et les effets délétères correspondants sur les propriétés sanitaires du produit. Ce diagnostic n'est actuellement obligatoire que pour certains SIQO.

Soutien à des actions collectives pour assurer aux acteurs produisant des produits de qualité une pérennité de leur activité et pour inciter l'ensemble des acteurs à mieux prendre en compte les différentes dimensions de la qualité. Il s'agit, par exemple, *d'encourager les politiques de contractualisation entre acteurs* (éleveurs, abattoirs, transformateurs, distributeurs, *etc.*) prenant en compte la qualité des produits, les coûts de production, les besoins d'accompagnement liés aux éventuels changements de mode de production, pour une juste répartition des marges (partage de la valeur) au sein des filières. Un autre exemple est le modèle MSA (Meat Standard Australia), développé en Australie pour la viande bovine) ; il associe éleveurs, abatteurs, transformateurs, distributeurs, consommateurs, afin :

i) d'aider les consommateurs dans leurs choix (information sur le niveau de qualité),
ii) de payer les éleveurs à la qualité organoleptique de la viande qu'ils produisent et mieux répartir la valeur ajoutée,
iii) de faire évoluer les pratiques d'élevage et de sélection pour améliorer la qualité du produit,
iv) de faire évoluer le comportement des consommateurs pour un paiement de la qualité. Produire un aliment de qualité et dans les conditions exigées à présent par la société a un coût.

Il y a donc un besoin de recherches pour savoir comment construire/instruire une possible révision du classement de la qualité à la base du paiement aux éleveurs qui prenne mieux en compte d'autres dimensions de la qualité du produit (propriétés organoleptiques, nutritionnelles, *etc.*). C'est un sujet sensible, il y a des difficultés à faire évoluer les normes et les jeux d'acteurs. A ce jour, chacun des acteurs s'est adapté à la stratégie des autres et ne peut en changer seul, tant que les autres acteurs ne changent pas. Il y a donc besoin d'organisation voire d'incitation pour la mise en œuvre d'actions collectives. Il est à noter que les plans de filière, proposés suite aux EGA en France, évoquent l'inclusion de critères organoleptiques minimaux (filière viande bovine) dans les cahiers des charges des produits sous SIQO et l'adaptation des grilles de paiement aux différents objectifs de qualité pour mieux adapter l'offre aux demandes de qualité des carcasses et des viandes (filière porcine).

Evolution des cahiers des charges des produits sous SIQO et des marques privées. La forte demande pour les aliments issus de l'AB peut laisser craindre une certaine 'conventionnalisation' de l'AB. Par ailleurs, un des freins à l'achat d'aliments issus de l'AB, au-delà du prix, est effectivement les doutes sur leurs conditions d'élaboration (conditions de production, notamment). Dans un objectif de *mieux garantir la qualité des aliments et les conditions de production des animaux dont ils sont issus, et offrir plus de transparence, le cahier des charges de l'AB pourrait être 'resserré'* sur les pratiques d'élevage autorisées (alimentation à l'herbe, notamment). Une autre alternative serait d'informer (étiquetage) sur les engagements précis sur les pratiques d'élevage (par exemple, lait produit à l'herbe) en plus du signe de qualité AB. De plus, le cahier des charges de l'AB pourrait être révisé pour *mieux renseigner les pratiques de transformation des produits* (lacune identifiée dans l'expertise). Par ailleurs, les scientifiques peuvent éclairer sur les implications i) d'évolutions vers une « massification » des produits sous SIQO ou ii) de possibles évolutions de leurs cahiers des charges (par exemple, interdiction des mutilations, dont la castration des animaux mâles) et sur les alternatives et leurs conséquences. Il y a donc besoin de poursuivre les recherches sur les liens entre pratiques d'élevage et de transformation et la qualité des aliments d'origine animale. Enfin, il apparaît nécessaire de réfléchir à ***encadrer le développement de marques territoriales*** qui induisent de la confusion et entraînent des distorsions de concurrence par rapport aux signes officiels de qualité territorialisés (AOP, IGP), lesquels respectent des cahiers des charges, stricts et sont contrôlés.

Les ***effets des systèmes de production,*** en particulier, ceux sous SIQO, sur la qualité des produits bruts ont été largement examinés, en revanche les données concernant la ***qualité de ces produits après transformation*** (approches longitudinales) sont très insuffisantes.

7.3 Développer des outils d'évaluation, de prévision, de pilotage et de contrôle de la qualité

L'expertise a pointé des lacunes dans toutes les filières animales pour ***synthétiser l'ensemble des informations disponibles, notamment sous forme de méta-analyses***, et ***proposer des lois de réponse intégrant les différents facteurs de variation des propriétés des aliments d'origine animale*** (de l'origine de l'animal à l'aliment fini), les interactions entre ces facteurs, et au-delà les antagonismes et synergies entre les différentes composantes de la qualité. Le ***développement d'approches et d'outils multicritères*** est incontournable pour aider à la recherche de compromis entre i) les différentes dimensions de la qualité d'un aliment, dont sa qualité « intrinsèque » et d'autres dimensions qualitatives « extrinsèques »

(durabilité, dont les impacts environnementaux, le bien-être animal,…), et ii) les attentes des différents acteurs qui peuvent avoir des intérêts antagonistes. C'est un front de science identifié et un besoin de recherche important. Quelques études pionnières développent des systèmes d'évaluation de l'empreinte environnementale des systèmes d'élevage qui prennent en compte la qualité des produits.

Il y a également besoin de développer des méthodes pour évaluer et gérer la variabilité dans la qualité des produits bruts. Les scientifiques travaillent au ***développement d'outils peu ou pas invasifs*** utilisables précocement sur la chaîne d'élaboration pour ***caractériser et prédire les propriétés constitutives de la qualité du produit*** (ou de la matière première), ainsi que ***gérer leur variabilité,*** en orientant i) le produit vers différents segments de marché, ii) la matière première vers différents procédés de transformation, iii) et éventuellement, les pratiques d'élevage du vivant de l'animal.

Il y a également besoin d'adapter les contrôles en cohérence avec l'intensification des échanges au niveau international. Même si l'UE s'est dotée d'un cadre réglementaire et d'un dispositif harmonisé sur tout le territoire européen, la libre circulation des marchandises en Europe augmente les risques de fraudes relatives à la qualité des aliments d'origine animale (citons les lasagnes à la viande de cheval) et donc la nécessité de contrôles. Les traités de libre-échange avec des pays hors-Europe (CETA, Mercosur) augmentent encore les risques de fraudes, du fait de cadres réglementaires différents qui peuvent avoir un effet sur la qualité des aliments d'origine animale (par exemple, utilisation en élevage d'hormones de croissance ou d'antibiotiques comme promoteurs de croissance, lavage des poulets au chlore, seuil différent dans la teneur en eau autorisée dans la viande de poulet, irradiation des produits, *etc.*, qui sont autorisés au Canada et aux Etats-Unis, mais pas en Europe).
En terme de besoins de recherche, il y a nécessité de développer et de tester des méthodes d'authentification des conditions d'élaboration et de l'origine des aliments. Ces outils d'authentification permettraient de lever les doutes des consommateurs quant aux conditions de production/transformation des aliments, signalés comme un frein à la consommation même des produits sous SIQO.

7.4 Lien entre la consommation des aliments d'origine animale et la santé humaine

La capacité de ***mesurer de façon plus précise l'impact de la consommation des aliments d'origine animale sur la santé des consommateurs*** nécessite de mieux prendre en compte les conditions de production et les modalités de transformation des aliments consommés (par exemple, le terme charcuterie recouvre une très large gamme de produits et de procédés de transformation, et plusieurs espèces animales). Il y a ainsi ***besoin d'organiser une plus grande connexion entre les communautés scientifiques à l'échelle de l'élevage, de la transformation des produits, des nutritionnistes et de l'épidémiologie*** pour mieux appréhender et comprendre les liens entre les conditions d'élaboration des aliments d'origine animale et la santé humaine, identifier les mécanismes sous-jacents à l'échelle de l'élevage (par exemple, utilisation d'antibiotiques, de pesticides, mais aussi produits standards *vs.* sous SIQO, *etc.*), de la transformation (utilisation d'additifs, produits néoformés…), de la préparation à domicile (produits néoformés) et de la consommation, pour aller au-delà des associations identifiées à l'heure actuelle, et proposer des leviers d'amélioration pour la prévention. Il y a donc ***besoin de programmes de recherches interdisciplinaires*** visant à explorer l'***impact de la variation de la qualité des aliments d'origine animale dans ses différentes dimensions sur l'effet santé associé à leur consommation*** (risques-bénéfices de la consommation des aliments d'origine animale et coûts-bénéfices de la modification des modes de production et des conditions d'élaboration des aliments d'origine animale).

On constate le développement d'outils pour classer les aliments selon une ou plusieurs de leurs caractéristiques. Il y a besoin de recherches pour affiner les classements des aliments, ce qui reste un défi méthodologique. Il y a également besoin de contrôler/accompagner le développement des outils d'aide à la décision pour le choix des aliments par les consommateurs (applications numériques).

7.5 Inscrire les produits animaux dans une logique d'économie circulaire

Il y a besoin de recherches sur l'effet de l'utilisation de co-produits végétaux et de nouvelles ressources (insectes, algues) pour l'alimentation animale sur les propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale (ainsi que les performances des animaux). Il y a également besoin de recherches sur la quantification des pertes et gaspillages lors des différentes étapes de l'élaboration, de la distribution et de la consommation des aliments d'origine animale et sur les leviers

pour les limiter. Enfin, il y a besoin de poursuivre les recherches engagées sur la valorisation des co-produits animaux (production de molécules bio-actives, ingrédients d'intérêt).

Ces enseignements pour la recherche et l'action publique sont résumés dans les tableaux ci-dessous

Consommateurs : évolution des attentes et des comportements, information et formation

Problématique	Pistes d'action publique	Besoins de recherche
Evolution des attentes et demandes des consommateurs (pratiques d'élevage, de transformation, nutrition, environnement, bien-être animal…)	-Campagne d'information, étiquetage clair et répondant aux attentes : encadrer les initiatives permettant d'identifier les aliments issus des systèmes d'élevage les plus favorables à la qualité, assurer le contrôle de la conformité de l'étiquetage, et une valorisation suffisante du produit -Observatoire des signaux faibles permettant d'anticiper, réaliser des prospectives sur la consommation des aliments d'origine animale	-Anticiper les attentes et comprendre les arbitrages, et les motivations sous-jacentes et anticiper les évolutions souhaitées dans les conditions de production et de transformation des aliments -Construire des solutions en rupture face à ces évolutions dans les attentes/demandes sociétales -Evaluer leurs effets à long terme sur l'évolution des pratiques d'élevage et de transformation, ainsi que le niveau de consommation des aliments d'origine animale -Développer des outils d'étiquetage intégrant les différentes composantes de la qualité
Coût de l'alimentation	Soutien à une alimentation plus qualitative	Evaluer les dispositions des consommateurs à payer pour la qualité des aliments
Profusion d'informations sur les signes et mentions de qualité	Encadrement pour éviter la confusion entre des allégations (marque, SIQO, mention…)	
Evolution de la place des aliments d'origine animale dans le régime, des pratiques de substitution (végétale ou non) et leurs enjeux	Définir et encadrer les analogues/alternatives aux produits animaux	-Etudier les pratiques de substitution entre aliments pour comprendre les leviers et les freins à l'adoption d'alternatives aux aliments d'origine animale et les modalités de transition de régimes alimentaires. -Identifier les enjeux moraux et sociaux (acceptation) au développement d'aliments
Perte du savoir-faire culinaire au profit d'aliments « prêts à consommer »	Renforcer l'éducation en milieu scolaire sur la connaissance des aliments (de leur production à leur préparation), et sur les recommandations nutritionnelles	Enquêter pour identifier les pratiques culinaires à domicile, leur transmission et leur évolution Analyser l'impact de ces pratiques sur les propriétés sanitaires et nutritionnelles des aliments

Encourager pratiques et systèmes d'élevage favorables à la qualité

Problématique	Pistes d'action publique	Besoins de recherche
Primauté aux propriétés commerciales, base du paiement aux éleveurs	Encourager les actions collectives incitant l'ensemble des acteurs à mieux prendre en compte les différentes dimensions de la qualité	-Sélection génétique prenant mieux en compte l'ensemble des caractéristiques qualitatives.

	(instruire une révision du classement de la qualité des produits animaux dans les différentes filières pour prendre en compte d'autres dimensions que les propriétés commerciales, à la fois pour la rémunération des éleveurs et au niveau de l'amont de la production, notamment la sélection génétique; politiques de contractualisation)	-Construire des systèmes de classement prenant mieux en compte différents volets de la qualité dans le paiement aux éleveurs, l'information aux consommateurs et la sélection des animaux
Evaluation des coûts de production des aliments selon leur qualité	Augmenter le dimensionnement des systèmes de suivi des coûts de production des aliments	Evaluer les coûts de production des aliments, notamment des aliments sous SIQO
Plans de filière orientés vers la montée en gamme de la qualité des aliments d'origine animale	Accompagner le développement de produits sous SIQO et soutenir la transition des systèmes d'élevage vers la production d'aliments d'origine animale de qualité	-Instruire/construire les transitions vers des pratiques/systèmes d'élevage favorables à la qualité des aliments d'origine animale (systèmes herbagers, sous SIQO, propriétés organoleptiques supérieures, plus respectueux du bien-être animal (BEA)…) -Eclairer et analyser les implications d'évolutions vers une massification des produits sous SIQO
Importance du bien-être animal (BEA) pour l'ensemble des propriétés constitutives de la qualité	Accompagner les filières dans les plans de progrès sur le BEA	Poursuivre les recherches en éthologie appliquée pour harmoniser la caractérisation, l'objectivation et l'évaluation du BEA, de la sensibilité et de la douleur chez les animaux d'élevage
Réduction du nombre d'abattoirs et concentration de leur répartition territoriale	Faciliter le maillage sur le territoire des outils d'abattage, notamment les dispositifs d'abattoirs mobiles et multi-espèces	Evaluer les risques associés (sanitaires, BEA) aux dispositifs d'abattoirs mobiles. Développer des procédures pour maitriser le BEA, les risques sanitaires et mieux gérer les effluents produits par l'abattage
Elimination ou valorisation insuffisante d'animaux ne rentrant pas dans les canons des propriétés commerciales requises actuellement	Accompagner les acteurs dans les évolutions des systèmes de production visant à valoriser les animaux ne rentrant pas dans les canons des propriétés commerciales	Instruire des solutions innovantes permettant de mieux valoriser les animaux des deux sexes, d'allonger les carrières de production des femelles (poules pondeuses, par ex), de mieux valoriser les animaux de réforme et d'engraisser les jeunes bovins mâles localement

Développer des outils d'évaluation, de prévision, de pilotage et de contrôle de la qualité

Problématique	Pistes d'action publique	Besoins de recherche
Manque de méta-analyses sur la quantification des effets des conditions de production et de transformation des aliments (à l'exception du domaine de la santé)		Réaliser des méta-analyses pour gagner en robustesse dans l'évaluation quantitative de l'effet des différents facteurs déterminants de la qualité

La qualité d'un aliment se construit et peut se dégrader tout au long de la chaîne conduisant à son élaboration		Développer des outils peu ou pas invasifs utilisables précocement sur la chaîne d'élaboration pour évaluer et gérer la variabilité des propriétés des aliments ou de leurs matières premières
La qualité est multi-dimensionnelle et son évaluation variable entre acteurs, les approches multicritères quant à la qualité des aliments d'origine animale sont émergentes. Beaucoup de travaux ne considèrent qu'une propriété, et pas de façon intégrative		Développer des approches et outils multicritères pour gérer les antagonismes entre propriétés constitutives de la qualité, et entre acteurs
Incertitudes sur les conditions de production et de transformation, amplifiées par l'accroissement des échanges commerciaux	Adapter les contrôles en cohérence avec l'intensification des échanges au niveau international	Développer et tester des méthodes d'authentification des conditions de production, de transformation et de l'origine des aliments, transférables aux opérateurs.
Evaluation de l'empreinte environnementale des systèmes d'élevage actuellement basée sur la quantité produite (ex : gaz à effet de serre/100 g de produit)		Développer des systèmes d'évaluation de l'empreinte environnementale des systèmes d'élevage prenant en compte la qualité des produits. Choisir des unités fonctionnelles reliées à la qualité des produits.

Liens entre la consommation des aliments d'origine animale et la santé humaine

Problématique	Pistes d'action publique	Besoins de recherche
Peu de prise en compte des conditions de production et de transformation des aliments dans les études sur les liens entre la consommation d'aliments d'origine animale et la santé		Recherches interdisciplinaires pour mieux appréhender et comprendre les liens entre les conditions de production et de transformation des aliments d'origine animale et la santé humaine, identifier les mécanismes sous-jacents à l'échelle de l'élevage, de la transformation, de la formulation et de la consommation, pour aller au-delà des associations identifiées à l'heure actuelle, et proposer des leviers d'amélioration.
Inadéquation entre certaines formulations des aliments transformés et les recommandations de santé	Mettre en cohérence les réglementations encadrant les conditions de transformation des produits d'origine animale et les recommandations en termes de santé humaine	Proposer des alternatives à l'utilisation d'ingrédients et de procédés impliqués dans des problématiques de santé
Recommandations nutritionnelles basées sur des groupes d'aliments Développement d'outils pour classer les aliments selon une ou plusieurs de leurs caractéristiques	Contrôler/Accompagner le développement des outils d'aide à la décision pour le choix des aliments par les consommateurs (applications numériques)	Mieux comprendre les mécanismes sous-jacents des associations entre produits ultra-transformés et santé. Défi méthodologique pour affiner les classements des aliments

Inscrire les produits animaux dans une logique d'économie circulaire

Problématique	Pistes d'action publique	Besoins de recherche
Compétition feed/food, impacts environnementaux de l'élevage liés aux pertes et gaspillages difficilement quantifiables	Inscrire les aliments d'origine animale dans une logique d'économie circulaire	-Recherches interdisciplinaires sur la valorisation des co-produits végétaux et de nouvelles ressources alimentaires (insectes, algues) pour l'alimentation animale et leurs effets sur les propriétés constitutives de la qualité des aliments d'origine animale et les performances des animaux -Recherches sur la quantification des pertes et gaspillages lors des différentes étapes d'élaboration, distribution et consommation des aliments d'origine animale et sur les leviers pour les limiter -Poursuivre les recherches sur la valorisation des co-produits animaux (production de molécules bio-actives, ingrédients d'intérêt).

Centre-siège Paris-Antony
Direction de l'expertise scientifique collective,
de la prospective et des études
147 rue de l'Université – 75338 Paris cedex 07
Tél. +33 1 (0)2 42 75 90 00

Rejoignez-nous sur :

inrae.fr/collaborer/expertise-appui-aux-politiques-publiques

Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

© INRAE/Adobe Stock