



HAL
open science

Effets des acides gras N-3 sur la construction la qualité nutritionnelle de la viande de porc et sur le métabolisme des lipides

Mathieu Guillevic

► **To cite this version:**

Mathieu Guillevic. Effets des acides gras N-3 sur la construction la qualité nutritionnelle de la viande de porc et sur le métabolisme des lipides. Sciences du Vivant [q-bio]. AGROCAMPUS OUEST, 2009. Français. NNT: . tel-02821438

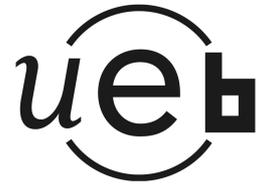
HAL Id: tel-02821438

<https://hal.inrae.fr/tel-02821438>

Submitted on 6 Jun 2020

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.



N°ordre 2009-11
N°série B-195

THÈSE

présentée à AGROCAMPUS OUEST

pour obtenir

le diplôme de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DES SCIENCES AGRONOMIQUES,
AGRO-ALIMENTAIRES, HORTICOLES ET DU PAYSAGE**

Spécialité : Biologie et Agronomie

par

Mathieu GUILLEVIC

**EFFETS DES ACIDES GRAS N-3 SUR LA CONSTRUCTION DE LA
QUALITE NUTRITIONNELLE DE LA VIANDE DE PORC ET SUR LE
METABOLISME DES LIPIDES**

Composition du jury :

M.	AILHAUD Gérard	Rapporteur
M.	NARCE Michel	Rapporteur
M.	DURAND Denys	Examineur
Mme.	KOUBA Maryline	Examineur
M.	WEILL Pierre	Examineur
M.	MOUROT Jacques	Directeur de thèse





N°ordre 2009-11
N°série B-195

THÈSE

présentée à AGROCAMPUS OUEST

pour obtenir

le diplôme de :

**DOCTEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DES SCIENCES AGRONOMIQUES,
AGRO-ALIMENTAIRES, HORTICOLES ET DU PAYSAGE**

Spécialité : Biologie et Agronomie

par

Mathieu GUILLEVIC

**EFFETS DES ACIDES GRAS N-3 SUR LA CONSTRUCTION DE LA
QUALITE NUTRITIONNELLE DE LA VIANDE DE PORC ET SUR LE
METABOLISME DES LIPIDES**

Composition du jury :

M.	AILHAUD Gérard	Rapporteur
M.	NARCE Michel	Rapporteur
M.	DURAND Denys	Examinateur
Mme.	KOUBA Maryline	Examinateur
M.	WEILL Pierre	Examinateur
M.	MOUROT Jacques	Directeur de thèse



REMERCIEMENTS

Je remercie tous les membres de mon jury d'avoir accepté de juger ce travail. Je tiens à remercier Michel NARCE ainsi que Gérard AILHAUD d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Je les remercie pour le temps consacré à la lecture et à l'évaluation de ce travail. Je remercie également Denys DURAND ainsi que Pierre WEILL d'avoir accepté de participer à l'examen de ce travail.

Je remercie Jean NOBLET, directeur de l'unité mixte de recherche Systèmes d'Élevage, Nutrition Animale et Humaine (INRA, UMR 1079 SENAH) de m'avoir accueilli et donné les moyens de réaliser ce travail de thèse dans les meilleures conditions.

Je remercie l'ensemble du personnel de VALOREX, et particulièrement Stéphane DELEAU ainsi que Pierre WEILL, respectivement directeur général et président de l'entreprise. Merci de m'avoir donné la possibilité de réaliser ce travail de thèse par son financement. Merci également à Guillaume CHESNEAU ainsi que Benoit QUEMENEUR, respectivement responsable du service R&D et du secteur porc de VALOREX pour nos multiples échanges et pour leur sympathie.

Je remercie Maryline KOUBA pour avoir assuré la fonction de tutrice durant cette thèse. Je la remercie pour sa grande aide lors de la rédaction des publications et de la correction du manuscrit, sa bonne humeur et sa disponibilité. Merci à toi !

J'adresse mes plus sincères remerciements à Jacques MOUROT, mon directeur de thèse pour m'avoir accordé toute sa confiance. Je le remercie pour ses multiples et nombreuses qualités humaines et scientifiques. Merci d'avoir su te rendre disponible pour moi et de m'avoir, entre autres, initié aux techniques de culture cellulaire m'obligeant à me lever le week-end. J'ai ainsi pu découvrir que ça n'était pas une légende urbaine. Il y a bien une vie entre 06:00 et 12:00 le samedi et le dimanche. Merci pour ton goût pour les bonnes choses et pour tout le reste, voire un peu plus encore.

Je remercie Marie DAMON pour l'apprentissage des techniques de biologie moléculaire.

Je remercie le personnel technique et scientifique du « labo MOUROT » ainsi que les différents stagiaires qui y ont été présents.

Je remercie Alain MOUNIER pour avoir pris en charge mes premières séries d'échantillons ainsi que pour m'avoir initié aux techniques de chromatographie gaz et liquide. Depuis ce jour, ma vie a changé. Je mange, je bois, je dors acides gras.

Je remercie Martine FILLAUT pour avoir mené à bien des dosages que l'on ne retrouve pas dans la thèse. Merci à toi pour ta bonne humeur, pour être venue tant de week-ends couper les appareils, pour m'avoir fait passer pour un type qui avait peur des chiens (il faut dire qu'avec les chiennes que vous avez, qui n'en aurait pas peur !), pour m'avoir présenté à ta fille Audrey (combien de fois nous fûmes mariés et divorcés, pire que Voici et Gala réunis). J'adresse toute mon amitié à toute ta petite famille : Franck et les garçons.

Enfin, un énorme merci à Gwennola Robin pour son investissement conséquent tout au long de cette thèse. Grâce à elle, l'extraction des lipides a été moins pénible à faire, surtout quand je ne la faisais plus. Avec moi, tes nerfs ont du être mis à rudes épreuves. Mais comme dirait NIETZCHE : « Tout ce qui ne nous tue pas, nous rend plus fort ». J'ose espérer que c'est le cas. Merci à toi pour m'avoir tendu l'oreille un peu trop souvent d'ailleurs ! On voit le résultat maintenant !

Je remercie les nombreux stagiaires avec qui j'ai pu travailler pour mener à bien cette thèse, ou tout simplement, partager l'espace d'un temps «le bureau du bout du couloir ».

Merci à Quentin ROLLAND (le bogoss), Hélène BATUT (la sympa), Marylise HOUITTE (pas Maryline, mais l'autre), Maryline RUELLOUX (pas Marylise, mais l'autre), Guillaume MATHIEU (le grand) et enfin Hélène EZANNO (la rugbywoman). Je vais m'arrêter un petit peu sur toi Hélène pour te remercier de ton énorme travail lors des manip' de culture cell'. Merci pour ta bonne humeur. Bon courage pour ta thèse et tes myrist[☉]☿☼☽☾tions.

Merci à Fatiha BENATMANE pour nos échanges passionnés sur notre histoire franco-algérienne, pour ton sens de la dérision, pour tes pâtisseries algériennes et pour tes « ahlalaaa » qui passeront sûrement à la postérité.

Enfin, merci au jeune (quoique) docteur Guillaume MAIRESSE de m'avoir supporté moi et mes remarques ô combien spirituelles. Le raisin a failli avoir notre raison. Je garderai un souvenir ému d'un safari dans les vignobles tourangeaux.

J'exprime toute ma gratitude à Fabienne PONTRUCHER pour son aide technique, sa gentillesse et sa disponibilité. Merci aussi d'avoir cédé un morceau de bureau pour que je puisse poser ma tasse à café. Je remercie l'ensemble de l'équipe « Élaboration des Tissus et Qualité des Viandes » pour leur gentillesse ainsi que leurs conseils.

Je remercie toutes les personnes des installations expérimentales pour leur travail essentiel pour la bonne réalisation de ce travail de thèse. Merci à Raymond VILBOUX et George GUILLERMOIS du moulin ; Bernard CARRISSAN, Christelle CORNÉE, Hervé DEMAY, Renan DELAUNAY, Mickaël GENISSEL, Fabien GUERIN et Patrice ROGER de l'élevage expérimental ; Maurice ALIX, Jérôme LIGER et Jean-François ROUAUD de l'abattoir. De ces installations expérimentales, plus que le sang, le bruit et l'odeur, c'est votre bonne humeur que je garderai en mémoire.

J'adresse toute ma sympathie à l'ensemble du personnel de l'unité pour leurs contacts au quotidien, leurs écoutes et disponibilités. Merci notamment à Frédérique MAYEUR, Laetitia HEURLIN, Isabelle NOGRET, Gwennaëlle RANDUINEAU, David VAL-LAILLET, Marie-Hélène PERRUHOT, Nadine MEZIERE, Philippe GANIER, Jean-Noël THIBAUT, Sandrine HILLION.

J'exprime toute ma sympathie à Anne-Emmanuelle LE MINOUS et Jean-Erick BLOCHET, respectivement d'ADRIA DEVELOPPEMENT et de ZOOPOLE DEVELOPPEMENT, pour leur implication dans le programme « Porc Santé ». Leur bonne humeur et leur enthousiasme furent fort agréables. J'adresse un clin d'œil à Jean-Erick pour le remake de la traversée de Paris. Le vélo s'est transformé en camionnette réfrigérée, et la ville de Paris en région Bretagne. Reste une question sans réponse : qui de nous deux avait pour rôle celui de Bourvil, de Gabin, de de Funes ???

Je remercie également tous les industriels de la salaisonnerie bretonne qui ont bien voulu participer à ce programme « Porc Santé »

Je remercie aussi toute l'équipe « Sciences et Productions Animales » de l'école Agrocampus-Ouest pour m'avoir accueilli dans les dernières étapes de la rédaction du manuscrit. J'adresse mes remerciements à Catherine DISENHAUS, responsable de l'équipe SPA. Merci à vous tous, ne pouvant tous vous nommer et "comme le ventre a ses raisons que la raison ne connaît point", merci à Armelle PINHOUE, Clara LAMBARD et Anne-Marie SALLOU pour leur fondant au chocolat, far aux pruneaux et galettes bretonnes, respectivement. Merci tout de même à Jacques PORTANGUEN pour sa nourriture spirituelle.

Je remercie les membres du laboratoire de l'USC 2012 Biochimie - INRA de l'école AGROCAMPUS-OUEST pour m'avoir formé aux techniques de dosages des enzymes désaturases. Merci à Philippe LEGRAND de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, à Daniel CATHELINE pour son investissement précieux et ses judicieux conseils ainsi qu'à Frédérique PEDRONO pour son aide technique.

Je remercie Claude GARIEPY et Catherine AVEZARD du centre de Recherche et de développement sur les Aliments, Agriculture et Agroalimentaire Canada (Saint-Hyacinthe, Québec, Canada) pour la caractérisation des tissus musculaires des porcs charcutiers de ma thèse.

Je remercie l'équipe Nutriments et Métabolisme de l'unité de recherche sur les Herbivores (Theix, 63) pour l'apprentissage du dosage du MDA par HPLC. Merci à Dominique BAUCHART de m'y avoir accueilli, ainsi qu'à Denis DURAND et Marinette BRUNEL.

Je pense également au « petit personnel », pour certains devenus grands depuis, de cette même unité et de celles d'à côté : Emmanuelle MOSNIER, Aurélie FOISNET, Aurélie WILFART, Delphine GARDAN, Pierre COZANNET, Etienne LABUSSIÈRE, David COURET, Ludovic BROSSARD, Francine DE QUELEN, Ousseynou SARR, Romain D'INCA, Hedi BEN CHEDLY, Cyrille RIGOLOT, Cyril LE CHARTIER, Erwan CUTULLIC, Erwan BEAUCHAMP, Moussa KOMARA, Hélène PASTORELLI.

Je remercie l'inclassable Jihanne VITRE. Parfois elle rit, parfois elle pleure, parfois les deux en même temps. Mais c'est toujours agréable.

Merci à vous tous pour les bons moments passés ensemble que cela soit dans le laboratoire, dans l'élevage, en formation ou en congrès. Que de souvenirs émus. Il y aurait tant à dire... qu'il ne vaut mieux se taire.

Merci à mes amis. Oui, j'en ai. Une petite pensée pour vous, en hommage à toutes les pensées de vos parts pour moi.

Je remercie ma famille, mes grands-mères, mes parents, ma sœur, oncles et tantes, cousins et cousines pour leur soutien et leurs encouragements réguliers.

Enfin, dernière ligne tant attendue... Tu te reconnaitras, les autres non. Merci à toi, tant pis pour eux.

VALORISATIONS DES TRAVAUX

Articles scientifiques

Acceptés

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, 612-618.

Guillevic M., Kouba M., Mourot J., 2009. Effect of a linseed diet or a sunflower diet on performances, fatty acid composition, lipogenic enzyme activities and stearoyl-CoA-desaturase activity in the pig. *Livestock Science*. *Sous presse*

En cours

Mourot J., **Guillevic M.**, Effect of incorporation of hemp oil on growth performance and meat quality of growing finishing pigs. *Prochainement soumis*

Effects of PUFA on adipoconversion of piglet preadipocytes in primary culture. **Guillevic M.**, Ezanno H., Kouba M., Mourot J.

Influence of duration and time of dietary linseed diet supplementation on fatty acid profile and lipid metabolism of growing-finishing pigs. **Guillevic M.**, Chesneau G., Weill P., Mourot J.

Influence of a linseed diet on skeletal muscle traits of growing-finishing pigs. Azevard C., **Guillevic M.**, Gariépy C, Mourot J.

Congrès scientifiques

Communications orales

Guillevic M., Le Minous A.E., Blochet J.E., Damon M., Mourot J., 2007. Effet de rations enrichies en acides gras oméga 3 ou oméga 6 chez le porc : impacts sur la qualité nutritionnelle et la qualité sensorielle des produits transformés. Journées de la Recherche Porcine 39, 223-230.

Guillevic M., Blochet JE, Le Minous AE, Robin G, Mourot J., 2008. Impact de la nature des acides gras dans l'alimentation de porcs sur la qualité des produits de charcuterie. Partie 1 : Effet sur la qualité nutritionnelle. 12^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, Tours, 8 et 9 octobre 2008. Viandes et produits carnés, HS 12^{èmes} JSMTV, p57-58

Guillevic M., Ezanno H, Mourot J., 2008. La nature des acides gras influence-t-elle l'adipoconversion des préadipocytes en culture primaire chez le porcelet ? 7^{ème} Journées Francophone de Nutrition, Brest, 26 – 28 novembre 2008. Nutrition Clinique et Métabolisme, 22, S39

Communications affichées

Guillevic M., Damon M., Robin G., Mourot J., Influence of a high-linolenic acid diet on lipogenesis in muscle and adipose tissue of growing domestic pig. 10th European Nutrition Conference, Paris, 10th-13th July 2007. *Annals of Nutrition & Metabolism* 51 (suppl 1), 356-357.

Mourot J., **Guillevic M.**, Fillaut M., Robin G., 2008. Effet de l'incorporation d'huile de chanvre dans le régime sur les performances de croissance et la qualité nutritionnelle de la viande de porc. *Journées de la Recherche Porcine* 40, 87-88.

Avezard C., **Guillevic M.**, Gariépy C., Mourot J., 2008. Effet des acides gras n-3 de l'aliment sur le développement des adipocytes intramusculaires et sur la composition en acides gras des lipides polaires et neutres du muscle de porc. 12^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes. *Viandes et produits carnés*, HS 12^{èmes} JSMTV, p69-70

Guillevic M., Fillaut M., Kouba M., Mourot J., 2008. L'augmentation de la durée de distribution d'aliments riches en acide α -linoléique se répercute-t-elle dans les tissus du porc ? 12^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, Tours, 8 et 9 octobre 2008. *Viandes et produits carnés*, HS 12^{èmes} JSMTV, p83-84

Le Minous A.E., De Broucker T., Blochet J.E., **Guillevic M.**, Mourot J., 2008. Impact de la nature des acides gras dans l'alimentation de porcs sur la qualité des produits de charcuterie. Partie 2 : Effet sur la qualité sensorielle et l'acceptabilité des produits de charcuterie., 12^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, Tours, 8 et 9 octobre 2008. *Viandes et produits carnés*, HS 12^{èmes} JSMTV, 87-88

De Broucker T., Le Minous A.E., Blochet J.E., **Guillevic M.**, Mourot J., 2008. Impact de la nature des acides gras dans l'alimentation de porcs sur la qualité des produits de charcuterie. Partie 3 : Effet sur les propriétés fonctionnelles des viandes. 12^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, Tours, 8 et 9 octobre 2008. *Viandes et produits carnés*, HS 12^{èmes} JSMTV, p75-76

Chesneau G., **Guillevic M.**, Mourot J., 2009. Impact des paramètres technologiques de cuisson-extrusion des graines de lin sur la composition en acides gras du foie, des tissus musculaire et adipeux du porc charcutier. *Journées de la Recherche Porcine* 41, 63-64.

Publication de vulgarisation

Mourot J., **Guillevic M.**, Blochet J.E., Le Minous A.E., 2007. Lutter contre les croyances : une nouvelle évaluation de l'intérêt nutritionnel des charcuteries. *Revue de Nutrition Pratique* 19, 20-26.

Journées techniques

Impacts d'une supplémentation en AG n-3 sur la qualité technologique de la viande de porc. Journée Tradi-lin®, Pacé, 10 octobre 2006

GLOSSAIRE

5-LOX : 5-lipoxygenase
ACC : acétyl-CoA carboxylase
Acétyl-CoA : acétyl-Coenzyme A
Acide gras n-3 ou ω -3 : acide gras de la série n-3 ou ω -3
Acide gras n-6 ou ω -6 : acide gras de la série n-6 ou ω -6
ADNc : acide désoxyribonucléique complémentaire
AFSSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
AG : acide gras
AGM : acides gras monoinsaturés
AGPI : acides gras polyinsaturés
AGPI n-3 : acides gras polyinsaturés de la série n-3
AGPI n-6 : acides gras polyinsaturés de la série n-6
AGS : acides gras saturés
ALA : acide α -linoléique
ANC : apports nutritionnels conseillés
ARA : acide arachidonique
ARN : acide ribonucléique
ATP : adénosine triphosphate
BCA : bicinchoninic acid
BF₃ : trifluorure de Bore
BSA : bovin serum albumin *ou* albumine sérique bovine
C.E. : communauté européenne
C/EBP : CCAAT/enhancer binding protein
COX : cyclo-oxygenase
CPG : chromatographie en phase gazeuse
CT : threshold cycle
D5D : Δ 5 désaturase
D6D : Δ 6 désaturase
D9D : Δ 9 désaturase (voir SCD)
DGLA : dihomogamma-linoléique acid *ou* acide dihomogamma-linoléique
DHA : docosahexaenoic acid *ou* Acide docosahexaénoïque
DMEM : Dulbecco's modified Eagle's medium
DPA : docosapentaenoic acid *ou* Acide docosapentaénoïque
E : efficacité
EDTA : acide éthylène diamine tétracétique
EET : acides époxyeicotriénoïques

ELOVL : elongation of very long chain fatty acids
EM : enzyme malique
EPA : ecosapentaenoic acid *ou* acide écosapentaénoïque
ETR : écart type résiduel
FAD : flavine adénine dinucléotide
FADS : fatty acid desaturase
FAS : fatty acid synthase
FLAP : 5-lipoxygenase activating protein
G6PDH : glucose-6-phosphate deshydrogenase
GL : graines de lin
GLM : modèle général linéaire
Glucose-6-P : glucose-6-phosphate
GMQ : gain moyen quotidien
HACCP : Analyse des risques et points critiques pour leur maîtrise
HCO₃ : hydrogencarbonate
HDL : high density lipoprotein
HPLC : high performance liquid chromatography *ou* Chromatographie liquide haute performance
KAR : 3-ketoacyl-CoA reductase
LA : acide linoléique
LD : *longissimus dorsi* *ou* long dorsal
LDL : low density lipoprotein
LOX : lipo-oxygenases
LPL : lipoprotéine lipase
LT : leucotriènes
LT : lipides totaux
LTA4 : leucotriène A4
Malonyl-CoA : malonyl-CoenzymeA
MDA : malondialdéhyde
MOPS : acide n-morpholino-3-propane sulfonique
NADP : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate
NADPH : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate réduit
ND : non détectable
NS : non significatif
p/v : poids / volume
PCR : polymerase chain reaction *ou* réaction de polymérisation en chaîne
PG : prostaglandines
PGG : prostaglandine G
PGH : prostaglandine H

PGI : prostacyclines
pH : pourcentage d'hydrogène
pHu : pourcentage d'hydrogène ultime
PNNS : plan national nutrition santé
PPAR : peroxyosome proliferator activated receptor
pref-1 : preadipocyte factor-1
P-S : penicilline-streptomycine
qsp : quantité suffisante pour
RT-PCRq : reverse transcription-polymerase chain *ou* réaction quantitative en temps réel
SAS : statistical analysis system
SCD : stearyl CoA desaturase
SM : *semimembranosus* *ou* semi-membraneux
SP : sérum de porc

SREBP : sterol responsive element binding protein
SVF : sérum de veau foetal
T3 : triiodothyronine
TA : tissu adipeux
TAIJ : tissu adipeux intermusculaire du jambon
TASCD : tissu adipeux sous cutané dorsal
TBA : acide thio-barbiturique
TCA : acide trichloracétique
TER : *trans*-2,3-enoyl-CoA reductase
TNF α : tumor necrosis factor alpha
Tpm : tour par minute
TVM : teneur en viande maigre
TX : thromboxanes
VLDL : very low density lipoprotein

NOMENCLATURE DES ACIDES GRAS IDENTIFIES

Formule	Nom vernaculaire	Abréviation	Nom IUPAC
C12:0	Acide laurique		Dodecanoic acid
C14:0	Acide myristique		Tetradecanoic acid
C14:1 n-7	Acide myristoïque		<i>cis</i> -tetradec-7-enoic acid
C16:0	Acide palmitique		Hexadecanoic acid
C16:1 n-7	Acide palmitoléique		<i>cis</i> -hexadec-9-enoic acid
C18:0	Acide stéarique		Octadecanoic acid
C18:1 n-9	Acide oléique		<i>cis</i> -octadec-9-enoic acid
C18:2 n-6	Acide linoléique	LA	<i>cis,cis</i> -octadeca-9,12-dienoic acid
C18:3 n-3	Acide α -linoléique	ALA	<i>all-cis</i> -octadeca-9,12,15-trienoic acid
C20:0	Acide arachidique		Icosanoic acid
C20:1 n-9	Acide gondoïque		<i>cis</i> -icos-11-enoic acid
C20:2 n-9	-		<i>cis,cis</i> -icosa-11,14-dienoic acid
C20:3 n-6	Acide dihomog γ -linoléique		<i>all-cis</i> -icosa-8,11,14-trienoic acid
C20:4 n-6	Acide arachidonique	ARA	<i>all-cis</i> -icosa-5,8,11,14-tetraenoic acid
C20:5 n-3	Acide timnodonique	EPA	<i>all-cis</i> -icosa-5,8,11,14,17-pentaenoic acid
C22:0	Acide béhénique		Docosanoic acid
C22:1 n-9	Acide gondoïque		<i>cis</i> -docos-13-enoic acid
C22:5 n-3	Acide clupanodonique	DPA	<i>all-cis</i> -docosa-7,10,13,16,19-pentaenoic acid
C22:6 n-3	Acide cervonique	DHA	<i>all-cis</i> -docosa-4,7,10,13,16,19-hexaenoic acid
C24:0	Acide lignocérique		Tetracosanoic acid
C24:1 n-9	Acide nervonique		<i>cis</i> -tetracos-15-enoic acid

LISTE DES FIGURES

BIBLIOGRAPHIE

- Figure 1.** Schéma des molécules d'acylglycérols : triglycérides (a), diglycérides (b) et de monoglycérides (c).
- Figure 2.** Biosynthèse des triacylglycérols.
- Figure 3.** Représentation d'un phospholipide.
- Figure 4.** Schéma de la biosynthèse des eicosanoïdes à partir des acides arachidonique et eicosapentaénoïque conduisant à la synthèse des prostanoïdes (voie des cyclo-oxygénases) et des leucotriènes (voie de la lipo-oxygénase).
- Figure 5.** Synthèse des prostanoïdes et des leucotriènes à partir de l'acide arachidonique.
- Figure 6.** Biosynthèse des acides gras polyinsaturés $\omega 7$ (ou n-7), $\omega 9$ (ou n-9), $\omega 6$ (ou n-6) et $\omega 3$ (ou n-3)
- Figure 7.** Teneur en C18:3 n-3 de différents végétaux exprimée en pourcentage d'acides gras identifiés.
- Figure 8.** Synthèse des prostanoïdes.
- Figure 9.** Synthèse des leucotriènes.
- Figure 10.** Schéma de la β -oxydation *ou* hélice de Lynen.
- Figure 11.** Evolution de la production et de la consommation de viande de porc en France.
- Figure 12.** Les morceaux de découpe du porc.
- Figure 13.** Relation entre la quantité d'ALA ingéré (g/j) et les teneurs de la viande de porc en AG n-3.
- Figure 14.** Schéma de la lipogénèse chez les mammifères.
- Figure 15.** Mécanisme de régulation de la delta-6 désaturase.
- Figure 16.** Elongation des acides gras chez les mammifères.
- Figure 17.** Auto-oxydation des lipides.
- Figure 18.** Schéma hypothétique de l'apport en matière grasse, acides gras (n-6, n-3, trans- et totaux) en pourcentage de calorie par rapport au lipide depuis les populations de chasseurs – cueilleurs jusqu'à l'aire industrielle.

MATERIELS ET METHODES

- Figure 19.** Découpe hollandaise normalisée du porc charcutier.
- Figure 20.** Composantes de la couleur mesurée au colorimètre représentés par la luminosité L^* , la composante de couleur rouge – vert a^* et la composante de couleur jaune – bleu b^* .
- Figure 21.** Programme d'élévation de température de la colonne du chromatographe.

ETUDE I

- Figure 22.** Schéma expérimental de la conduite d'élevage.

- Figure 23.** Quantité en mg/100 g des principaux acides gras n-3 du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers.
- Figure 24.** Quantité en mg/100 g des principaux acides gras n-3 du muscle longissimus dorsi des porcs charcutiers.
- Figure 25.** Peroxydation des lipides du *longissimus dorsi* des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min.
- Figure 26.** Peroxydation des lipides des côtes de porcs des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min.
- Figure 27.** Peroxydation des lipides des poitrines salées / fumées des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min.
- Figure 28.** Peroxydation des lipides du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min.
- Figure 29.** Peroxydation des lipides des saucissons secs des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min.
- Figure 30.** Peroxydation des lipides des côtes de porcs, du *longissimus dorsi*, de la poitrine salée / fumée et du saucisson sec des porcs charcutiers.
- Figure 31.** Influence d'une alimentation à base de lin sur les propriétés techno-fonctionnelles de différentes pièces du porc.

ETUDE II

- Figure 32.** Teneur en acide eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA) de quelques poissons et coquillages.
- Figure 33.** Effet de l'apport (DHA) par les algues dans l'alimentation du porc sur les dépôts des acides gras polyinsaturés à longue chaîne n-3 dans la côte de porc entière (EPA, DPA, DHA).
- Figure 34.** Composition en acides gras n-3 du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs (mg/100g).
- Figure 35.** Composition en acides gras n-3 du muscle *longissimus dorsi* des porcs (mg/100g).
- Figure 36.** Composition en acides gras n-3 du foie des porcs (mg/100g).

ETUDE III

- Figure 37.** Activités endocrines et paracrines de l'adipocyte.
- Figure 38.** Les différentes étapes de l'adipoconversion.
- Figure 39.** Schéma expérimental des cultures primaires de préadipocytes de porcelet sur 9 jours.
- Figure 40.** Effet de l'ajout des AGPI n-3 et n-6 à 100 µM dans le milieu de culture sur la quantité d'ARN transcrits du gène TNFα.
- Figure 41.** Photographies de champs microscopiques montrant l'évolution d'une culture de préadipocytes témoin ou avec de l'ARA à 100 µM, à J3, J6 et J9 de culture, suite à une coloration au rouge à huile et à l'hémalun de Mayer.
- Figure 42.** Effet de l'ajout des AGPI n-3 et n-6 à 100 µM dans le milieu de culture sur la quantité d'ARN transcrits du gène de l'enzyme malique et de la lipolyse lipase.

- Figure 43.** Comparaison des teneurs des principaux AGPI n-3 et n-6 (en pourcentage des acides gras identifiés) des préadipocytes témoin avec ceux incubés avec de l'ALA, EPA, DHA, LA ou ARA à 10 ou 100 μ M jusqu'à J6 de culture.
- Figure 44.** Effet de l'ajout des AGPI n-3 et n-6 à 100 μ M dans le milieu de culture sur la quantité d'ARN transcrits du gène FADS1 (fatty acid desaturase 1 ; A), FADS2 (fatty acid desaturase 2 ; B) et ELOVL5 (elongation of very long chain fatty acids 5 ; C), exprimés en unité arbitraire (ratio gène/18S), des préadipocytes à J6 de culture

DISCUSSION GENERALE

- Figure 45.** Représentation du pourcentage du C18:3 n-3 (ALA) déposé dans les tissus adipeux (TA) par rapport à la quantité ingérée.
- Figure 46.** Représentation du pourcentage C18:3 n-3 (ALA) déposé dans les muscles par rapport à la quantité ingérée.
- Figure 47.** Droite de régression linéaire entre la quantité de C18:3 n-3 (ALA) ingéré et celle déposée dans les tissus adipeux.
- Figure 48.** Droite de régression linéaire entre la quantité de C18:3 n-3 (ALA) et celle de DHA déposée dans les tissus musculaires.

LISTE DES TABLEAUX

BIBLIOGRAPHIE

- Tableau 1.** Teneur en lipides de quelques muscles de porc charcutier. Les résultats sont exprimés en pourcentage de tissus frais.
- Tableau 2.** Composition en acides gras de différents tissus du porc charcutier.
- Tableau 3.** Composition en acides aminés de la viande de porc exprimé en mg/100 g.
- Tableau 4.** Besoin nutritionnel en acides aminés indispensables de l'adulte et profils de référence en acides aminés indispensables.
- Tableau 5.** Point de fusion des acides gras.
- Tableau 6.** Rapport des AG n-6 / AG n-3 dans différentes populations.
- Tableau 7.** Estimation de la consommation en acides gras polyinsaturés.
- Tableau 8.** Tableau synthétique des apports conseillés en acides gras chez l'adulte.

MATERIELS ET METHODES

- Tableau 9.** Composition du milieu réactionnel pour le dosage de l'enzyme malique ou de la glucose-6-phosphate-déshydrogénase.
- Tableau 10.** Composition des milieux d'incubation et de la solution radioactive pour le dosage de l'acetyl-CoA-carboxylase.
- Tableau 11.** Composition du milieu réactionnel pour le dosage de l'acetyl-CoA-carboxylase.

ETUDE I

- Tableau 12.** Composition des régimes expérimentaux des porcs charcutiers.
- Tableau 13.** Matières premières carnées nécessaires à l'élaboration des produits de charcuteries élaborées par les industriels de la salaisonnerie.
- Tableau 14.** Effets des régimes sur les performances de croissance des porcs charcutiers.
- Tableau 15.** Consommation en AG n-3 et n-6 des porcs charcutiers.
- Tableau 16.** Rendement de découpe et paramètres de la qualité technologique des porcs charcutiers.
- Tableau 17.** Teneur en lipides totaux des tissus adipeux, musculaires et du foie des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport à la matière fraîche.
- Tableau 18.** Teneur en lipides totaux des côtes de porc crues et cuites des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport à la matière fraîche.
- Tableau 19.** Teneur en lipides totaux des produits de charcuterie (n=5 par lot) des porcs nourris aux régimes lin, tournesol et contrôle.
- Tableau 20.** Composition en acides gras du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

- Tableau 21.** Composition en acides gras de la panne des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 22.** Composition en acides gras du tissu adipeux intermusculaire du jambon des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 23.** Composition en acides gras d'une biopsie à 80 kg de poids vif du tissu adipeux sous cutané du cou des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 24.** Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* (fraction lipides totaux) de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 25.** Composition en acides gras du muscle *semimembranosus* de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 26.** Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* (fraction lipides neutres) de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 27.** Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* (fraction lipides polaires) de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 28.** Composition en acides gras du foie de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 29.** Composition en acides gras des côtes de porc crues des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 30.** Composition en acides gras des côtes de porc cuites des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'acides gras identifiés.
- Tableau 31.** Composition en acides gras de l'andouille réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g d'andouille.
- Tableau 32.** Composition en acides gras du jambon cuit réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de jambon cuit.
- Tableau 33.** Composition en acides gras du jambon cru réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de jambon cru.
- Tableau 34.** Composition en acides gras de la mousse de foie réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de mousse de foie.
- Tableau 35.** Composition en acides gras du pâté de campagne en terrine réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de pâté de campagne en terrine.
- Tableau 36.** Composition en acides gras du pâté de campagne en conserve réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'acides gras identifiés.
- Tableau 37.** Composition en acides gras de la poitrine salée / fumée réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de poitrine salée / fumée.
- Tableau 38.** Composition en acides gras du rôti de porc réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de rôti de porc.
- Tableau 39.** Composition en acides gras de la saucisse de porc réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisse de porc.

- Tableau 40.** Composition en acides gras de la saucisse knack réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisse knack.
- Tableau 41.** Composition en acides gras du saucisson à l'ail réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisson à l'ail.
- Tableau 42.** Composition en acides gras du saucisson sec réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisson sec.
- Tableau 43.** Recouvrement en précurseur ALA par l'ingestion de 100 g de produits de charcuterie issus de porcs nourris au régime lin.
- Tableau 44.** Composition en lipides neutres et en lipides polaires des lipides du muscle *longissimus dorsi* de porcs charcutier. Les résultats sont exprimés en mg pour 100 g de muscle.
- Tableau 45.** Typage des fibres musculaires du muscle *longissimus dorsi* chez le porc charcutier (pourcentage des fibres totales).
- Tableau 46.** Effet des régimes sur le nombre et le diamètre des adipocytes du muscle *longissimus dorsi* des porcs charcutiers.
- Tableau 47.** Cellularité du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers.
- Tableau 48.** Cellularité de la panne des porcs charcutiers.
- Tableau 49.** Paramètres sanguins (cholestérol, triglycérides, glucose, HDL-cholestérol et LDL-cholestérol) des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg/l de plasma.
- Tableau 50.** Mesure de l'activité de la β -hydroxyacyl Coenzyme A dehydrogenase des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en μmol de NADH disparue/ min / g de muscle.
- Tableau 51.** Enzymes de la lipogenèse des porcs charcutiers.
- Tableau 52.** Activités delta-9 désaturases mesurées sur le foie, le tissu adipeux sous cutané dorsal ainsi que sur le muscle *longissimus dorsi* des porcs nourris aux régimes contrôle, tournesol et lin. Les résultats sont exprimés en nmol d'acide oléique formé par heure et par mg de protéines.
- Tableau 53.** Effet des régimes sur les tests consommateurs. Les appréciations sont notées de 1 à 7 et les intentions de reconsommation sont exprimées en pourcentage (n=60 individus par produit de charcuterie. Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$).
- Tableau 54.** Analyse par le jury expert des produits de charcuterie. Seuls sont présentés les descripteurs discriminants des produits de charcuterie du lot lin.
- Tableau 55.** Propriétés des protéines du foie et des tissus musculaires *semimembranosus* et *longissimus dorsi*.
- Tableau 56.** Propriétés mécaniques et capacités gélifiantes du foie et des tissus musculaires *semimembranosus* et *longissimus dorsi* ainsi que la pénétrométrie au sein du gras de bardière.
- Tableau 57.** Propriétés fonctionnelles des produits transformés : cas de la mousse de foie et de la saucisse fine.

ETUDE II

- Tableau 58.** Teneurs en précurseurs des familles d'acides gras polyinsaturés n-6 et n-3 de quelques huiles réputées pour leur richesse en ces dernières.
- Tableau 59.** Composition centésimale et composition en acides gras des régimes alimentaires.
- Tableau 60.** Performances de croissance des porcs charcutiers.
- Tableau 61.** Composition de la carcasse des porcs charcutiers
- Tableau 62.** Teneur en lipides totaux du tissu adipeux sous cutané dorsal, du muscle *longissimus dorsi* ainsi que du foie de porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en g pour 100 g de tissu.
- Tableau 63.** Composition en acides gras du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 64.** Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* de porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.
- Tableau 65.** Composition en acides gras du foie de porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentages des acides gras identifiés.

ETUDE III

- Tableau 66.** Amorces utilisées pour la PCR en temps réel.
- Tableau 67.** Caractéristiques des animaux abattus pour l'analyse de l'adipoconversion des préadipocytes du TASC.D.
- Tableau 68.** Effet de l'introduction des acides gras dans le milieu de culture sur la prolifération des préadipocytes.
- Tableau 69.** Effet de l'introduction des acides gras dans le milieu de culture sur l'activité de l'enzyme malique à J6 de culture.
- Tableau 70.** Effet de l'ajout des AGPI n-3 et n-6 à 100 μ M dans le milieu de culture sur la quantité d'ARN transcrits du gène PPAR α (peroxysome proliferator activated receptor) et de SREBP1 (sterol responsive element binding protein).
- Tableau 71.** Teneurs en C16:0, C18:0 et C18:1 n-9 des préadipocytes témoins et ceux incubés avec de l'ALA, EPA, DHA, LA ou ARA à 10 ou 100 μ M, à J6 de culture.

DISCUSSION GENERALE

- Tableau 72.** Quantités de muscles et de tissus adipeux (en g) dans la carcasse des porcs des études expérimentales menées dans le cadre de la thèse.
- Tableau 73.** Teneur globale en acides gras n-3 dans l'ensemble des tissus adipeux et estimation du pourcentage d'ALA déposé par rapport à l'ALA ingéré.
- Tableau 74.** Teneur globale en acides gras n-3 dans l'ensemble des tissus musculaires et estimation du pourcentage de l'ALA déposé par rapport à l'ALA ingéré.
- Tableau 75.** Equation des droites de régression et des coefficients de corrélation en fonction des acides gras n-3 et des tissus.

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1. Composition centésimale de l'aliment de base des porcs charcutiers de l'INRA, UMR SENAH**
- Annexe 2. Etude I : Teneur en acides gras des tissus adipeux et musculaires des porcs charcutiers (mg/100g)**
1. Tissu adipeux sous cutané dorsal
 2. Panne
 3. Tissu adipeux intermusculaire du jambon
 4. Muscle *longissimus dorsi*
 5. Muscle *semimembranosus*
- Annexe 3. Etude I : Teneur en acides gras du tissu adipeux, du muscle *longissimus dorsi* et du foie des porcs charcutiers (mg/100g)**
1. Tissu adipeux sous cutané dorsal
 2. Muscle *longissimus dorsi*
 3. Foie
- Annexe 4. Composition des solutions pour la culture cellulaire**
1. Tampon HEPES Phosphate (pH 7,4)
 2. Tampon Earl (pH 7,4)
 3. Hemalun de Mayer
 4. Tampon VMG (pH 7,4) + Héparine
 5. Tampon MOPS 20X (pH 7)
- Annexe 5. Composition des milieux de culture**
1. Composition du milieu d'inoculation
 2. Composition du milieu sérique
 - J1 de culture
 - J3 de culture
 3. Composition du milieu défini

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	i
VALORISATION DES TRAVAUX	iv
GLOSSAIRE	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
LISTE DES ANNEXES	xv
INTRODUCTION GENERALE	1
BIBLIOGRAPHIE.....	5
1. DEFINITIONS.....	6
1.1. La viande.....	6
1.2. Les lipides.....	6
2. LES ACIDES GRAS	11
2.1. Historique.....	11
2.2. Acides gras essentiels aux précurseurs indispensables.....	12
2.3. Les sources.....	13
2.4. Fonctions biochimiques et rôles physiologiques.....	14
3. LA VIANDE PORCINE	19
3.1. La production porcine.....	19
3.2. La consommation de viande de porc.....	20
3.3. Une mauvaise image de la viande.....	21
3.4. Apports nutritionnels de la viande	21
4. QUALITE DU PORC CHARCUTIER	24
4.1. Qualité de la carcasse.....	24
4.2. Qualité de la viande	25
5. FACTEURS DE VARIATION DES COMPOSANTES DE LA QUALITE DE LA VIANDE	26
5.1. Qualité sanitaire.....	26
5.2. Qualité nutritionnelle	26
5.3. Qualité sensorielle.....	30
5.4. Qualité technologique	32
6. CONSTRUCTION DE LA QUALITE NUTRITIONNELLE	32
6.1. Mise en place du tissu adipeux.....	32
6.2. Mécanismes biochimiques modifiant la composition en lipides et en acides gras des tissus	34
7. ACIDES GRAS ESSENTIELS	39
7.1. Consommation, recommandation.....	39
7.2. Stratégies à mettre en place	40
8. OBJECTIFS.....	42
MATERIELS ET METHODES	44
1. REGIMES EXPERIMENTAUX	45
2. ANIMAUX ET PRELEVEMENTS EXPERIMENTAUX.....	45
2.1. Animaux expérimentaux.....	45
2.2. Abattage et découpe des animaux	46
2.3. Prélèvements des échantillons.....	46
2.4. Elaboration des produits de transformations.....	47
3. DOSAGES DE LABORATOIRE.....	47
3.1. Caractérisation des aliments expérimentaux	47
3.2. Caractérisation de la qualité technologique de la viande de porc.....	48
3.3. Caractérisation de la fraction lipidique.....	49
3.4. Caractérisation de la peroxydation des lipides.....	51
3.5. Caractérisation enzymatique.....	52
3.6. Détermination de la quantité de protéines	56
3.7. Dosage des paramètres sanguins	56

3.8.	<i>Caractérisation des tissus adipeux et musculaires</i>	58
4.	ANALYSES STATISTIQUES	59
ÉTUDE I - EFFETS DE LA DUREE DE DISTRIBUTION DE LA GRAINE DE LIN SUR LES PERFORMANCES DE CROISSANCE, LE METABOLISME DES LIPIDES ET LA QUALITE NUTRITIONNELLE DE LA VIANDE DE PORC		60
1.	INTRODUCTION	61
2.	MATERIELS ET METHODES	62
2.1.	<i>Régimes alimentaires</i>	62
2.2.	<i>Animaux expérimentaux</i>	63
2.3.	<i>Prélèvements des tissus et dosages expérimentaux</i>	63
2.4.	<i>Découpe et transformation</i>	65
2.5.	<i>Statistiques</i>	66
3.	RESULTATS	66
3.1.	<i>Performances de croissance</i>	66
3.2.	<i>Paramètres de qualité technologique</i>	68
3.3.	<i>Teneurs en lipides totaux</i>	71
3.4.	<i>Composition en acides gras des tissus des porcs charcutiers</i>	72
3.5.	<i>Peroxydation des lipides</i>	88
3.6.	<i>Classes de lipides neutres et polaires</i>	89
3.7.	<i>Cellularité des tissus musculaires et adipeux</i>	90
3.8.	<i>Paramètres sanguins</i>	92
3.9.	<i>β-oxydation : mesure de l'activité de la β-hydroxyacyl Coenzyme A dehydrogenase</i>	92
3.10.	<i>Enzymologie</i>	93
3.11.	<i>Analyses sensorielles des produits de charcuterie</i>	96
3.12.	<i>Qualité technologique des produits de charcuterie enrichis en acides gras polyinsaturés</i>	98
4.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	102
ÉTUDE II - EFFET DES APPORTS ET DE LA NATURE DES ACIDES GRAS N-3 SUR LES PERFORMANCES DE CROISSANCE ET LA QUALITE NUTRITIONNELLE DE LA VIANDE DE PORC CHARCUTIER		106
1.	INTRODUCTION	107
2.	MATERIELS ET METHODES	110
2.1.	<i>Régimes alimentaires</i>	110
2.2.	<i>Animaux</i>	111
2.3.	<i>Prélèvements et dosages de laboratoire</i>	111
2.4.	<i>Statistiques</i>	112
3.	RESULTATS ET DISCUSSION	112
3.1.	<i>Effets des régimes sur les performances de croissance des porcs charcutiers</i>	112
3.2.	<i>Effets des régimes sur la composition de la carcasse des porcs charcutiers</i>	113
3.3.	<i>Effets des régimes sur la qualité nutritionnelle de la viande de porcs charcutiers</i>	115
4.	CONCLUSION	122
ÉTUDE III - EFFETS DES ACIDES GRAS N-3 SUR L'ADIPOCONVERSION DES PREADIPOCYTES DE PORC		124
1.	INTRODUCTION	125
2.	MATERIELS ET METHODES	127
2.1.	<i>Culture cellulaire</i>	127
2.2.	<i>Mesure de la prolifération des préadipocytes</i>	128
2.3.	<i>Mesure de la différenciation des préadipocytes</i>	129
2.4.	<i>Analyses statistiques des résultats</i>	132
3.	RESULTATS	132
3.1.	<i>Effets des acides gras sur la prolifération des préadipocytes</i>	132
3.2.	<i>Effets des acides gras sur la différenciation des préadipocytes</i>	133
4.	DISCUSSION	136
4.1.	<i>Effets de la concentration en AGPI sur l'adipoconversion des préadipocytes</i>	136
4.2.	<i>Effets des AGPI sur l'adipoconversion des préadipocytes</i>	136
5.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	141
DISCUSSION GENERALE		143

CONCLUSION ET PERSPECTIVES	149
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	154
ANNEXES	181

INTRODUCTION GENERALE

Les produits animaux (lait, viandes, œufs) font partis traditionnellement de notre alimentation. Ils font parfois l'objet de critiques plus ou moins fondées et ils sont mis en cause dans l'apparition de certaines pathologies (maladies cardiovasculaires, obésité cancer...). Ces produits ne sont certainement pas mauvais pour la santé humaine, mais une surconsommation et un mauvais équilibre alimentaire peuvent effectivement induire un dysfonctionnement dans notre organisme. C'est pourquoi il existe depuis longtemps des recommandations alimentaires qui sont actuellement reprises dans le cadre du PNNS (Programme National Nutrition Santé) pour essayer d'améliorer l'état de santé globale de la population française.

Depuis quelques années, une démarche existe aussi pour essayer d'améliorer la qualité nutritionnelle des produits animaux en modifiant les pratiques d'élevage. Un rapport AFSSA, qui sera prochainement publié, est consacré à cette démarche. On y verra que la viande est un facteur important qui pourra avoir un impact sur la santé humaine.

La consommation de viande en France est de près de 90 kg équivalent carcasse par habitant et par an (Ofival, 2007). Cette consommation se répartit entre la viande porcine (35 kg /hab/an), la viande bovine (26 kg/hab/an), la volaille (24 kg/hab/an) et dans une moindre mesure, la viande ovine (4 kg/hab/an). D'autres produits carnés comme le lapin et les équidés présentent une part très restreinte de notre consommation.

La forte consommation de la viande de porc tant au niveau français, européen et mondial s'explique par le fait que depuis longtemps, le porc a été une viande peu chère à produire et à acheter. De plus, sa diffusion sous forme de viande fraîche ou de produits transformés (70 % de la production en France) la rend d'autant plus accessible.

Pour les consommateurs de viande, cette dernière doit répondre à leurs attentes en termes de qualité nutritionnelle, organoleptique, technologique et hygiénique. L'industrie agroalimentaire s'est intéressée depuis longtemps à la maîtrise des qualités hygiénique et technologique et celles-ci ne semblent plus poser de problèmes ou du moins en posent de manière ponctuelle. Les notions de qualités nutritionnelle et organoleptique sont plus récentes et sont actuellement prises en considération. Le gras ou tissu adipeux est une des composantes qui permet de faire varier ces qualités.

En terme de qualité gustative, les lipides jouent un rôle en tant que vecteur du goût (Wood et al., 2008). Nos apports quotidiens sont estimés à 90 g. Sur l'ensemble, près de 12 g sont

apportés par la viande de porc (Volatier et al., 2000). Cette dernière, contrairement aux idées reçues, peut être considérée comme une viande maigre si l'on exclut le gras visible, pour preuve, le muscle *longissimus dorsi* comporte en moyenne 2 % de lipides une fois paré. Il existe une relation positive entre la quantité de lipides au sein des muscles et la perception de la qualité sensorielle par le consommateur. Fernandez et al. (1990 a et b) ainsi que Brewer et al. (2001) ont montré qu'une teneur d'environ 2,5 à 3% de lipides au sein du muscle apparaissait comme optimale. Néanmoins, la teneur en lipides est variable selon la localisation anatomique des tissus (1,5 % pour le muscle *longissimus dorsi* à 5,5 % pour le muscle *semispinalis capitis*) mais aussi selon les produits de transformation (de 2 % pour du jambon cuit à 45 % pour du salami) (Mourot et al., 2007).

En termes de qualité nutritionnelle, les lipides jouent un rôle important puisque ces derniers, par leur quantité et leur qualité, peuvent avoir un rôle à jouer vis-à-vis de certaines de nos pathologies. Selon les recommandations émises par l'AFSSA dans leur dernière édition des apports nutritionnels conseillés (ANC, 2001), alors que l'apport en acides gras (AG) saturés est à réduire, celui en AG polyinsaturés est à rééquilibrer. L'apport en AG monoinsaturés dont l'acide oléique qui est l'AG principal dans la viande de porc, considérés comme neutres, n'est pas à modifier. Parmi les AGPI il existe deux familles d'AG essentiels, respectivement nommées n-6 et n-3, sans transformation métabolique de l'une à l'autre et sans substitution fonctionnelle possible de l'une à l'autre. Depuis l'avènement de l'ère industrielle, et plus particulièrement depuis la production de masse d'après guerre d'animaux de rente pour répondre à la demande, le rapport entre ces deux familles d'AGPI est totalement déséquilibré en faveur des AG n-6. L'AFSSA recommande un rapport entre les précurseurs de ces deux familles d'AGPI, C18:2 n-6 / C18:3 n-3, équivalent à 5 pour un apport quotidien en précurseur des AG n-3 de 2 g.

Plusieurs solutions existent pour augmenter nos apports quotidiens en AG n-3, la solution de la filière animale en est une. L'orientation de la production porcine se justifie d'une part, comme chez tous les monogastriques, par la très bonne relation entre les AG présents dans l'alimentation et les AG qui seront retrouvés dans les tissus (Mourot et Hermier, 2001), et d'autre part, par l'importance de l'apport lipidique issu de la viande porcine dans notre consommation.

L'objectif de ce travail de thèse, financé par l'entreprise VALOREX dans le cadre d'une convention CIFRE et réalisé à l'INRA - UMR 1079 SENAH était, au travers de l'alimentation des animaux, d'améliorer la qualité nutritionnelle de la viande de porc. L'amélioration de cette dernière, sous l'aspect lipide, repose sur la compréhension de sa construction (adipoconversion des préadipocytes, synthèse des lipides et acides gras), préservation (lipoperoxydation), et mise à disposition pour le consommateur (composition en acides gras).

La première partie de ce mémoire portera sur une présentation des connaissances sur les lipides et la construction de la qualité chez le porc ainsi que sur l'action des acides gras n-3 vis-à-vis de la santé humaine. Ensuite, seront présentées successivement les trois études expérimentales menées durant ce travail de thèse. Et enfin, dans une dernière partie, nous discuterons globalement nos résultats pour nous permettre d'émettre des perspectives sur l'ensemble de nos travaux.

BIBLIOGRAPHIE

1. DEFINITIONS

1.1. La viande

La viande est un aliment consommé par l'homme depuis toujours. Elle est synonyme de force, de santé et de richesse (Denoyelle, 2008). Pourtant, malgré la popularité de ce vocable, il n'existe pas de définition consensuelle à ce jour dans les communautés des producteurs, industriels, commerçants et des scientifiques. Ainsi, le mot « viande » est une appellation générique recouvrant une grande variété de « viandes ». Selon le dictionnaire de l'académie française, (8^{ème} édition, 1932-1935), la viande est définie ainsi : « chair des animaux et des oiseaux dont on se nourrit. Il distingue 3 types de viandes : la grosse viande ou viande de boucherie (bœuf, mouton, porc, etc.), la viande blanche (veau, volaille, lapin) et la viande noire (lièvre, chevreuil, sanglier, etc.) ». Selon le *codex alimentarius* (2005), la viande correspond à « toutes les parties d'un animal qui sont destinés à la consommation humaine ou ont été jugées saines et propres à cette fin ». En conséquence, sous le terme « viande », on peut aussi bien parler des muscles de la carcasse que des produits tripiers. La viande peut aussi recouvrir des produits issus des poissons et des mollusques. Traditionnellement, du moins en Europe, nous distinguerons trois catégories :

- les animaux de boucherie : bœuf, veau, porc, mouton, agneau, cheval, chevreuil ;
- les animaux de basse-cour : poulet, dinde, canard, pintade, oie, pigeon, lapin
- le gibier : sanglier, chevreuil, lièvre ;

D'autres catégories peuvent être considérées en prenant en compte la spécificité régionale. Les viandes dites exotiques sont constituées d'animaux non rencontrés en Europe tels que l'autruche, le bison, le zébu, etc.

1.2. Les lipides

1.2.1. Généralités

Le terme de lipides regroupe un ensemble de molécules chimiques hétérogènes qui ont pour particularité commune de ne pas être solubles dans l'eau mais solubles dans les solvants non polaires tels que le chloroforme. Ils peuvent remplir les fonctions de réserve, de structure ou bien de métabolite. D'une manière générale, la fonction de stockage est assurée par les triglycérides, celle de structure par les phospholipides et les fonctions métaboliques par les eicosanoïdes.

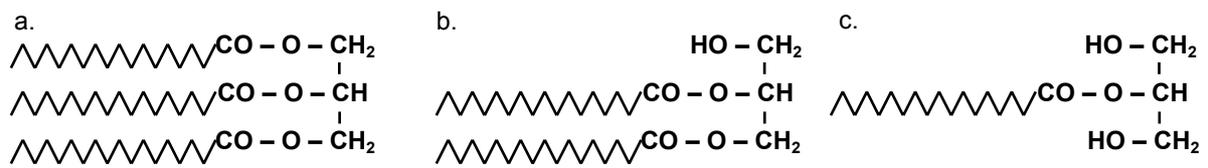


Figure 1. Schéma des molécules d'acylglycérols : triglycérides (a), diglycérides (b) et de monoglycérides (c).

Les acides gras (AG) sont des molécules communes à l'ensemble des lipides. Ces derniers se composent d'une chaîne hydrocarbonée linéaire de longueur variable et dont les extrémités sont constituées par des groupements carboxyle (COOH) et méthyle (CH₃). La nomenclature des AG repose sur la longueur de leur chaîne carbonée ainsi que sur le nombre, la position ainsi que la configuration de leurs doubles liaisons.

Les AG sont regroupés par famille selon leur degré d'insaturation ou nombre de doubles liaisons qu'ils renferment. On distingue des AG saturés (pas d'insaturation) et des AG insaturés présentant une ou plusieurs insaturations. Ces derniers sont appelés monoinsaturés lorsque les doubles liaisons sont au nombre de une, ou polyinsaturés lorsqu'elles sont présentes au nombre de deux ou plus.

Les doubles liaisons disposées le long de la chaîne hydrocarbonée des AG sont systématiquement distantes les unes des autres de trois atomes de carbone. Ces doubles liaisons sont majoritairement en configuration *cis*, c'est-à-dire que les deux parties de la chaîne hydrocarbonée située de part et d'autre de la double liaison sont du même côté par rapport au plan de la double liaison. Dans le cas d'une configuration *trans*, les deux parties de la chaîne hydrocarbonée sont situées dans les côtés opposés par rapport au plan de la double liaison.

Les familles d'AG insaturés se distinguent entre eux par la position de leur première double liaison par rapport à l'extrémité méthyle. Ainsi les AG de la famille – ou série – oméga 3 – ou n-3 – ont pour point commun d'avoir en troisième position à partir de l'extrémité méthyle la première de leurs doubles liaisons. On distingue aussi les AG des séries n-9, n-7 et n-6.

1.2.2. Classes de lipides

1.1.1.1. *Triglycérides*

Les triglycérides correspondent à la forme principale de stockage des lipides pour fournir de l'énergie. Ils sont trouvés aussi bien chez les animaux que chez les végétaux. Structurellement parlant, les triglycérides sont constitués d'un groupement glycérol sur lequel se trouvent 3 AG estérifiés. Lorsque ces AG sont au nombre de 2, on parlera de diglycérides et lorsqu'uniquement un seul acide gras estérifié sera présent, on parlera de monoglycéride (figure 1).

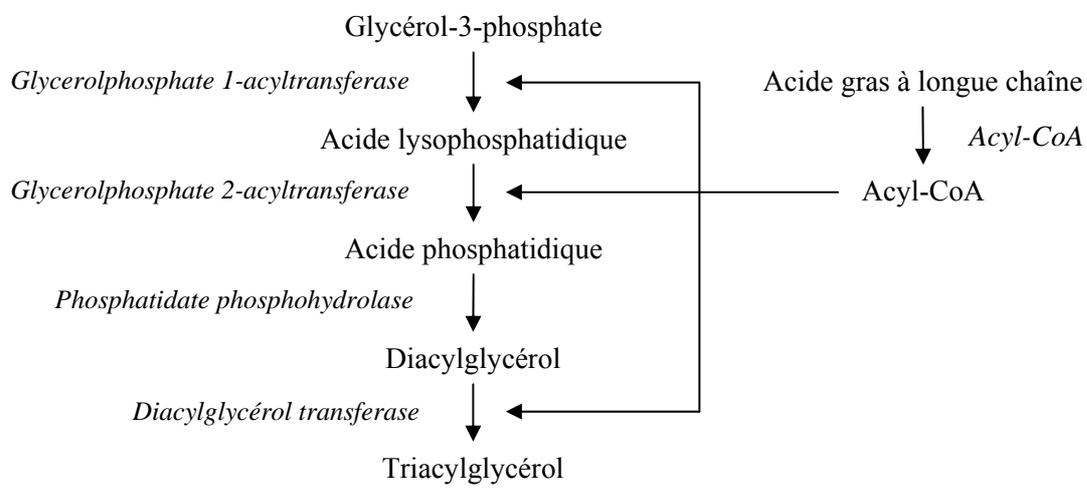


Figure 2. Biosynthèse des triacylglycérols (Mersmann, 1986).

C'est au sein des adipocytes, dans les vacuoles lipidiques, que seront stockés les triglycérides. Chez les poissons gras des mers froides, le stockage des triglycérides s'effectue au sein du muscle (maquereau). Chez la morue, c'est dans le foie que le stockage s'effectue.

La molécule de triglycéride est donc composée de 3 AG. Selon l'espèce animale, la nature des AG présents en position 1, 2 ou 3 n'est pas la même. En effet, dans les triglycérides du lait de vache il y a en position 3 un acide gras court, alors que dans le lait humain, il y a en position 1 un acide gras insaturé et en position 2 un acide gras saturé (16:0). Au sein des tissus animaux, la disposition n'est pas la même. D'une manière générale, un acide gras saturé serait présent en position 1 alors qu'en position 2 se trouverait un acide gras insaturé ou un acide gras à courte chaîne carbonée. Au niveau de la position 3, il n'y a pas de tendance observée (British Nutrition Foundation, 1992). Dans le cas particulier du porc, il y a en position 1 un acide gras insaturé, le plus souvent le C18:1 n-9, en position 2 un acide gras saturé, C16:0, et en position 3, un acide gras insaturé de type C18:1 n-9 ou C18:2 n-6 (Christie et Moore, 1970).

L'origine des triglycérides présents au sein des tissus de l'animal peut être due à l'absorption des triglycérides alimentaires ou à la synthèse *de novo*.

La part des triglycérides provenant de l'alimentation est d'autant plus importante que l'on se trouve chez des animaux monogastriques chez qui la structure des lipides ingérés n'est pas altérée contrairement à ce qui se passe chez les animaux polygastriques. Ainsi, chez l'homme comme chez le porc, il y a une relation très forte entre les lipides présents dans l'alimentation et ceux qui seront déposés. Il faut noter que chez l'homme, de 95 à 98 % des lipides alimentaires sont composés de triglycérides. C'est donc un puissant levier d'action pour les interventions nutritionnelles.

La synthèse *de novo* des triglycérides est sous le contrôle de l'alimentation ainsi que sous le contrôle hormonal. Chez le porc, un régime peu riche en lipides entraînera une augmentation de la synthèse *de novo* alors qu'un régime riche en lipides conduira à l'inverse (Mersmann, 1986).

La voie principale de biosynthèse des triglycérides est la voie des glycérol-phosphate (figure 2).

1.1.1.2. Phospholipides

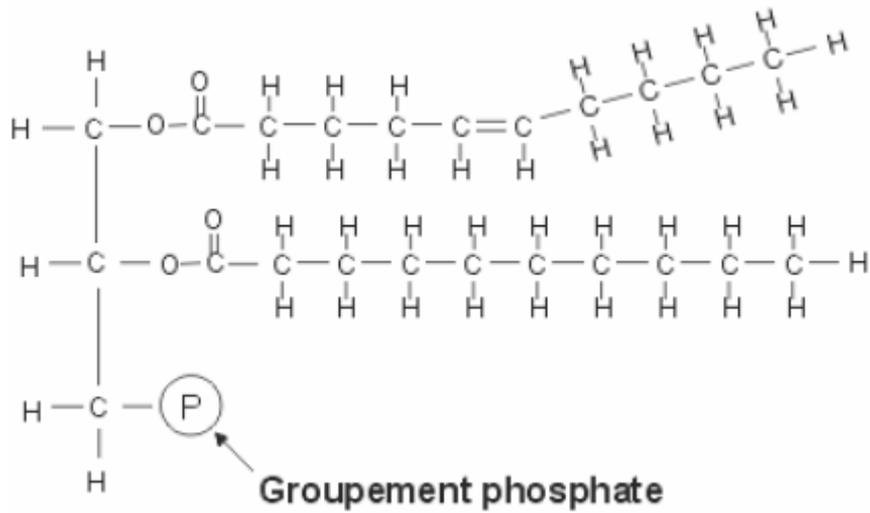


Figure 3. Représentation d'un phospholipide.

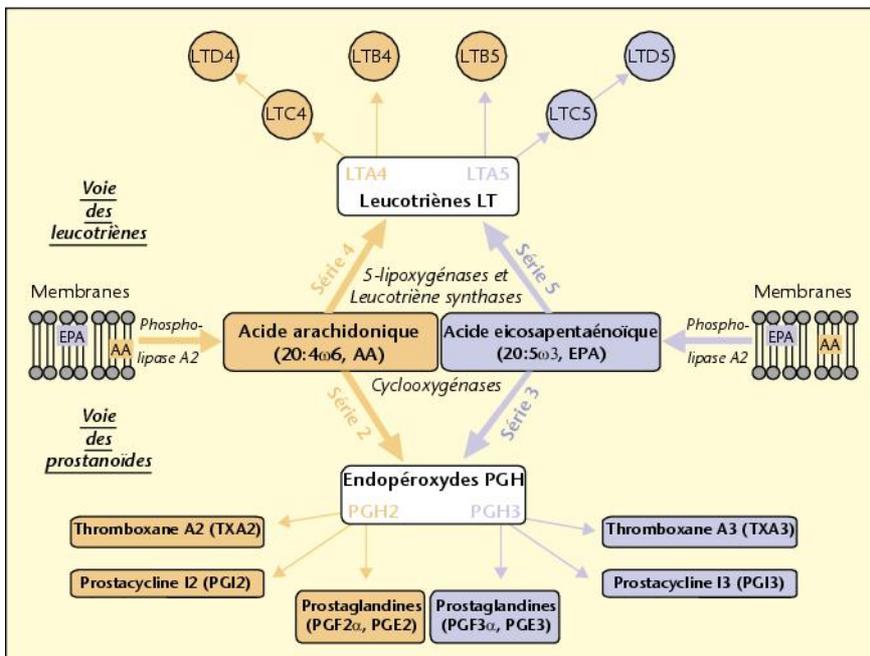


Figure 4. Schéma de la biosynthèse des eicosanoides à partir des acides arachidonique et eicosapentaénoïque conduisant à la synthèse des prostanoides (voie des cyclo-oxygénases) et des leucotriènes (voie de la lipo-oxygénase) (Guesnet et al, 2005).

Les phospholipides sont des lipides contenant un acide phosphorique et un mono- ou di-ester (IUPAC, 1978).

Un phospholipide est formé à partir d'une molécule de glycérol, dont deux groupements hydroxyles sont estérifiés avec deux chaînes d'acide gras. La chaîne d'acide gras en carbone 2 du glycérol, appelé également sn-2 (pour stereospecifically numbered-2) est fréquemment un acide gras insaturé, formant un coude, alors que celui en carbone 1 du glycérol (ou sn-1) est fréquemment saturé. Le groupement hydroxyle en sn-3 est, lui, estérifié par l'acide phosphorique, créant ainsi une tête polaire (figure 3).

1.1.1.3.Eicosanoïdes

Les eicosanoïdes sont des dérivés oxygénés des AG composés de 20 atomes de carbone (Simopoulos, 2002). Ce sont principalement l'acide arachidonique (C20:4 n-6 ; ARA) et l'acide eicosapentaénoïque (C20:5 n-3 ; EPA) mais aussi l'acide dihomog- γ -linoléinique (C20:3 n-6 ; DGLA). Le terme même « eicosanoïde » avec le préfixe grecque « eicosa- » signifie que ce sont les AG à 20 carbones dont sont issus ces dérivés oxygénés (Beare-Rogers et al., 2001). On distingue deux types d'eicosanoïdes : les leucotriènes (LT) et les prostanoïdes. Parmi ce dernier type, on trouve les prostaglandines (PG), les thromboxanes (TX) et les prostacyclines (PGI). Ils jouent un rôle important dans les phénomènes d'inflammation ou d'immunité et sont des messagers du système nerveux central (DeCaterina et Basta, 2001). Deux familles d'enzymes catalysent l'oxygénation des AG pour produire les eicosanoïdes : les cyclooxygénases (COX) qui génèrent les prostanoïdes et les lipoxygénases (LOX) qui génèrent les leucotriènes (LT). La synthèse des eicosanoïdes se fait *in situ* et sont rapidement métabolisés. On distingue 3 classes ou séries d'eicosanoïdes selon l'acide gras qui en est la source. Pour les prostaglandines, prostacyclines et thromboxanes, les séries 1, 2 et 3 dérivent respectivement du C20:3 n-6, du C20:4 n-6 et du C20:5 n-3. De même, les séries 3, 4 et 5 des leucotriènes dérivent respectivement de ces trois mêmes AGPI (Funk, 2001).

La biosynthèse des eicosanoïdes (figure 4) commence après l'action d'un stimulus externe (stimulation mécanique, cytokines, facteurs de croissance ou bien des eicosanoïdes provenant des cellules voisines). Une phospholipase est libérée et va catalyser la réaction d'hydrolyse d'un phospholipide (phospholipase A2 ; lorsqu'il s'agit d'une hydrolyse d'un di-acylglycérol on parlera d'une phospholipase C). De l'hydrolyse du phospholipide sera produit un acide gras qui sera libéré dans le cytoplasme entrant ainsi dans la voie des COX générant les PG, TX et PGI ou bien dans la voie des LOX générant les LT ou les AG hydroperoxydés (Gurr et Harwood, 1996). Ces réactions d'hydrolyse des phospholipides (ou des di-acylglycérols)

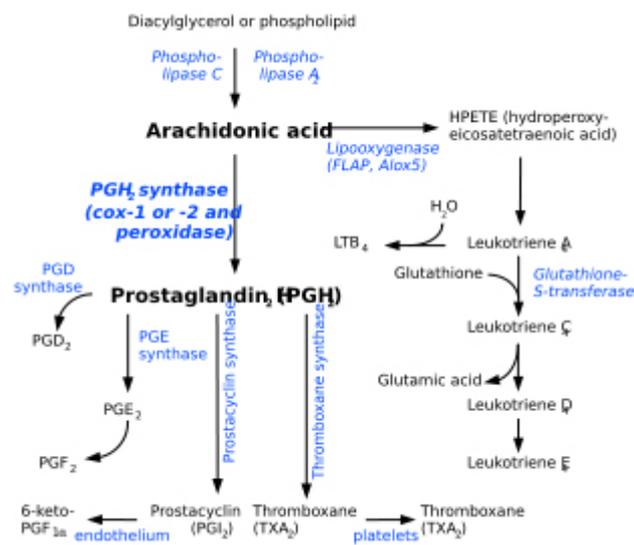


Figure 5. Synthèse des prostanoides et des leucotriènes à partir de l'acide arachidonique (Funk, 2001).

apparaissent comme étant les réactions limitantes dans la biosynthèse des eicosanoïdes (Guesnet et al., 2005)

1.1.1.3.1. Voie des cyclo-oxygénases : synthèse des prostanoides

La synthèse des prostanoides s'effectue en deux étapes. La première est catalysée par les enzymes de la famille des cyclooxygenase (COX-1 et COX-2). Elles catalysent la conversion d'un acide gras libre (ARA ou EPA) en un intermédiaire instable PGG (prostaglandine G). La deuxième étape consiste en la formation d'un composant stable PGH (prostaglandine H). Une fois synthétisé, PGH va être métabolisé par les différentes enzymes cellules-spécifiques. Chaque tissu possède l'équipement enzymatique conduisant à la synthèse spécifique de l'une ou de l'autre de ces molécules (Guesnet et al., 2005). La synthèse des thromboxanes est située au sein des plaquettes et des macrophages, la synthèse des prostacyclines se fait dans les cellules endothéliales et la synthèse des prostaglandines est située dans l'utérus, le cerveau et les mastocytes (Funk, 2001 ; Guesnet et al., 2005).

1.1.1.3.2. Voie des lipoxygénases : synthèse des leucotriènes

Au contraire de la synthèse des prostanoides, l'activité de synthèse des leucotriènes est essentiellement située dans les cellules de l'inflammation telles que les leucocytes polymorphonucléaires, les macrophages et les mastocytes. Dans le cas de l'acide arachidonique, l'enzyme 5-lipoxygénase (5-LOX), de concert avec la protéine d'activation 5-lipoxygénase (FLAP) va convertir l'ARA en un acide 5-hydroperoxyeicosatétraénoïque (5-HPETE) qui sera immédiatement réduit en un acide 5-hydroxyeicosatétraénoïque (5-HETE) (figure 5). A nouveau l'enzyme 5-LOX va métaboliser 5-HETE en un leucotriène A₄ (LTA₄). Ce dernier sera converti en ses différents dérivés LTB₄, LTC₄ ou LTD₄ par les actions respectives des enzymes leukotriene A₄ epoxide hydrolase, leukotriene C₄ synthase ou par l'enlèvement d'un acide glutamique pour faire LTD₄. La synthèse de LTE₄ vient du clivage par une dipeptidase de LTD₄ (Funk, 2001).

D'autres voies d'oxygénation enzymatique et d'oxydation non enzymatique des AGPI à 20 et 22 carbones ont été découvertes (Guesnet et al., 2005). C'est le cas de la synthèse :

- des résolvines, docosatriènes et des neuroprotectines :

Ces molécules jouent un rôle dans des processus anti-inflammatoires et immunoregulateur (Serhan et al., 2004). Les composés dérivés de l'EPA et du DHA sont désignés série E et D, respectivement. Ces séries sont suivies d'un chiffre (1-4) correspondant au composé bioactif

de cette famille. Elles ont une action dans la réduction du trafic des neutrophiles, dans la régulation des cytokines et des dérivés réactifs de l'oxygène, et dans la diminution de l'amplitude de la réponse inflammatoire (Ariel et Serhan, 2007). Les composés bioactifs issus du DHA et qui ont une structure triène conjuguée ou docosatriène, ont une action immunoregulatoire et neuroprotective et sont appelés neuroprotectines. Ces dernières ont des actions protectives dans le système neural, dans la maladie d'Alzheimer sur modèles animaux et sur les péritonites (Ariel et Serhan, 2007). Ces nouvelles familles possèdent la même structure que les eicosanoïdes.

- des hydroperoxydes d'AGPI n-6 et n-3 à partir de l'ARA et de l'EPA par action des 5-, 8-, 12- et 15-lipoxygénases (Yamamoto, 1992) ;
- des acides époxyeicotriénoïques (EET) ;
- des isoprostanés et neuroprostanés.

2. LES ACIDES GRAS

2.1.Historique

La chimie des lipides telle que nous la connaissons actuellement remonte aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles. C'est en 1665 que l'irlandais Boyle, remarqua qu'après alimentation, le sang des animaux prenait un aspect laiteux. Ce n'est que plus d'un siècle plus tard, en 1774, que ce liquide laiteux fut déterminé comme contenant de la matière grasse par Henson. Durant la même période, en France, Poulletier de la Salle puis de Fourcoy ont réussi à isoler la matière grasse des calculs biliaires. Mais c'est surtout Michel-Eugene Chevreul qui fit d'énormes découvertes dans ce domaine, notamment en identifiant la cholestérine (cholestérol) et quelques AG tels que l'acide stéarique et l'acide oléique. Au cours du 20^{ème} siècle, de nombreuses avancées ont été réalisées en terme de compréhension de la structure et de la fonction des lipides et notamment des liens entre lipides et pathologie. C'est à cette époque qu'a été mise en évidence l'existence des AG essentiels ceci par l'observation de pathologies induites par la mise en place de régimes carencés en AG chez l'animal.

Ainsi, on doit aux travaux de Burr et Burr (1929) la découverte de l'essentialité de l'acide linoléique (LA) chez le rat en leur fournissant un régime privé de lipides. Les nombreuses pathologies apparues (baisse de croissance, dermatite, fragilité des vaisseaux capillaires avec hémorragies, etc...) disparaissent par l'ajout du LA. Par la suite, les dérivés à longue chaîne du LA tels que l'acide arachidonique seront montrés aussi comme appartenant à cette famille

d'AG essentiels. Plus tard, dans les années 1950 à 1960, l'essentialité du LA et de l'ARA a été démontrée chez l'homme (Hansen et al., 1958).

L'acide α -linoléique (ALA) a été démontré comme essentiel plus tardivement, dans les années 1970. C'est chez le rat qu'il a été démontré qu'un régime carencé en ALA entraînait des troubles de la vision ainsi que de la fonction cérébrale. Un rétablissement du niveau en ALA corrige ou élimine ces troubles. Chez l'homme, c'est par les travaux d'Holman et al. (1982) qu'a été mise en évidence l'essentialité de l'ALA chez une fillette nourrie par voie parentérale avec un régime très pauvre en ALA.

2.2.Acides gras essentiels aux précurseurs indispensables

Les deux familles d'AG polyinsaturés essentiels, n-6 et n-3, sont sans transformation métabolique de l'une à l'autre, et sans substitution fonctionnelle possible de l'une à l'autre (figure 6).

Mais il convient de distinguer les précurseurs des familles des AG n-6 et n-3, LA et ALA, respectivement, de leurs dérivés à longues chaînes tels que l'ARA pour la série n-6 et les acide eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA) pour la série n-3. Les précurseurs ne sont pas synthétisables par l'animal, et par extension par l'homme. Seuls les organismes végétaux ont les enzymes appropriées pour synthétiser à partir du C18:1 n-9 les précurseurs des séries n-6 puis des séries n-3. Ce sont les enzymes désaturases qui ajoutent des doubles liaisons à la place introduite repérée à partir du groupe carboxyle COOH. Ce sont les enzymes $\Delta 12$ et $\Delta 15$ qui donnent respectivement le C18:2 n-6 et le C18:3 n-3 à partir du C18:1 n-9. Ce dernier doit donc être obligatoirement fourni par l'alimentation.

Il existe néanmoins une exception dans le domaine du règne animal. Un nématode *Caenorhabditis elegans* a la possibilité de synthétiser à partir d'un acide gras n-6, l'acide gras n-3 correspondant par une désaturase (Spsychalla et al., 1997). Le gène *fat-1* codant pour cette désaturase a par la suite été cloné chez divers animaux tels que la souris (Kang, 2004) et le porc (Lai et al., 2006).

De plus, les précurseurs des familles d'AG n-6 et n-3 jouent un rôle indispensable dans la croissance normale et les fonctions physiologiques de différents tissus.

De ce fait, il convient d'utiliser le terme acide gras indispensable pour les précurseurs LA et ALA pour les deux raisons citées précédemment : (i) l'obligation de les trouver dans l'alimentation et (ii) leur rôle indispensable dans la croissance normale aussi que dans un certain nombre de fonctions physiologiques. Les dérivés à longues chaînes, qui eux aussi

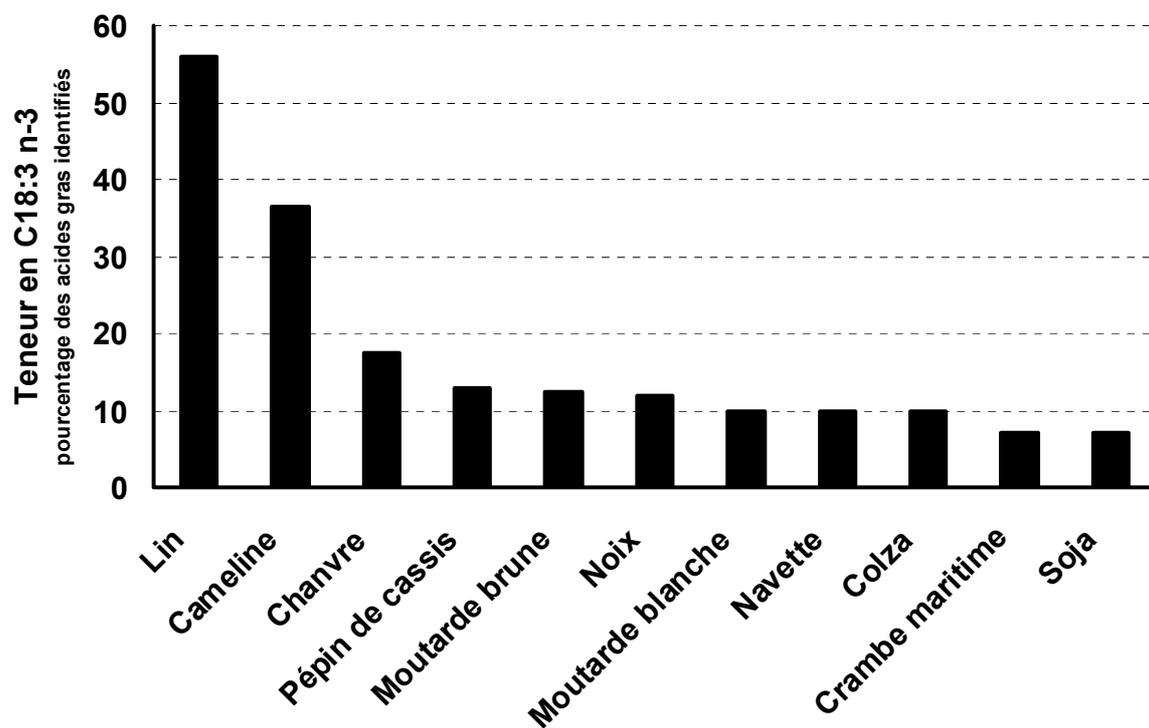


Figure 7. Teneur en C18:3 n-3 de différents végétaux exprimée en pourcentage d'acides gras identifiés (Karleskind, 1992).

jouent un rôle physiologique, mais qui ont la possibilité d'être synthétisés par l'homme à partir du précurseur, seront considérés comme essentiels.

2.3. Les sources

Les sources en AG n-3 sont abordées d'une manière plus exhaustive au cours de l'introduction de la deuxième étude expérimentale.

Du fait que nous devons trouver ces AG, et notamment les précurseurs, dans notre alimentation, il est apparu comme important de répertorier un certain nombre d'aliments qui en sont riches. D'une manière générale, le précurseur des AG n-3 est présent majoritairement dans les végétaux alors que les dérivés à longue chaîne sont eux présents majoritairement chez les animaux, et ceci du fait de la présence des désaturases $\Delta 12$ et $\Delta 15$.

Le précurseur ALA est présent en quantité plus ou moins importante selon les végétaux. Le lin est le végétal comportant le plus de précurseur. Selon les variétés, la teneur en ALA peut aller jusqu'à près de 60 % des AG totaux (figure 7). Mais l'ALA est aussi présent dans des proportions relativement importantes dans d'autres végétaux tels que la cameline, le chanvre, la noix et le colza à des teneurs respectives de 37 % ; 18 % ; 12 % et 10 % (Karleskind, 1992). Néanmoins, cette liste de quelques sources végétales, riches en ALA, ne se veut pas exhaustive.

Chez les animaux, les AG à longue chaînes tels que l'EPA et le DHA sont présents majoritairement chez les poissons gras sauvages.

Les dérivés à longue chaîne des AG n-3 sont présents en grande quantité dans les animaux marins tels que les poissons, et les coquillages mais aussi au sein de végétaux qui ont un équipement enzymatique adéquat comme les microalgues.

Chez les poissons, ce sont les poissons gras sauvages qui ont quantitativement un apport important en dérivés à longue chaîne. Il s'agit notamment du maquereau, de la sardine et du saumon qui ont des apports respectifs en DHA de 1,8 ; 1,3 et 1,0 g/100g de chair, et en EPA de 1,2 ; 1,1 et de 0,7 g/100g de chair (Bourre, 2005c ; Bourre, 2008).

Les coquillages tels que la coquille Saint-Jacques, l'huitre et la moule ont aussi un apport substantiel en dérivés de longue chaîne avec des teneurs respectives en DHA de 0,15 ; 0,11 et 0,09 g/100 g de chair et en EPA de 0,17 ; 0,13 et 0,09 g/100g de chair. (Bourre, 2005c ; Mourot, communication personnelle).

Enfin les micro-algues constituent une exception dans le domaine végétal du fait de la présence des enzymes désaturases nécessaires à la biosynthèse des AG à longue chaîne. *Nannochloropsis oculata*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Thalassiosira pseudonana* et *Pavlova*

lutheri présentent une forte proportion en AG n-3 à longue chaîne (Tonon et al., 2002). En guise d'exemple, *Nannochloropsis oculata* présente une valeur d'EPA de près de 28 % des AG totaux identifiés (Nitsan et al., 1999).

2.4.Fonctions biochimiques et rôles physiologiques

2.4.1. Rôle structural dans les membranes plasmiques

Les membranes plasmiques sont constituées par une bicouche phospholipidique. Sur le squelette acylglycérol, seules les positions sn-1 et sn-2 sont occupées par un acide gras alors que la position sn-3 est estérifiée par un acide phosphorique.

Alors que l'acide gras présent en position sn-1 est saturé, celui présent en position sn-2 est insaturé. L'acide arachidonique (ARA) est l'acide gras majeur des membranes phospholipidiques puisqu'il est présent à des taux élevés jusqu'à 24 %. L'acide eicosapentaénoïque (EPA) a la même structure que l'ARA à une double liaison près et peut se substituer à l'ARA au sein des membranes. Enfin, l'acide docosahéxaénoïque (DHA), AG terminal de la série n-3 est présent en des proportions moindres au sein des membranes. Ces données nous montrent que les AG essentiels, et particulièrement les AG polyinsaturés à longue chaîne jouent un rôle prédominant dans la structure même des membranes.

En effet, schématiquement, plus on augmente le nombre de carbones d'un acide gras ainsi que le nombre de doubles liaisons, plus le point de fusion est abaissé (IUPAC, 1978). De ce fait, l'enrichissement en AGPI-LC va augmenter la fluidité de la membrane et ainsi avoir un effet sur les activités des protéines que la membrane contient (enzyme, récepteur, transporteur, ...). Par exemple, la rétine, qui constitue une des membranes les plus spécialisées chez les animaux, selon sa richesse en DHA n'a pas la même conformation et ne permet pas le même passage du signal allant parfois jusqu'à la cécité de l'individu (Martinez, 1996 ; Niu et al., 2004). La proportion en DHA est essentielle quant à la transmission de l'information puisque l'augmentation de la proportion en DHA des membranes de phospholipides conduit aussi à la modification des rafts (Shaikh et al, 2004) ainsi que de la neurotransmission (Chalon et al., 2001).

2.4.2. Rôle de précurseurs aux médiateurs lipidiques oxygénés

Les AG essentiels sont connus pour leurs rôles bénéfiques sur la santé, mais c'est rarement par une intervention directe mais plus par une action indirecte via les médiateurs oxygénés. Ce sont les AG ARA et EPA qui, par l'intermédiaire des cyclooxygénases et des lipooxygénases, vont donner les précurseurs des médiateurs lipidiques oxygénés qui sont

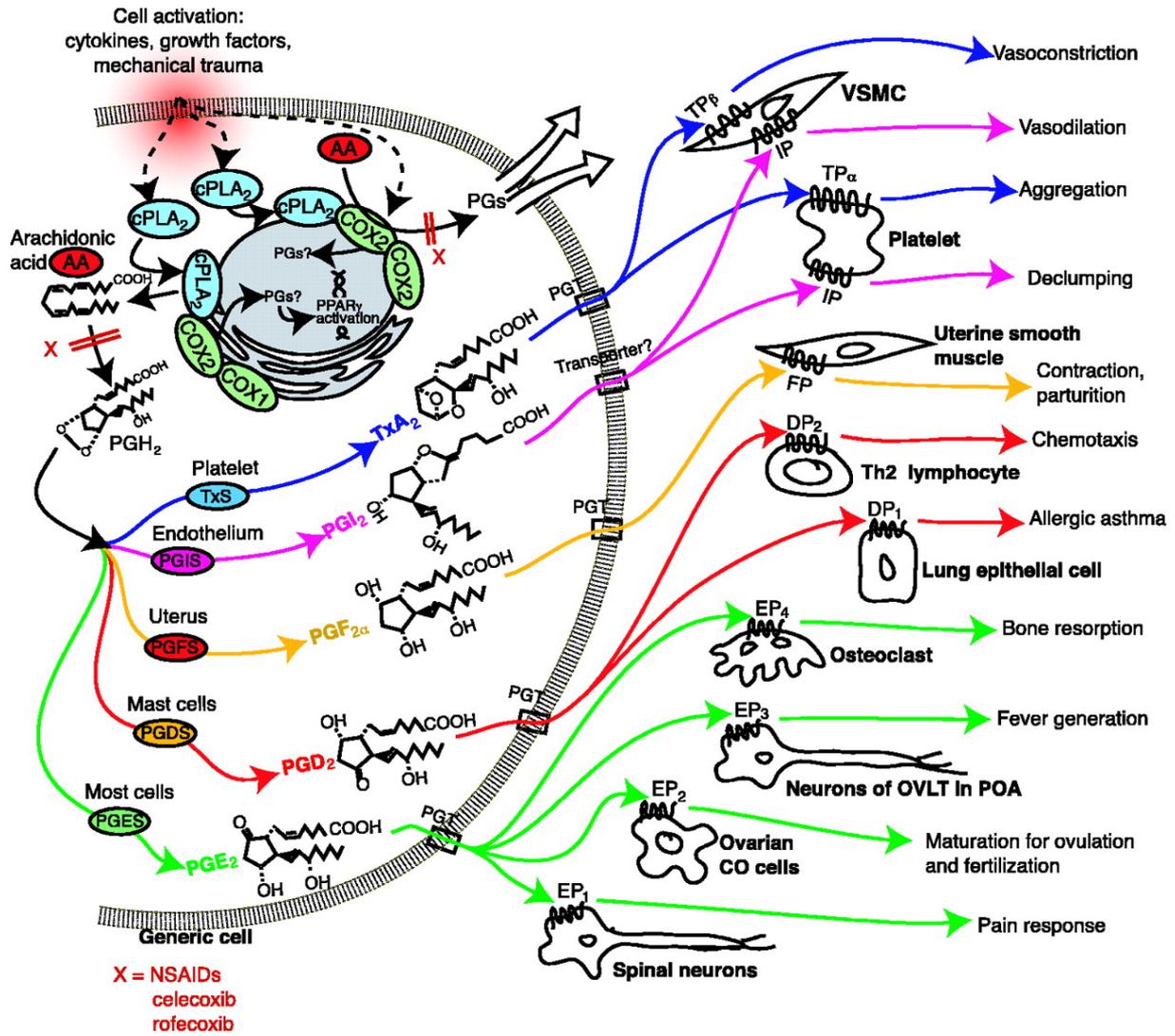


Figure 8. Synthèse des prostanoides (Funk, 2001).

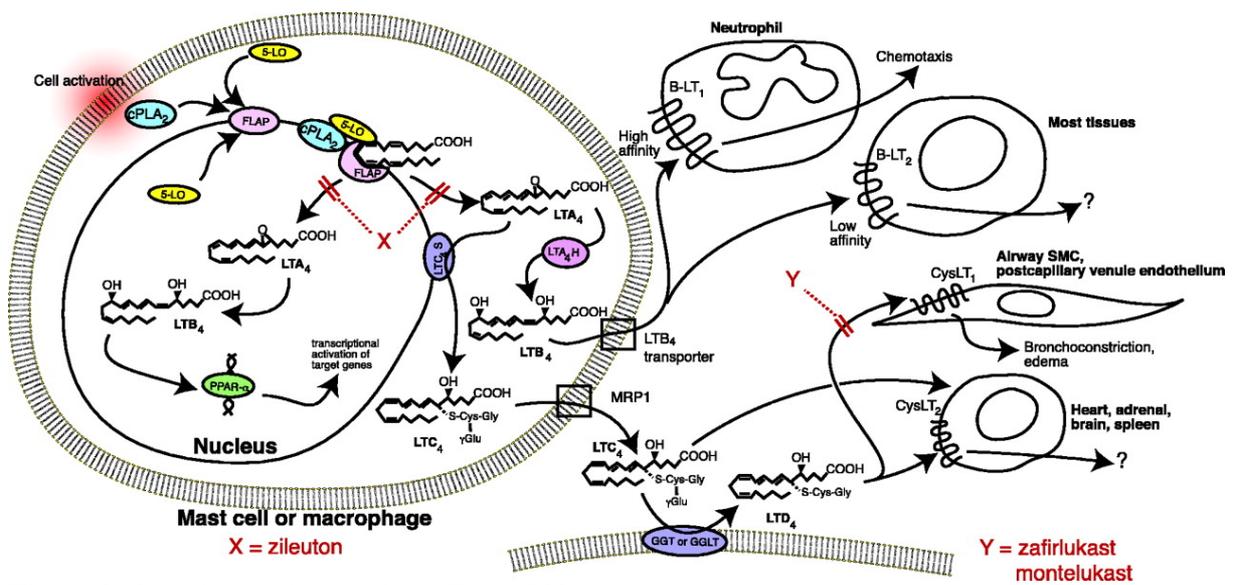


Figure 9. Synthèse des leucotriènes (Funk, 2001).

hautement spécifiques tels que les eicosanoïdes (prostaglandiques, thromboxanes, prostacyclines et leucotriènes). Ce sont ces derniers qui modulent un très grand nombre de fonctions cellulaires et qui ont un effet jugé comme bénéfique pour notre santé. Quelques fonctions sont à noter telles que l'homéostasie et l'agrégation plaquettaire, l'activation du système immunitaire, l'activité neuronale et l'inflammation au niveau du système nerveux central.

Les effets de ces médiateurs oxygénés sont listés dans la figure 8 dans le cas des prostanoides et dans la figure 9 pour les leucotriènes.

D'une manière générale, les AG n-3 ont souvent un rôle antagoniste vis-à-vis des AG n-6 quant aux effets des eicosanoïdes. Les AG n-6 sont plutôt pro-inflammatoires alors que les AG n-3 sont plutôt anti-inflammatoires.

2.4.3. Effets sur la santé humaine et le développement des tissus

2.4.3.1. Maladies cardiovasculaires

C'est par la somme des tous les effets générés par les eicosanoïdes que l'on va obtenir les effets bénéfiques des AG n-3 sur les grandes fonctions au sein de notre organisme, notamment sur la prévention des maladies cardiovasculaires. Les AG n-3 ont un rôle connu sur la réduction du risque de malaise cardiaque de type primaire ou bien secondaire (Burr et al., 1994 ; Stone, 1996 ; Bucher et al., 2002).

L'effet bénéfique sur ces pathologies est la résultante d'actions conjointes notamment d'une réduction de l'agrégation plaquettaire, de l'augmentation du temps de coagulation, d'une réduction de la pression sanguine (Mori et al., 1993 ; Morris et al., 1993), d'une baisse du taux de triglycérides plasmatiques (Jacotot, 1988), d'une réduction de la réponse aux agents vasoconstricteurs, d'une réduction de la viscosité sanguine, ainsi que d'une réduction de d'arythmie cardiaque (Burr et al., 1994 ; Stone, 1996 ; Bucher et al., 2002 ; Breslow, 2006)

Cependant, il convient de distinguer les AG n-3 entre eux. La quasi totalité des études d'observation (écologiques, cas-témoins, prospectives) relatives à la consommation de poisson et d'AG polyinsaturés n-3 à longue chaîne montrent une réduction des événements cardiovasculaires, coronariens, de la mortalité par cardiopathie ischémique de 30 % à 40 % lorsque l'apport est élevé (Lecerf, 2004). En ce qui concerne le précurseur ALA, les études d'observations mettent également en évidence un effet cardioprotecteur, d'autant plus que l'apport en AG polyinsaturés n-3 à longue chaîne est faible (Mozaffarian et al., 2005). L'explication viendrait de la biosynthèse de l'EPA à partir de l'ALA. Citons quelques effets

connus des AG n-3 sur la prévention des maladies cardiovasculaires. Le précurseur ALA a un rôle anti-athérogène connu. Le dérivé à longue chaîne EPA, en plus du rôle anti-athérogène, a notamment un rôle hypotriglycéridémiant et anti-inflammatoire. L'acide gras terminal, DHA, joue un rôle plus structurel (Guesnet et al., 2005).

2.4.3.1.1. Effet anti-athérogène

Des études menées chez les animaux ont montré un effet antiathérogène des AG n-3 chez le chien, la truie, les primates sur la réduction du développement de plaque d'athérosclérose au sein des artères et du cœur (pour revue : Simopoulos, 1991). Néanmoins, il n'y a pas pour l'heure de preuves évidentes chez l'homme.

2.4.3.1.2. Effet vasculaire

L'apport d'AG n-3 augmente le temps de coagulation du sang (Simopoulos, 1991). Cet effet sur le temps de coagulation s'explique par la concomitance de différents paramètres. Tout d'abord par l'action des AG n-3 sur les dérivés oxygénés, qui diminuent l'agrégation plaquettaire. En effet, les AG n-3 diminuent l'agrégation plaquettaire, diminuent la production de thromboxane A₂, réduisent la viscosité du sang et augmentent la fluidité membranaire des hématies (pour revue : Simopoulos, 1991).

2.4.3.1.3. Effet anti-arythmique

Des travaux mettent en évidence l'effet anti-arythmique des AG n-3 sur des patients par un apport en AG n-3 à longue chaîne (Christensen et al., 1995 ; Christensen et al., 1996) ou bien sur des cultures in vitro de canaux sodiques (Pignier et al., 2007). Burr et al. (1989). Il a été mis en évidence, par une intervention nutritionnelle sur la prévention secondaire de l'infarctus du myocarde qu'une ingestion quotidienne de 3 g d'huile de poisson réduisait la mortalité pour cause d'arythmie de 29 % sur une période de 2 ans

2.4.3.2. Cancers

Diverses études ont montré un effet bénéfique des AG n-3 sur la prévention de cancer (Berquin et al., 2008 ; Simopoulos, 2008). Une baisse du risque a été observé dans le cas des cancers du sein sur le modèle souris (Caygill et al., 1995 ; Chen et al., 2007) par l'administration de régimes riches en AG n-3 (Thiébaud et al., 2009), dans le cas du cancer du colon (Caygill et al., 1995 ; De Deckere, 1999 ; Kimura et al., 2007) et de la prostate

(Augustsson et al., 2003). Des méta-analyses ont été menées et nuancent les effets observés par certains auteurs mettant en évidence le peu de travaux sur ces sujets actuellement (Geelen et al., 2007 ; Brouwer et al., 2008). D'autres, menées sur des cohortes de patients dans de nombreux pays, montrent que les AG n-3 n'ont pas d'effets sur la prévention de développement de cancer (Hooper et al., 2006 ; MacLean et al., 2006)

2.4.3.3.Maladies inflammatoires

De nombreuses pathologies sont causées par des processus d'inflammation comme l'arthrose et l'asthme (Kremer, 1985 ; Fortin, 1995 ; Harbige, 2003). Ces pathologies sont causées entre autres par la production de cytokines, de dérivés oxygénés de l'acide arachidonique. Les AG n-3 permettent la diminution de ces médiateurs inflammatoires. Ceci s'effectue soit de manière directe, c'est-à-dire par l'inhibition du métabolisme de l'acide arachidonique, ou bien de manière indirecte par l'action des facteurs de transcription sur l'expression des gènes de l'inflammation. De plus, les AG n-3 permettent la synthèse d'un médiateur anti-inflammatoire, la *resolvin* (Calder, 2006). Ce sont les dérivés à longue chaînes qui assurent ce rôle anti-inflammatoire contrairement au précurseur ALA qui ne semble pas l'exercer, du moins directement.

2.4.3.4.Organogénèse

Le DHA est un constituant majeur du cerveau et de la rétine et joue un rôle essentiel au cours de la vie embryonnaire du fœtus humain lors de leurs mises en place. Sa proportion au sein du cerveau et de la rétine est respectivement d'environ 25 % et de 32 % (Guesnet et al., 2005). Pour la bonne mise en place du système nerveux central, les besoins du fœtus sont importants en DHA. Chez l'humain, le cerveau est en plein développement dès le 1^{er} mois de vie fœtale et ceci jusqu'à l'âge de 2 ans (Innis, 1991). Les besoins sont estimés, au cours du dernier trimestre de grossesse, à 60 – 70 mg quotidiennement (Clandinin et al., 1980 ; Purvis et al., 1983). A la naissance et pendant les six premiers mois de vie, les besoins en DHA, apporté par le lait, sont estimés à 70 – 80 mg par jour (Jensen et al., 2000).

La privation du DHA peut conduire à une baisse de l'acuité visuelle et cognitive (Birch et al., 1992). Sa supplémentation dans le lait infantile corrige ces effets de la carence (Cheatham et al., 2006).

Chez l'adulte, l'apport en DHA doit rester constant pour le bon maintien des fonctions visuelles ainsi que des facultés cognitives. L'impact du DHA, et plus généralement des AG à longue chaîne jouent un rôle dans la prévention de la dépression, de la démence et

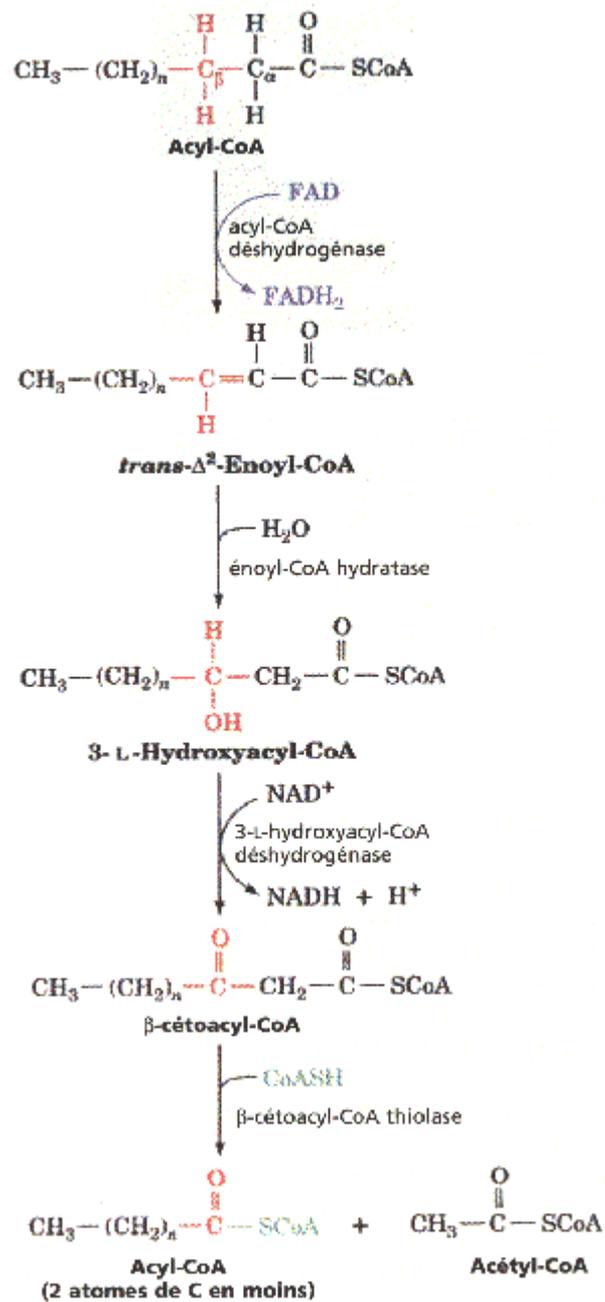


Figure 10. Schéma de la β -oxydation ou hélice de Lynen.

particulièrement dans la maladie d'Alzheimer. L'action des AG n-3 à longue chaîne sur les désordres maniaquodépressifs et la schizophrénie n'est pas encore établie (pour revue : Bourre, 2005b).

2.4.4. Régulateurs des facteurs de transcription

Les AG n-3 ont la possibilité d'agir tels des pseudo-hormones (Grimaldi et al., 1999) directement sur les gènes de facteurs de transcription tels que les PPARs et SREBPs (Ailhaud et al., 1996 ; Price et al., 2000 ; Sampath et Ntambi, 2004 ; Deckelbaum et al., 2006). Ils augmentent le nombre de transcripts des gènes PPARs et de ses isoformes γ α et δ qui interviennent dans les processus de l'adipogenèse, de la β -oxydation et de la différenciation des cellules adipocytaires. Les AG n-3 diminuent le nombre de transcripts de gènes codant pour SREBP et notamment l'isoforme 1c qui participe à la synthèse des AG (Field et al., 2002 ; Deng et al., 2002). Cependant, du fait de la difficulté à déterminer l'affinité entre les AG et les PPARs ou SREBPs (faible solubilité des AG, manque de ligands radiomarqués, contaminations par des protéines), certains auteurs pensent plutôt à un effet indirect des AG sur les facteurs de transcription, avec une action sur les protéines.

D'autres effets des AG n-3 ont été observés sur le récepteur aux rétinoïdes RXR (Zapata-Gonzalez et al., 2008) et le récepteurs hépatique LXR (Pawar et al., 2003).

2.4.5. Fournisseur d'énergie

Comme tous les AG, les AG polyinsaturés sont fournisseurs d'énergie pour l'organisme. Mais étant donné le nombre d'atomes de carbones et de doubles liaisons (Beare-Rogers, 2001), les AGPI sont particulièrement de bons substrats pour la β -oxydation. Cela entre d'ailleurs en compétition avec leurs activités spécifiques précisées précédemment.

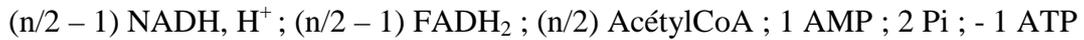
Il existe deux sites pour les processus de β -oxydation, la voie mitochondriale et la voie péroxisomale.

2.4.5.1. *Oxydation mitochondriale*

La β -oxydation mitochondriale se déroule au sein des mitochondries et va provoquer le clivage total de l'acide gras étape par étape, en ôtant de 2 carbones par cycle ou tour de spire de l'hélice de Lyden donnant ainsi des Acétyl-CoA qui rejoindront le cycle de Krebs pour une oxydation totale (figure 10).

Le processus de la β -oxydation se déroule en 4 étapes : (i) déshydrogénation ; (ii) hydratation; (iii) déshydrogénation ; et enfin, (iv) la coupure de la chaîne carbonée. La dégradation complète de l'acide gras se produit jusqu'à ce que la chaîne carbonée soit complètement découpée en molécules d'Acétyl-Coenzymes A

En final, pour un acide gras en C_n, il y a :



A nombre égal de carbone, un acide gras est plus énergétique qu'un ose (acide hexanoïque 45 ATP contre un glucose 38 ATP).

Les AG, entre eux, ne sont pas non plus oxydés à une vitesse équivalente. Emken et al. (1990) montrent, entre autres, que le C18:3 n-3 est oxydé plus rapidement que le C18:2 n-6 au sein des triglycérides.

2.4.5.2. Oxydation péroxysomale

L'oxydation péroxysomale se déroule au niveau des peroxysomes qui se trouvent dans le cytoplasme des cellules qui sont particulièrement en grand nombre dans les cellules hépatiques et rénales. Le substrat privilégié de cette voie de peroxydation sont les AG polyinsaturés mais qui contrairement à la voie mitochondriale de la peroxydation ne seront pas clivés entièrement mais juste partiellement de un ou de deux tours d'hélice. C'est ce que l'on appelle la rétroconversion des AG observable pour la synthèse du DHA (C24:6 n-3 en C22:6 n-3) mais aussi lors de sa disparition pour donner de l'EPA participant ainsi à la régulation des AGPI au sein des tissus (Sprecher, 1983).

3. LA VIANDE PORCINE

3.1. La production porcine

De nos jours, la production mondiale de porcs avec 115,4 millions de tonnes équivalent carcasse (tec) produites représente environ 62 % de la production mondiale de viande avec 285,7 millions tec (FAOSTAT, 2009). La Chine est le premier producteur mondial (45 % du total), l'Union Européenne produit quant à elle 19 % du volume total (Ofival 2004) pour une production de 22,6 millions de tec. La France est le troisième producteur de l'Union Européenne avec 2,3 millions de tec produites après l'Allemagne et l'Espagne. La production porcine en France est localisée pour 75 % dans le Grand-Ouest avec les régions Bretagne,

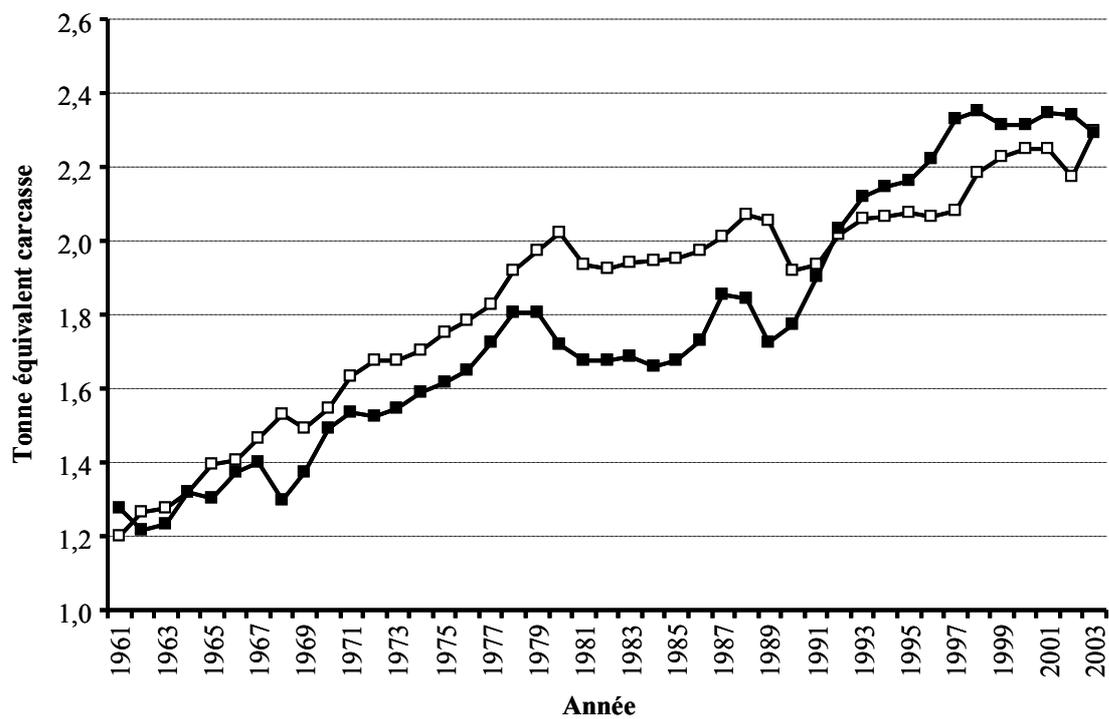


Figure 11. Evolution de la production (■) et de la consommation (□) de viande de porc en France (FAOSTAT, 2009).

Pays-de-la-Loire, Basse-Normandie, et Poitou-Charente qui représentent respectivement 56,0 %, 11,5 %, 3,9 % et 2,6 % de la production porcine française (Ofival, 2007).

La production française de porc a fortement évolué depuis les années 1960 jusqu'aux années 2000 pour passer d'une production d'environ 1,2 à 2,3 millions de tonnes (figure 11).

Cette production qui a presque doublé en une quarantaine d'années tend à répondre aux besoins en porcs des consommateurs français. Dans les années 60 jusqu'aux années 90, la demande était plus forte que l'offre. C'est par la modernisation de l'agriculture française, avec la mise en place au plan national de la Loi d'Orientation Agricole en 1960, complétée en 1966 par la Loi sur l'Elevage et 1970 par le Plan de Rationalisation de la production porcine, que l'appareil de production va évoluer considérablement (Lebret, 2004). L'action des pouvoirs publics va ainsi permettre d'inverser les tendances et de pouvoir répondre à la demande des consommateurs français.

La production porcine est basée sur une génétique somme toute assez restreinte. Sur environ près de 300 races de porc au travers le monde, seulement 3 races dominent très largement le marché en France. Ce sont le Large White d'origine anglaise, le Landrace d'origine française et le Piétrain d'origine belge et/ou du nord de la France. Il existe très peu de production en race pure. Ce sont bien souvent des croisements qui sont mis en place pour hériter des avantages héréditaires en terme de production. Le porc Large White a pour avantages sa faculté d'adaptation, ses bonnes performances de croissance ainsi que la qualité de sa viande. Le porc Landrace est réputé pour ses qualités maternelles alors que le Piétrain apporte sa forte musculature.

3.2.La consommation de viande de porc

La consommation totale de toutes les viandes au travers le monde est égale à 272,5 millions de tec, l'Union des 27 à 42,6 millions de tec et la France à 5,7 millions de tec (FAOSTAT, 2009 ; Ofival, 2007). La consommation de viande de porc mondiale est égale à 105,8 millions de tec. L'Union des 27 a une consommation égale à 10,7 millions de tec avec la France qui est le troisième consommateur européen avec 2,3 millions de tec derrière l'Allemagne et l'Espagne.

La viande de porc est la plus consommée en France, dans l'Union des 27 et dans le monde avec respectivement 34,8 kg ec/hab./an ; 42,9 kg ec/hab./an et 15 kg ec/hab./an, pour une consommation totale de viande respectivement égale à 89,6 kg ec/hab./an ; 85,8 kg ec/hab./an et de 39 kg ec/hab./an (FAOSTAT, 2009 ; Ofival, 2007). En France, la consommation de

Tableau 1. Teneur en lipides de quelques muscles de porc charcutier. Les résultats sont exprimés en pourcentage de tissus frais.

Muscles	Teneur en lipide
<i>Adductor femoris</i> ¹	2,0
<i>Biceps femoris</i> ¹	1,4
<i>Masseter</i> ¹	1,8
<i>Psoas major</i> ^{1,2}	1,3
<i>Quadriceps femoris</i> ³	2,7
<i>Rectus femoris</i> ⁴	1,5
<i>Semimembranosus</i> ¹	1,7
<i>Semitendinosus</i> ^{1,4}	4,0
<i>Trapezius</i> ¹	2,0
<i>Triceps femoris</i> ⁵	2,2

¹ Mourot et Hermier, 2001

² Lauridsen et al., 1999

³ Estevez et al., 2003

⁴ Bee et al., 2004

⁵ Lebret et al., 2002

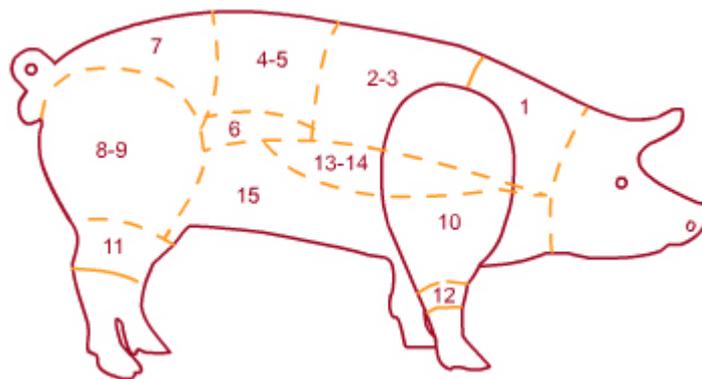


Figure 12. Les morceaux de découpe du porc. 1 : Echine ; 2-3 : côtes premières, côtes secondes ; 4-5 : filet, côtes filets ; 6 : filet mignon ; 7 : pointe de filet ; 8-9 : jambon, grillade ; 10 : palette (épaule) ; 11 : jarret arrière ; 12 : jarret avant ; 13-14 : plat de côte, travers. (CIV, 2008).

viande de porc se fait essentiellement sous forme de produits de charcuterie puisque près de 70 % des apports totaux en viande porcine sont consommés sous cette forme (Mourot, 2009).

3.3. Une mauvaise image de la viande

La consommation de la viande, et notamment de porc, est un terrain sur lequel les idées reçues dominant souvent la réalité scientifique (Vautier, 2005). En effet, la viande de porc à la fin de la deuxième guerre mondiale ne ressemblait en rien à celle que l'on peut rencontrer de nos jours dans nos linéaires de nos grandes et moyennes surfaces. En une cinquantaine d'années avec la mise en place des programmes de sélection de l'INRA basés sur une baisse du gras de couverture ainsi que sur la vitesse de croissance des animaux, les animaux sont abattus plus jeunes au même poids avec une baisse de la période d'élevage de près de 6 semaines. La teneur globale en lipides de la carcasse de porc a baissé de près de moitié passant de 40 % à 20 % (Mourot et Lebret, 2009). Au final, les animaux sont plus jeunes et plus maigres et l'image où le porc était perçu comme un producteur de corps gras plus que de viande ne se justifie plus. Malgré cela, l'image d'une viande grasse reste tenace dans l'esprit des consommateurs. La confusion est souvent faite entre l'adiposité totale de la carcasse et la teneur réelle en lipides intramusculaires. De plus, les tables de composition des différents produits carnés issus du porc sont souvent peu mises à jour et participent à la diffusion de fausses informations (Mourot et al., 2007) contribuant à cette mauvaise image.

La viande de porc est d'un point de vue nutritionnel intéressante et nous allons le détailler dans la partie suivante.

3.4. Apports nutritionnels de la viande

3.4.1. Lipides

3.4.1.1. Teneur en lipides

La viande de porc, si on élimine le gras de couverture, est une viande peu grasse. La longe, ou *longissimus dorsi* a une teneur en lipides totaux qui est comprise entre 1,5 et 2,0 %. A muscle équivalent, la viande porcine est moins grasse que la viande bovine ou ovine qui ont des teneurs en lipides comprises entre 5 et 6 % (Mourot et Hermier, 2001). De plus, contrairement aux bœufs, les lipides intramusculaires de la viande de porc ne sont pas visibles à l'œil nu et la viande ne présente pas un aspect marbré (sauf chez certains porcs de race Duroc). La teneur en lipides est très variable d'un muscle à l'autre selon sa localisation anatomique (tableau 1) mais reste néanmoins bien inférieure à celle des tissus adipeux qui varie entre 60 et 80 % au

Tableau 2. Composition en acides gras de différents tissus du porc charcutier. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'acides gras identifiés.

	Muscle <i>longissimus</i> <i>dorsi</i>	Muscle <i>semimembranosus</i>	Tissu adipeux sous cutané dorsal	Panne	Tissu adipeux intermusculaire du jambon	Foie
C14:0	1,17	1,08	1,16	1,33	1,40	0,40
C14:1	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
C16:0	24,13	22,91	24,67	27,80	25,09	15,95
C16:1	3,29	3,39	2,10	1,80	2,60	1,11
C18:0	11,46	10,17	14,27	18,73	12,19	25,26
C18:1	40,11	41,23	41,15	36,22	36,57	16,96
C18:2	13,56	14,74	13,21	11,38	18,29	15,66
C20:0	0,26	0,23	0,31	0,29	0,20	0,41
C18:3	0,42	0,49	0,81	0,72	1,15	0,45
C20:1	0,65	0,63	1,05	0,72	0,72	0,28
C20:2	0,37	0,40	0,67	0,44	0,65	0,41
C20:3	0,33	0,32	0,08	0,06	0,12	0,51
C20:4	2,90	3,06	0,18	0,16	0,46	17,53
C22:1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
C20:5	0,17	0,23	0,01	0,02	0,03	0,54
C24:0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
C24:1	0,48	0,47	0,09	0,08	0,19	1,01
C22:5	0,42	0,43	0,08	0,08	0,17	2,06
C22:6	0,21	0,20	0,03	0,04	0,15	1,42
Σ AGS	37,05	34,39	40,41	48,14	38,88	42,05
Σ AGM	44,55	45,75	44,40	38,84	40,09	19,38
Σ AGPI	18,39	19,86	15,19	13,02	21,03	38,57
Σ AG n-3	1,56	1,66	1,01	0,93	1,62	4,98
Σ AG n-6	16,46	17,80	13,52	11,65	18,75	33,19
AG n-6/n-3	10,66	10,71	13,48	12,51	11,89	6,70
C18:2 / C18:3	32,07	30,63	16,42	15,76	15,88	37,28

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé

stade commercial d'abattage. Les teneurs en lipides sont différentes selon la localisation du muscle (figure 12)

La proportion en cholestérol de la viande fraîche est approximativement la même que pour les autres espèces animales, c'est-à-dire comprise entre 50 et 80 mg pour 100 g selon la pièce de découpe considérée (Culioli et al., 2003).

3.4.1.2. Composition en acides gras

La viande de porc présente un profil en AG intéressant nutritionnellement parlant. La part des AG saturés est moins importante dans la viande de porc que dans la viande bovine. En effet, chez les bovins, comme tous les ruminants, par l'action des bactéries présentes dans le rumen, les AG insaturés présents dans l'alimentation sont hydrogénés. Chez les monogastriques tels que le porc, il n'existe pas de flore gastrique permettant ces phénomènes de biohydrogénation. Ainsi, la viande bovine comporte près de deux fois moins d'AG polyinsaturés que la viande de monogastriques (Bourre, 2005c). Les AG présents dans l'alimentation des monogastriques, tels que le porc, sont assimilés tels quels par l'animal et déposés au sein des tissus (Mourot et Hermier, 2001). Cette propriété est particulièrement utilisée chez le porc pour réaliser des interventions de type nutritionnel.

De la même manière que pour les teneurs en lipides des tissus, la composition en AG est variable d'un tissu à l'autre. Dans le tableau 2 figurent les tissus musculaires (*longissimus dorsi*, *semimembranosus*) et adipeux (tissu adipeux sous cutané dorsal, panne, tissu adipeux intermusculaire du jambon) les plus communément étudiés ainsi que le foie de porc charcutier nourri avec un régime standard.

La proportion des AG monoinsaturés est importante au sein des tissus (muscle et tissu adipeux) des porcs charcutiers et constitue la principale famille d'AG. C'est la grande proportion en acide oléique (C18:1 n-9) (en moyenne 40 %) qui explique cette forte teneur en AGM. Pour mémoire, celui-ci est présent à hauteur de 70 % au sein de l'huile d'olive, à laquelle on prête tant de vertus pour l'homme. Les AG polyinsaturés sont fortement représentés par la série des AG n-6 notamment l'acide linoléique (C18:2 n-6 ; LA) et son dérivé l'acide arachidonique (C20:4 n-6 ; ARA) qui est lui fortement représenté dans le foie. L'importance de la proportion en AG n-6 au sein de la viande de porc s'explique par une forte présence de ces derniers dans leur alimentation mais aussi par le rôle de l'ARA comme

Tableau 3. Composition en acides aminés de la viande de porc exprimé en mg/100 g (Tomé, 2008).

Protéine* , g/100g	17,28
Acides aminés	
Tryptophane	227
Thréonine	885
Isoleucine	861
Leucine	1 602
Lysine	1 728
Méthionine	516
Cystéine	294
Phénylalanine	871
Tyrosine	637
Valine	894
Arginine	1 403
Histidine	683
Alanine	1 088
Acide aspartique	1 746
Acide glutamique	3 005
Glycine	958
Proline	787
Sérine	755

* (n x 6,25)

Tableau 4. Besoin nutritionnel en acides aminés indispensables de l'adulte et profils de référence en acides aminés indispensables (Tomé, 2008).

	FAO/WHO/UNU 2007		AFSSA 2007	
	mg / kg / j	mg / g protéine *	mg / kg / j	mg / g protéine *
Histidine	10	15	11	17
Isoleucine	20	30	18	27
Leucine	39	59	39	59
Lysine	30	45	30	45
Méthionine + cystéine	15	22	15	23
Méthionine	10	16	-	
Cystéine	4	6	-	
Phénylalanine + tyrosine	25	38	27	41
Thréonine	15	23	16	25
Tryptophane	4	6	4	6
Valine	26	39	18	27
Total	184	277	178	270

* Besoins en acides aminés de l'adulte/0,66 g/kg/j de protéines

constituant majeur des membranes phospholipides et comme précurseur des eicosanoïdes. Les AG n-3 sont quant à eux représentés par le précurseur de la série, l'acide linoléique (C18:3 n-3 ; ALA) et ses dérivés, les acides eicosapentaénoïque (C20:5 n-3 ; EPA), docosapentaénoïque (C22:5 n-3 ; DPA) et docosahexaénoïque (C22:6 n-3 ; DHA). La part des AG n-3 est plus faible au sein des tissus, ils sont moins présents dans les régimes distribués aux animaux. L'EPA, de la même manière que l'ARA, est le précurseur des eicosanoïdes et peut aussi assurer un rôle structurel au sein des membranes des cellules.

3.4.2. Protéines

La viande de porc, comme toute viande, constitue une source de protéines hautement digestibles. Leur consommation ne provoque pas de carence en acides aminés indispensables. Dans le tableau 3 figure un exemple de composition en acides aminés de viande de porc, face aux recommandations en terme d'acides aminés indispensables (tableau 4).

Le taux moyen de protéines au sein de la viande de porc est compris entre 17 et 20 % selon leur localisation. La teneur en protéines musculaires varie selon la localisation anatomique du muscle. Cette influence correspond à la variabilité histologique (types de fibres) et fonctionnelle des muscles de la carcasse. Rinaldo et Mourot (2002) mettent en évidence une teneur en protéines du *longissimus dorsi* égale à 22,4 % contre celle du *semi-spinalis* à 18,2 %. L'effet de la localisation du muscle sur le taux protéique est confirmé par de nombreux auteurs (Minivielle et al., 2002 ; Boutten et al., 2004).

La race des porcs a un effet sur la teneur en protéines des muscles. Zullo et al. (2003) ont mis en évidence que les croisements entre les races avaient un effet positif sur la teneur en protéines des tissus face aux races pures. De la même manière que pour les races, le type génétique influence la teneur en protéines. Lebret et al. (1999a) ont mis en évidence que le gène de résistance à l'halothane (RN) était un facteur de variation de la teneur en protéines. Les porcs RN -/- avaient une teneur en protéines inférieure aux porcs rn +/-.

Les facteurs d'élevage ne semblent pas influencer la teneur en protéines musculaires (Mourot et Lebret, 2009). De nombreuses études paraissent soit contradictoires, soit ne présentent pas d'effets significatifs.

3.4.3. Minéraux

La viande de porc présente un profil en minéraux assez complet et comparable aux autres espèces animales, à l'exception du fer. Celui-ci est présent dans les muscles sous deux formes.

La forme héminique et la forme non héminique. Au sein de la viande, le fer total est essentiellement sous forme de fer héminique, forme dont l'assimilation est très supérieure à celle du fer apporté par les végétaux. Selon Hansen et al. (2004) et Estevez et al. (2003), le fer au sein du muscle *longissimus dorsi* est trouvé à hauteur de 3,6 à 6,1 mg / 100 g de muscle frais. Cependant, la quantité de fer apportée est moindre que pour les ruminants (Culioli et al., 2003)

D'autres minéraux sont bien représentés dans la viande de porc comme le potassium et le phosphore. D'autres oligoéléments sont présents mais en moindre quantité comme le zinc (croissance et défenses immunitaires), le cuivre, le manganèse (fonctionnement de nombreuses enzymes), le magnésium (bon état neuromusculaire), le sélénium (propriétés antioxydantes).

3.4.4. Vitamines

La composition en vitamines est comparable aux autres espèces. Cependant, en tant que matière carnée, la viande de porc est riche en vitamines du groupe B, notamment la vitamine B1 avec une teneur supérieure à 0,8 mg / 100 g de viande cuite. La viande porcine comporte aussi d'autres vitamines du groupe B telles que la vitamine B3, B6 et B12.

4. QUALITE DU PORC CHARCUTIER

Pendant longtemps, la qualité du porc charcutier a été estimée par la seule composition de la carcasse par l'estimation de la proportion en tissus maigres et gras via, entre autres, la teneur en viande maigre (TVM) ou bien aujourd'hui la teneur en muscle des pièces (TMP). C'est ce qui a justifié les schémas de sélection depuis les années 60 pour obtenir une carcasse qui a diminué de moitié son adiposité générale. Dorénavant, on distingue la qualité de la carcasse et celle des viandes comprenant chacune plusieurs composantes (Lebret, 2004).

4.1. Qualité de la carcasse

La qualité de la carcasse est estimée selon les aspects sanitaires et selon sa composition en ses différents tissus. La qualité sanitaire correspond essentiellement à la qualité microbiologique et notamment à l'absence de contamination en microorganismes pathogènes pour l'homme parfois présents dès l'élevage. Les processus d'abattage réduisent ces éventuelles contaminations qui restent cependant relativement élevées dans cette espèce en raison du mode de préparation des carcasses qui conserve la peau de l'animal.

La proportion relative des différents tissus constituant le porc est la principale composante de la qualité des carcasses. Il s'agit du poids, du rendement de la carcasse, de sa conformation prenant en compte la proportion des différentes pièces de découpe les plus nobles (jambon, longe, épaule, poitrine).

4.2. Qualité de la viande

La qualité de la viande répond à différentes attentes, aussi bien celles du consommateur que celle des producteurs. Son évaluation est plus complexe. On parle souvent d'ailleurs non pas de la qualité de la viande mais des qualités. Elle comprend la qualité sanitaire, la qualité nutritionnelle, la qualité sensorielle et la qualité technologique.

4.2.1. Qualité sanitaire

La qualité sanitaire de la viande correspond à l'absence de microorganismes pathogènes ou des toxines qu'ils peuvent produire mais aussi de résidus alimentaires ou médicamenteux dans les viandes.

4.2.2. Qualité nutritionnelle

La qualité nutritionnelle de la viande correspond à sa capacité à apporter des nutriments aux consommateurs tels que les protéines avec les acides aminés, dont les acides aminés essentiels, les lipides, dont les AG essentiels et notamment les AG n-3, les vitamines et enfin les minéraux.

4.2.3. Qualité sensorielle

La qualité sensorielle est séparée selon 3 composantes principales : (i) l'aspect, (ii) la texture et (iii) la flaveur.

L'aspect de la viande de porc comprend à la fois la couleur (intensité et homogénéité), le marbré et le persillé correspondant à la répartition du gras inter- et intra-musculaire, respectivement. Cependant, la viande de porc ne présente pas à l'œil nu un marbré et un persillé tel qu'il peut être présent dans la viande bovine. La couleur de la viande de porc est elle aussi liée en partie à la répartition des lipides intramusculaires.

La texture de la viande de porc correspond à la tendreté et à la jutosité appréciées lors de leur consommation. La tendreté de la viande correspond à la facilité avec laquelle celle-ci se laisse trancher ou mastiquer. La jutosité, ou impression de libération de jus au cours de la

mastication, est liée à la quantité d'eau libre subsistant dans la viande et à la sécrétion de salive stimulée essentiellement par les lipides (Girard et al., 1988)

4.2.4. Qualité technologique

La qualité technologique de la viande correspond à son aptitude à subir une transformation. Pour les tissus maigres, cette qualité est liée au pouvoir de rétention en eau ; pour les tissus gras, il s'agit de leur fermeté et de la susceptibilité ou non à l'oxydation, toutes deux liées à la teneur en lipides mais aussi à la composition en AG.

5. FACTEURS DE VARIATION DES COMPOSANTES DE LA QUALITE DE LA VIANDE

Les différentes composantes de la qualité de la viande de porc peuvent être influencées selon des facteurs génétiques ou bien des facteurs liés à la conduite d'élevage.

5.1. Qualité sanitaire

La qualité sanitaire de la viande de porc ne sera pas développée. Celle-ci est relativement bien maîtrisée, sauf en des cas isolés de contaminations ponctuelles. Deux points majeurs peuvent affecter cette qualité : l'élevage et l'abattage des animaux. Sa maîtrise passe par de bonnes pratiques d'élevage ainsi que par la maîtrise des points critiques à l'abattoir. Cette dernière s'est mise en place par un arrêté national émis en 1996, suite à une décision de l'Union Européenne datée de 1993, imposant ainsi la mise en place de démarches HACCP dans les abattoirs de grande capacité (Lebret, 2004). Cela n'est qu'à partir de 2003 que la mise en place des démarches HACCP a été généralisée dans l'ensemble des abattoirs. En plus de ces démarches, des autocontrôles sont réalisés dans les abattoirs afin d'évaluer la qualité microbiologique des produits.

Les qualités nutritionnelle, sensorielle et technologique de la viande de porc vont être essentiellement envisagées du point de vue de la nature des lipides constitutifs.

5.2. Qualité nutritionnelle

En matière de santé publique, les nutritionnistes recommandent une diminution de la part des lipides dans l'alimentation et une réduction des apports en AG saturés au profit des AG mono et polyinsaturés, en particulier les AG polyinsaturés n-3 (comme l'acide linoléique C18:3), en raison de leur effet protecteur vis-à-vis de nombreuses pathologies.

Différents facteurs d'ordre génétique ou bien liés aux pratiques d'élevage peuvent influencer la qualité nutritionnelle de la viande de porc (Van Oeckel et Boucque, 1996).

5.2.1. Facteurs génétiques

5.2.1.1. *Sexe*

La différence dans la composition en AG liée au sexe est liée à l'adiposité totale de la carcasse. Ainsi, à poids vif égal, les mâles entiers ont un engraissement inférieur aux femelles, lui-même supérieur à celui des mâles castrés. Le degré d'insaturation des lipides est plus élevé chez le mâle entier que chez la femelle et le mâle castré (Lebret et Mourot, 1998). L'animal le plus gras (typiquement le mâle castré) a une proportion plus importante en AG saturés et monoinsaturés, et plus faible en AG polyinsaturés que les animaux les plus maigres (typiquement les verrats), alors que les truies présentent des proportions intermédiaires (Allen et al., 1967 ; Malmfors et al., 1978a et b). Il existe, indépendamment de la teneur en lipides totaux de l'animal un effet du sexe (Wood et Enser, 1982 ; De Smet et al., 2004). La même observation est faite chez les porcs des races non sélectionnées tels que le porc Créole (Renaudeau et Mourot, 2004).

5.2.1.2. *Race*

Il existe un grand nombre de variétés de races de porcs allant des races maigres à fort potentiel de croissance (Large White, Piétrain) à des races plus d'intérêt patrimonial (porc Créole, porc Basque, porc Blanc de l'Ouest). Ainsi, les porcs de race Duroc ont une proportion en AG saturés et en AG monoinsaturés plus importante avec une proportion en AG polyinsaturés plus faible que les porcs de race Landrace. Les porcs des races Large White ont une proportion en AG polyinsaturés plus élevée que les porcs des races locales comme le porc Basque (Labroue et al., 2000 ; Alflonso et al., 2004), le porc Créole (Labroue et al., 2000) et que le porc Blanc de l'Ouest (Labroue et al., 2000).

5.2.1.3. *Sélection des souches*

La sélection porcine a conduit depuis la fin des années 1970 à une réduction significative de l'adiposité générale de l'animal. Ainsi, entre 1977 et 2000, Bazin et al. (2000) rapportent une baisse significative du taux de gras intramusculaire liée aux progrès de la génétique. Cette réduction s'est accompagnée d'une augmentation de la proportion en acide linoléique au sein des tissus (Labroue et al., 2000). Cette augmentation de la proportion de l'acide linoléique au sein des souches maigres s'explique par une diminution du potentiel de synthèse *de novo* des

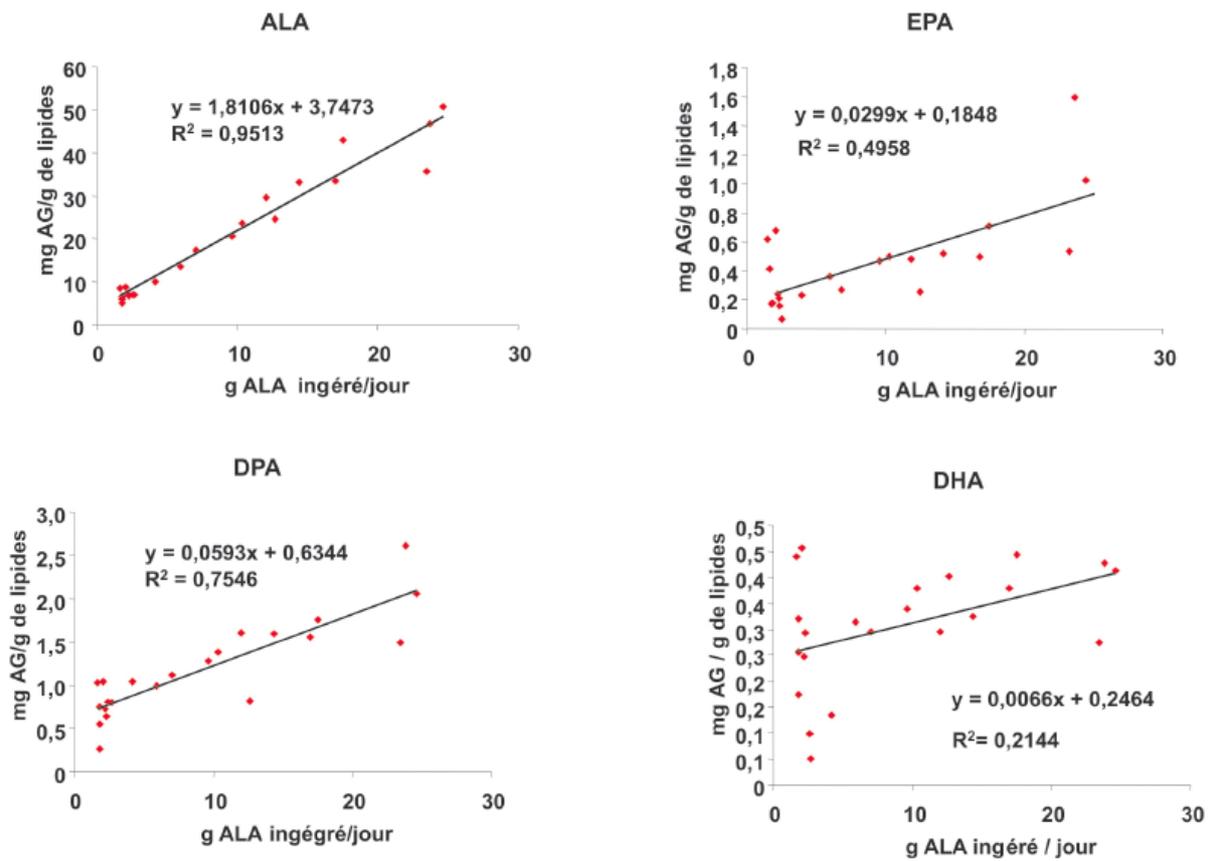


Figure 13. Relation entre la quantité d'ALA ingéré (g/j) et les teneurs de la viande de porc en AG n-3 (Chilliard et al., 2008).

Chaque point représente la moyenne d'un lot de 10 à 16 porcs élevés dans des conditions identiques

ALA : acide alpha linoléinique, EPA : acide eicosapentaénoïque, DPA : acide docosapentaénoïque, DHA : acide docosahexaénoïque

lipides (Labroue et al., 2000). Ainsi, les souches maigres présentent un rapport AG polyinsaturés / AG saturés plus important que les souches locales.

5.2.2. Facteurs environnementaux

Parmi les facteurs environnementaux, c'est sans conteste l'alimentation qui est le facteur principal de variation de la composition en AG chez le porc. Néanmoins, d'autres aspects seront aussi évoqués comme l'état d'engraissement de l'animal ou bien la température de l'environnement.

5.2.2.1. *Régimes alimentaires*

Les AG présents chez l'animal sont la combinaison des AG qui sont le résultat d'une synthèse *de novo* et de ceux provenant de l'alimentation captés soit dans l'estomac pour les AG à chaînes courtes (Hyun et al., 1967 ; Vallot et al., 1985 ; Jackson, 1974) ou bien dans l'intestin pour les AG à chaînes plus longues. Dans le cas des AG n-3, la majorité passe dans l'intestin grêle, depuis l'estomac, où l'absorption a lieu (Chen et al., 1987). Chez le porc, comme chez tous les animaux monogastriques, il y a une très bonne relation entre les AG présents dans l'alimentation et les AG qui seront incorporés au sein des tissus sans grande modification (Mourot et Hermier, 2001), ceci en contraste avec les espèces animales polygastriques, ou ruminants, qui ont tendance à être plus riches en AG saturés du fait des phénomènes d'hydrogénation par les micro-organismes du rumen des AG polyinsaturés. Près de 80 % des AGPI ingérés sont transformés en AGS par la flore gastrique (Rhee, 1992 ; Chilliard et al., 2008).

Ainsi, partant de cette propriété, la composition en AG des tissus du porc peut être relativement facilement modifiée (Brooks, 1971). Ceci est particulièrement valable pour les AG polyinsaturés (Mourot et al., 1992) puisque ces derniers ne peuvent être trouvés que dans l'alimentation.

Il existe des relations très fortes ou assez fortes entre la teneur en ALA de l'aliment et les dépôts de ALA, EPA, DPA par gramme de lipides de la viande (figure 13). En revanche, il existe peu d'effets pour le DHA ce qui montre la faible capacité tissulaire de conversion du DPA en DHA, comme chez la plupart des animaux, y compris le poisson (Chilliard et al., 2008).

Cette relation entre AG alimentaires et AG déposés semble moins évidente pour les AG saturés et monoinsaturés, ce qui du fait de leur synthèse endogène, rend les interventions

nutritionnelles plus difficiles à réaliser, bien que faisables lors d'ajout de fortes concentrations (Thies et al., 1999).

La corrélation entre les AG présents dans l'alimentation et les AG incorporés dans les tissus, pour un même régime, n'est pas non plus semblable d'un tissu à un autre. En effet, Hertzman et al. (1988) ont montré que le tissu adipeux avait une corrélation supérieure à celle des tissus musculaires. Les auteurs suggèrent que le tissu musculaire contient une proportion supérieure en membranes phospholipidiques, ces dernières incorporant de manière sélective les AG, au contraire des tissus adipeux qui comportent des vacuoles de lipides, beaucoup moins sélectives quant à l'incorporation des AG.

5.2.2.2. Etat d'engraissement de l'animal

Bien que l'impact de l'état d'engraissement du porc sur la composition en AG soit bien moins important que la nature de son alimentation, l'adiposité globale de la carcasse a néanmoins une conséquence non négligeable sur la composition en AG. Les auteurs s'accordent à dire que plus l'adiposité est importante, plus le degré d'insaturation baisse. Schématiquement, les lipides peuvent être séparés en deux parties : les phospholipides et les triglycérides. Les premiers sont relativement riches en AG polyinsaturés (de 35 à 50 %) contre les seconds qui le sont relativement peu (de 5 à 15 %). Les triglycérides, structure de stockage des lipides ont la capacité d'avoir une très forte expansion, alors que la concentration de la fraction des lipides polaires n'a pas cette capacité à varier autant. Ainsi lorsque l'état d'engraissement de l'animal augmente, la proportion des triglycérides augmente aussi, faisant ainsi diminuer d'autant plus la proportion des phospholipides (Wood et al., 1989).

L'acide linoléique est préférentiellement incorporé au sein des phospholipides alors que l'acide linoléique est incorporé à la fois dans les triglycérides et dans les phospholipides. Ainsi l'acide linoléique est négativement corrélé avec l'état d'engraissement, ce qui n'est pas le cas de l'acide linoléique (Wood et al., 1996).

5.2.2.3. Température

L'augmentation de la température extérieure influence la composition en AG chez le porc. La proportion en AG monoinsaturés est diminuée avec l'augmentation de la température, ceci par la baisse de l'activité de l'enzyme delta-9 désaturase dans les tissus adipeux et musculaires (Kouba et al., 1999). Kloareg et al. (2005) ont estimé qu'un passage de la température de 23°C à 30°C réduisait de 3,5 % l'activité de désaturation de la delta-9 désaturase. Ainsi, par

une augmentation de température, la viande sera plus riche en AG saturés (précurseurs des AG insaturés).

5.3. Qualité sensorielle

5.3.1. Aspect

Le consommateur recherche en général une viande ni trop pâle, ni trop foncée, et de couleur homogène. La couleur dépend de la quantité de myoglobine, liée au pourcentage de fibres rouges, de l'état chimique de ce pigment, ainsi que de la structure du muscle réfléchissant la lumière. L'abaissement du pH augmente la quantité d'eau extracellulaire et, en conséquence, la réflexion de la lumière incidente (Offer et al., 1989), ce qui confère un aspect clair aux viandes à bas pH. La couleur de la viande dépend aussi de la teneur en lipides ainsi que de la composition en AG. Une viande plus riche en matière grasse augmente la réflexion de la lumière et donc apparaît plus claire. L'augmentation de la proportion en AG polyinsaturés pourrait selon certains auteurs, faire que la viande serait plus sombre (Jensen et al., 1997). L'augmentation du degré d'insaturation de la viande (à moins d'une protection des lipides par des antioxydants), favorise la conversion du pigment rouge de myoglobine en metmyoglobine de couleur brune. Van Oekel et al. (1996) ainsi que Warnants et al. (1996) confirment cela en mettant en relation la teneur en C18:3 n-3 de la viande et la luminosité de la viande qui diminue. Cependant, de nombreuses études ne mettent pas en relation la teneur en AG polyinsaturés et la couleur de la viande de porc (Romans et al., 1995a et b ; Lebret et al., 1999b ; Warnants et al., 1999 ; Riley et al., 2000 ; Corino et al., 2002 ; Kouba et al., 2003 ; Corino et al., 2008).

5.3.2. Texture

5.3.2.1. *Jutosité*

La jutosité varie avec le pouvoir de rétention d'eau (PRE) de la viande, les pertes à la cuisson et la présence de lipides intra-musculaires. L'évolution post mortem du pH, qui influence fortement le PRE et les pertes à la cuisson (Monin 1983 et 1988) joue un rôle important dans la détermination de la jutosité de la viande. Eikelenboom et al (1996) évaluent à 0,68 le coefficient de corrélation entre le pHu et la jutosité de la viande. De nombreux travaux montrent que les lipides intramusculaires influencent favorablement la jutosité de la viande (Lebret et al., 1999b). Le coefficient de corrélation entre le taux de lipides intramusculaires et la jutosité varie selon les études et est compris entre 0,21 et 0,65.

5.3.2.2. *Tendreté*

La tendreté de la viande dépend de la quantité, de la répartition et du degré de polymérisation du collagène musculaire, ainsi que de la structure myofibrillaire (Monin 1983), et de la teneur en lipides intramusculaires.

Chez le porc, du fait d'un abattage à un âge relativement jeune (environ 6 mois), la composante collagénique est peu impliquée dans la détermination de la tendreté de la viande fraîche. Ceci au contraire des produits de transformation (Lebret et al., 1999b).

La composante myofibrillaire joue un rôle prépondérant dans la détermination de la tendreté de la viande fraîche chez le porc. Les propriétés des myofibrilles dépendent essentiellement de l'évolution post mortem du pH et des réactions protéolytiques intervenant pendant la maturation (Monin 1983, Valin 1988). Les travaux de Monin et al. (1999) montrent que la vitesse de chute du pH constitue le principal déterminant de la résistance myofibrillaire et de la dureté de la viande de porc, le pH ultime ayant un effet moins important. La tendreté augmenterait avec la durée de conditionnement de la viande (Wood et al., 1996).

5.3.2.3.Flaveur

Il est admis que les lipides intra-musculaires constituent le vecteur du goût, ceci au travers de la flaveur et des arômes volatils (Ngapo et Gariépy, 2008). Vis-à-vis de ce critère, l'industrie porcine se retrouve face à un dilemme. Les consommateurs réclament à la fois une viande avec une quantité de lipides visibles la plus minimale possible, et dans un même temps, une teneur suffisante en lipides intra-musculaires pour satisfaire le souhait d'un point de vue gustatif (Fortin et al, 2005).

De nombreuses études ont fait un lien entre la perception sensorielle de la viande de porc et la teneur en lipides intramusculaires (pour revue : Ngapo et Gariépy, 2008) pendant que d'autres ne montraient aucune influence, voire même des effets négatifs sur la flaveur. Cette forte disparité dans les résultats peut s'expliquer par de nombreux paramètres allant des conditions de stockage de la viande, des méthodes de cuisson à l'appréciation des produits, ceci dû à des différences culturelles. Citons notamment les études menées par Fernandez et al. (1999a b) où les auteurs ont montré que l'impression défavorable des consommateurs envers la viande s'accroît avec la teneur en lipides intramusculaires, alors qu'après consommation, les notes de goût et d'appréciation globale sont plus élevées pour les viandes contenant plus de lipides, un taux de 3 % apparaissant comme optimal.

Parmi la composante lipidique, un rôle important est attribué aux phospholipides dans le développement de la flaveur caractéristique de la viande cuite (Mottram et Edwards, 1983). D'autre part, la nature des lipides intramusculaires agit sur l'aptitude à la conservation de la

Tableau 5. Point de fusion des acides gras (IUPAC, 1978)

Formule	Point de fusion
C12:0	44,2°C
C14:0	53,9°C
C16:0	63,1°C
C18:0	69,6°C
C20:0	76,7°C
C22:0	81,5°C
C24:0	87,7°C
C14:1 n-7	-4°C
C16:1 n-7	0°C
C18:1 n-9	14°C
C20:1 n-9	23,2°C
C22:1 n-9	33,3°C
C24:1 n-9	42,7°C
C18:2 n-6	-5°C
C18:3 n-3	-11,2°C
C20:4 n-6	-49,5°C
C20:5 n-3	-54,1°C
C22:5 n-3	-78,0°C
C22:6 n-3	-44,1°C

viande (Monahan et al., 1992, Mourot et al., 1992), en raison de la sensibilité des AG polyinsaturés au phénomène de peroxydation. Les produits de la filière porcine sont particulièrement sensibles à la peroxydation en raison de leurs teneurs relativement élevées en AGPI et des faibles teneurs des viandes en agents antioxydants (Mourot et al 1992, Dirinck et De Winne 1995). Wood et al. (2003) ont mis en évidence qu'une teneur de 3 % en C18:3 n-3 dans la viande conduisait à des composés produits à la cuisson à partir des lipides peroxydés qui avaient un effet négatif sur la qualité sensorielle. Cameron et Enser (1991) ont reporté une corrélation négative entre les saveurs de la viande de porc et la proportion de la plupart des AG polyinsaturés, à l'exception toutefois du 18:3 n-3. Dans une autre étude, Cameron et al. (2000) ont reporté à nouveau une corrélation négative entre les AG polyinsaturés et la saveur de la viande de porc, alors qu'ils ont montré une corrélation positive entre la proportion en AG monoinsaturés et la saveur.

5.4. Qualité technologique

La qualité technologique de la viande de porc est son aptitude à la transformation. Dans le cas des tissus adipeux, ou tissus gras, il s'agit essentiellement de sa fermeté. Un gras mou posera des problèmes aux industriels de la salaisonnerie lors des différents processus de transformation tels que des saucis de tranchage ou bien par l'obturation des grilles des différents robots. Les tissus adipeux sont un bon reflet de l'alimentation de l'animal (Mourot et Hermier, 2001). Or, les AG, du fait du nombre de carbones et surtout du nombre de doubles liaisons, n'ont pas des points de fusion équivalents (IUPIAC, 1978). Les AG polyinsaturés, et à fortiori les AG n-3, ont un point de fusion inférieur aux AG monoinsaturés, ainsi qu'aux AG saturés (tableau 5.)

L'introduction d'AG polyinsaturés dans la ration des animaux doit être de ce fait considérée. Si la valeur seuil de 15 % est dépassée, la qualité technologique des produits pourraient être diminuée par la possible oxydation des AG (Wood et al., 2008).

6. CONSTRUCTION DE LA QUALITE NUTRITIONNELLE

La qualité nutritionnelle de la viande de porc étant dans le cadre de ce travail basée sur l'aspect lipidique, il s'agira dans un premier temps de traiter de la mise en place du tissu adipeux chez le porc, puis de traiter les voies métaboliques de la lipogenèse et de la biosynthèse des AG polyinsaturés à longue chaîne.

6.1. Mise en place du tissu adipeux

Chez le fœtus de porc, les premiers éléments du tissu adipeux apparaissent aux environs du 70^{ème} jour de gestation dans les dépôts épидидymaires et péricardiques et vers le 106^{ème} jour dans le gras méésentérique (Vodovar et al., 1971 ; Desnoyer et Vodovar, 1974).

A la naissance, le porcelet comporte très peu de tissus adipeux puisque sa proportion n'est que de 1 à 2 % du poids vif (Henry, 1977 ; Le Didividich et al., 1991) ce qui entraîne des problèmes de thermorégulation et de survie de l'animal. En effet, sous l'appellation « tissu adipeux », l'on distingue le tissu adipeux blanc du tissu adipeux brun. Ce dernier, spécialisé dans la production de chaleur chez les jeunes mammifères, est quasi-absent chez le porcelet (Herpin, 1989). Le tissu adipeux blanc (que nous appellerons dorénavant tissu adipeux) joue un rôle essentiel dans la régulation de la balance énergétique chez les vertébrés.

La masse du tissu adipeux se développe considérablement et très rapidement puisqu'elle est multipliée par dix après douze jours d'âge alors que le poids n'est lui multiplié que par trois. Au stade commercial d'abattage, le porc aura une masse de tissu adipeux qui représentera 20 % du poids vif.

Le tissu adipeux est constitué d'un type cellulaire prédominant que sont les cellules adipeuses ou adipocytes. La fonction primaire des adipocytes est de stocker l'énergie par l'accumulation de triglycérides lors des apports excessifs en énergie et de la libérer durant les périodes de jeûne (Boone et al., 2000). Les adipocytes sont répartis au sein d'une trame de tissu conjonctif. Ils présentent de petites vacuoles lipidiques lorsqu'ils commencent à stocker les lipides. Dans les adipocytes matures, une vacuole lipidique unique repousse le noyau à la périphérie de la cellule (Robelin et Casteilla, 1990) dont le diamètre varie alors de 25 à 150 µm selon la localisation anatomique.

Le tissu adipeux est composé d'une grande proportion de lipides (75-85 %), d'eau (5-15 %) et d'une faible quantité de protéines (Lebret et Mourot, 1998). Les triglycérides représentent plus de 95 % de la fraction lipidique (Girard et al., 1988).

Le développement du tissu adipeux se caractérise par trois phases successives (Anderson et Kauffman, 1973). Une hyperplasie (augmentation du nombre de cellules) dominante des cellules adipeuses entre 7 et 20 kg, une hyperplasie et une hypertrophie (augmentation de la taille des cellules) entre 20 et 50 kg, puis une hypertrophie quasi exclusive au-delà de 70 kg. D'après Lee et al (1973), le nombre total d'adipocytes dans le tissu adipeux sous cutané dorsal serait fixé très tôt dans la vie de l'animal, bien que certains auteurs aient observé la création de nouvelles cellules adipeuses jusqu'à un stade avancé de la croissance (220 jours d'âge, d'après Henry 1977). La distribution bimodale de la taille des adipocytes à la naissance (Mersmann et al., 1975), comme en fin d'engraissement (Henry 1977), suggère l'existence de

deux populations adipocytaires dans le tissu adipeux sous cutané dorsal (Mersmann et al., 1976). A côté des adipocytes pleinement développés, la population de cellules de très petite taille pourrait correspondre soit à des adipocytes matures ayant perdu leurs lipides, soit à des précurseurs adipocytaires ayant stocké une quantité limitée de triglycérides et se trouvant dans l'incapacité de poursuivre cette accumulation, soit à une population de préadipocytes de réserve.

6.2.Mécanismes biochimiques modifiant la composition en lipides et en acides gras des tissus

6.2.1. Enzymes de la lipogenèse

6.2.1.1.Généralités

Le tissu adipeux constitue chez le porc sevré le site majeur de la lipogenèse *de novo* puisque près de 80 % des lipides y sont synthétisés à partir du glucose dérivé de l'amidon alimentaire (O'Hea et Leveille, 1969a). Le porc se distingue ainsi des autres espèces, en particulier des oiseaux dont le foie participe pour plus de 90 % à la synthèse lipidique (O'Hea et Leveille, 1969b). Toutefois, avant le sevrage, la lipogenèse peut être localisée dans le foie du porcelet (Fenton et al., 1985), mais elle reste relativement peu importante (Gerfault et al. 2000). Le tissu adipeux devient plus actif que le foie après le sevrage (Fenton et al., 1985) : le remplacement du lait maternel, riche en lipides, par un régime glucidique stimule la synthèse lipidique dans le tissu adipeux.

Le potentiel d'activité des enzymes lipogéniques dans le tissu adipeux augmente après le sevrage jusqu'à un maximum qui se situe entre 40 et 70 kg de poids vif pour des porcs de type génétique maigre (Anderson et Kauffman 1973, Scott et al., 1981). Les activités sont supérieures dans les tissus adipeux internes et de couverture. Chez les porcs gras, le maximum apparaît très tôt dans la vie de l'animal (Mourot et al., 1996).

Comparativement aux tissus adipeux, la synthèse des lipides au sein des muscles est très faible et varie peu avec le poids de l'animal. Cependant, lorsque les adipocytes sont isolés, la capacité d'incorporation du glucose est supérieure au sein des adipocytes isolés du muscle que dans ceux des tissus adipeux. La faible synthèse des lipides dans le muscle est donc une conséquence du nombre peu élevé d'adipocytes dans ce tissu et non pas d'un manque de fonctionnalité de ceux-ci.

Chez le porc, comme chez l'Homme, le précurseur de la synthèse des AG provient surtout du catabolisme du glucose qui est dégradé en pyruvate par la voie de la glycolyse dans le

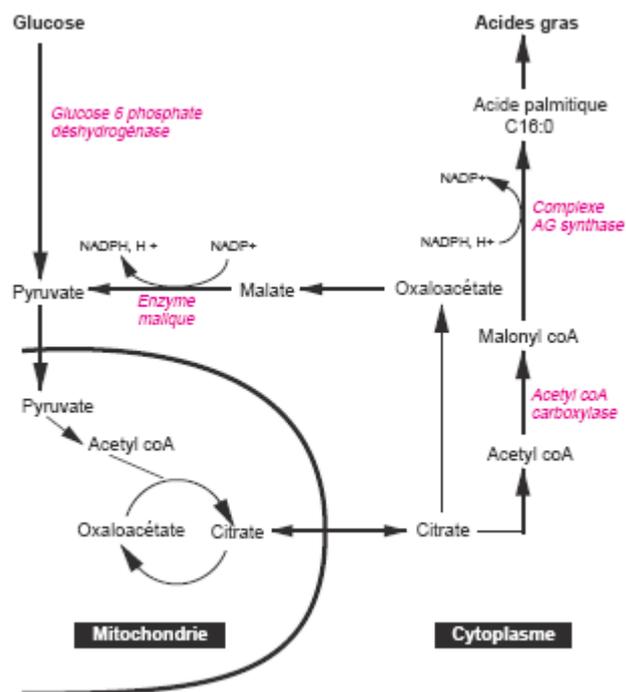


Figure 14. Schéma de la lipogénèse chez les mammifères (Lebret et Mourot, 1998)

cytoplasme. Dans la mitochondrie, le pyruvate est transformé en acétyl-CoA mitochondrial par le complexe pyruvate déshydrogénase. Pour traverser la membrane mitochondriale, l'acétyl-CoA se combine à l'oxaloacétate pour former du citrate capable de passer cette membrane. A partir de l'acétyl-CoA, régénéré par l'action de l'ATP citratelase, la biosynthèse de novo des AG est effectuée en présence de deux systèmes enzymatiques séquentiels du cytosol : l'acétyl-CoA carboxylase et le complexe enzymatique synthétase des AG (figure 14).

6.2.1.2. Effets des matières grasses

L'introduction de matières grasses à taux croissants dans des régimes isoénergétiques n'a pas d'effet sur le potentiel d'activité lipogénique du tissu adipeux chez le jeune entre 4 et 8 semaines d'âge (Mersmann et al., 1976).

Chez le porc en croissance-finition, l'augmentation de la teneur en lipides de la ration entraîne une augmentation de l'épaisseur de la bardière et une diminution du potentiel d'activité lipogénique de ce tissu, proportionnelle à la teneur en lipides de la ration (Allee et al., 1971). Cette baisse des activités peut être due à un effet direct des AG alimentaires, mais aussi à une diminution de l'apport glucidique alimentaire, qui entraînerait un manque de substrat pour la synthèse des AG. La comparaison de l'utilisation d'une huile saturée (cophrah) et d'une huile insaturée (maïs) a mis en évidence un état d'engraissement supérieur avec l'huile insaturée (Bucharles et al., 1987).

L'introduction d'acide linoléique à taux croissants (1,5 ; 2 ; 2,5 %) dans des régimes isoénergétiques et isolipidiques stimule le potentiel de synthèse des enzymes lipogéniques (Mourot et al., 1994).

D'une manière plus générale, une augmentation du degré d'insaturation des AG alimentaires se traduit par une stimulation de cette synthèse chez le porc de 100 kg (Allee et al., 1972 ; Mourot et al., 1995 ; Kouba et Mourot 1999).

Les données sur la synthèse des lipides dans les tissus adipeux intramusculaires en relation avec la nature des lipides ingérés sont peu nombreuses. Il semblerait, là aussi, que les AG insaturés stimulent l'activité de l'acétylCoA-carboxylase, mais sans augmentation notable des activités des enzymes produisant le NADPH (Mourot et al., 1995). Or dans le muscle, le facteur limitant pour la synthèse lipidique est le manque de NADPH (Mourot et al., 1999). Ainsi cette augmentation du potentiel d'activité de l'acétylCoA-carboxylase intramusculaire avec l'insaturation des lipides alimentaires ne traduit pas nécessairement une augmentation de la synthèse des lipides et par conséquent des lipides déposés (1,81 % de lipides totaux dans le

muscle longissimus dorsi avec un régime à base d'huile de colza contre 1,67 % avec une matière grasse laitière, différence non significative ; Mourot et al., 1995).

6.2.2. Enzymes désaturases

Les enzymes de la famille des désaturases catalysent les réactions enzymatiques qui permettent l'introduction d'une double liaison carbone-carbone au sein d'un acide gras à longue chaîne carbonée. Elles sont représentées dans l'ensemble du monde du vivant et peuvent être classifiées en deux groupes (Nakamura et al., 1994 ; Tocher et al., 1998 : Nakamura et Nara, 2004) :

- les désaturases solubles représentées par les Acyl-Acyl Carrier Protein (ACP) désaturases exclusivement localisée chez les plantes contenant des plastes.
- les désaturases membranaires qui peuvent être subdivisées en deux groupes :
 - Acyl-lipides désaturases. Ce groupe de désaturases peut être localisé dans les membranes des thylacoides des cyanobactéries, dans le réticulum endoplasmique des plantes ainsi que dans les membranes des plantes.
 - Acyl-CoA désaturases. Ce groupe de désaturases est présent dans les réticulums endoplasmiques des membranes des cellules des animaux incluant les insectes et les nématodes ainsi que le groupe des champignons. Toutes les désaturases présentes chez les mammifères appartiennent à ce groupe.

Trois désaturases sont connues chez les animaux et notamment les humains. La stearoyl CoA desaturase (SCD ou $\Delta 9$ désaturase ou D9D) qui catalyse la synthèse des AG monoinsaturés depuis les AG saturés. La $\Delta 6$ désaturase (D6D) et la $\Delta 5$ désaturase (D5D) qui catalysent la synthèse des AG polyinsaturés hautement insaturés. L'hypothèse de l'existence d'une $\Delta 4$ désaturase a longtemps persisté mais semble dorénavant abandonnée (Voss et al., 1991).

6.2.2.1. *Delta-9 désaturase*

Les AG monoinsaturés sont synthétisés depuis les AG saturés par la delta-9 désaturase (Bloomfield et Bloch, 1960; Marsh et James, 1962). L'enzyme delta-9 désaturase (D9D) ou stearoyl CoA desaturase introduit une double liaison carbone-carbone dans un acide gras en position $\Delta 9$. Le produit principal de cette enzyme est l'acide oléique qui est l'acide gras le plus présent dans les tissus des mammifères. Il existe quatre isoformes de la stearoyl-CoA desaturase (SCD-1 à -4) qui ont été identifiées chez la souris (Ntambi et Miyazaki, 2003) mais seule l'isoforme SCD-1 est connue chez l'homme. Les rôles des autres isoformes restent encore inconnus (Nakamura et Nara, 2004)

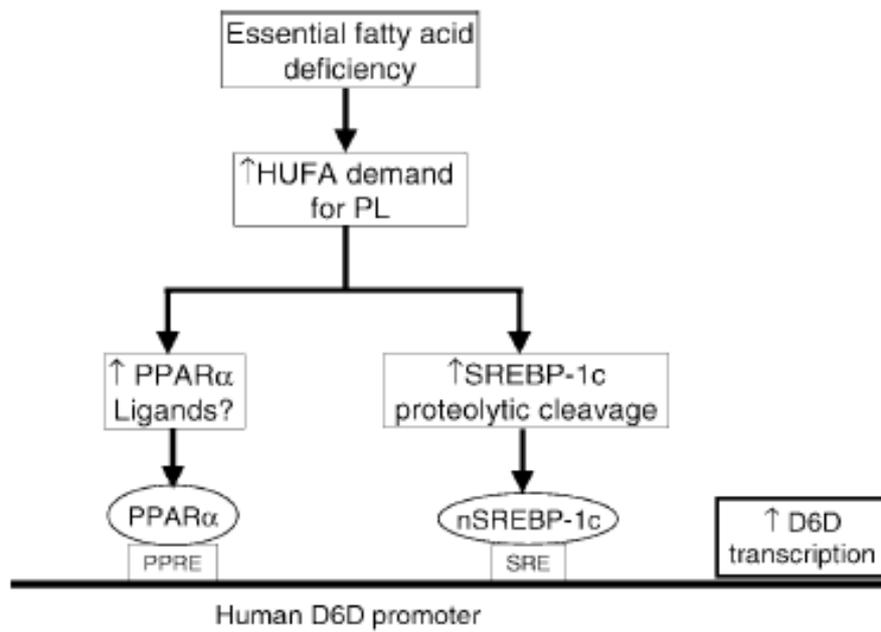


Figure 15. Mécanisme de régulation de la delta-6 désaturase (Nakamura et Nara, 2004)

6.2.2.2. Delta-5 et delta-6 désaturase

Les enzymes delta-5 (D5D) et delta-6 désaturase (D6D) catalysent la synthèse des AG polyinsaturés en introduisant une double liaison carbone-carbone en position $\Delta 5$ et $\Delta 6$, respectivement. Les gènes responsables de l'encodage de ces enzymes sont FADS1 et FADS2, respectivement.

Les activités des enzymes D5D et D6D sont reportées très faibles chez les humains comme chez la plupart des animaux puisque le taux de conversion entre le C18:3 n-3 et le C20:5 n-3 est de l'ordre de 5 % et qu'il n'est plus que de 0,5 % pour permettre la synthèse du C22:6 n-3 à partir du précurseur de la famille des AG n-3 (Plourde et Cunnane, 2007).

6.2.2.2.1. Régulations

6.2.2.2.1.1. Nature des acides gras

Les AG polyinsaturés régulent les activités des trois principales enzymes désaturases listées précédemment. L'activité de la D9D est inhibée par l'addition d'AGPI n-6 et n-3 au sein de l'alimentation des animaux (Holloway et Holloway, 1975 ; Ntambi et al, 1996 ; Kouba et al, 2003). Il en est de même pour les enzymes D5D et D6D (Cho et al., 1999a et b).

Les facteurs de transcription SREBP-1c (sterol regulatory element binding protein-1c) et PPAR α (peroxisome proliferator activated receptor- α) jouent un rôle clé dans la régulation de la désaturation par les AGPI. Nakaruma et Nara (2004) proposent un mécanisme de régulation de la D6D par une action mutuelle de SREBP-1c et de PPAR α (figure 15).

6.2.2.2.1.2. Insuline

Différentes études menées chez des rats ont montré que l'injection d'insuline avait un rôle à jouer, avec l'action de SREBP-1c sur les mécanismes de régulation des désaturases, mais les mécanismes ne sont jusqu'à lors pas élucidés (Brenner, 1989 ; Nakamura et Nara, 2004).

6.2.2.2.1.3. Cholestérol

Un fort apport de cholestérol dans l'alimentation induit l'activité de D9D au contraire de D5D et de D6D dont l'activité est diminuée (Leikin et Brenner, 1987 et 1988).

6.2.2.2.1.4. Température de l'environnement

L'augmentation de la température extérieure diminue l'activité de l'enzyme D9D chez le rat (Peluffo et Brenner, 1974) et le porc (Kouba et al., 1999) ainsi que celle de la D6D chez le rat (Peluffo et Brenner, 1974 ; Brenner, 1989).

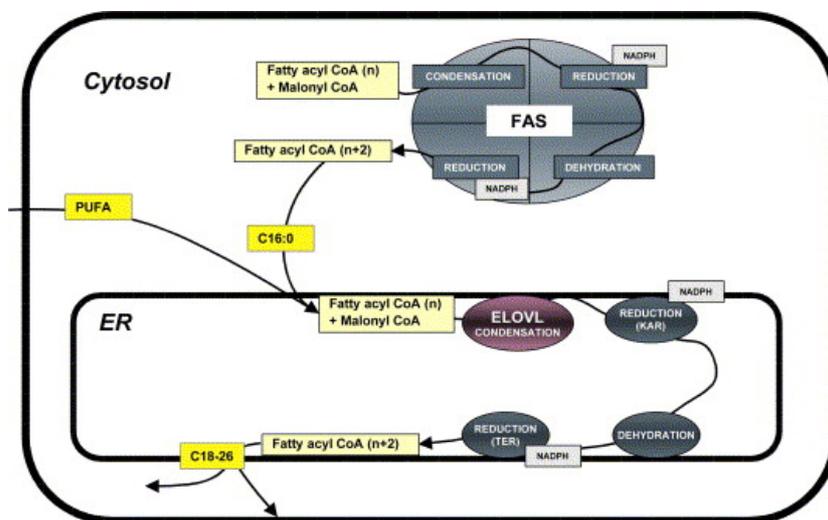


Figure 16. Elongation des acides gras chez les mammifères (Jakobsson et al., 2006).

ELOVL : elongation of very long chain fatty acids ; KAR : 3-ketoacyl-CoA reductase ; TER : trans-2,3-enoyl-CoA reductase)

6.2.3. Enzymes élongases

Souvent négligées dans les étapes de biosynthèse face aux enzymes désaturases, les enzymes élongases n'ont pas pour autant un rôle mineur mais ayant un taux d'élongation plus rapide que le taux de désaturation, elles ne sont pas considérées comme limitantes (Brenner, 1989).

Les élongases participent à l'augmentation de la taille des AG par l'ajout de 2 atomes de carbone. La voie principale des élongases se situe au sein du réticulum endoplasmique et utilise le malonyl-CoA et les acyl-CoA comme substrat de l'élongation (Wang et al., 2005 ; Wang et al., 2006 ; Jakobsson et al., 2006) (figure 16). Six à sept isoformes des élongases ont été trouvées chez la souris, le rat et l'homme. Elles sont souvent tissu spécifiques comme l'élongase-3 (peau et tissu adipeux brun) et l'élongase-4 (rétine) et peu sensibles au nombre de carbones présents dans l'acide gras ($\leq C26$) ou bien carbone-dépendante comme l'élongase-1 et l'élongase-6 qui élonguent les AG saturés et monoinsaturés. L'élongase-2 élongue les AG en C20-C22 alors que l'élongase-5 prend en charge des AG avec un nombre de carbones compris entre 16 et 22 (Wang et al., 2005). L'élongase-7 reste encore à être définie.

Les élongases, de la même manière que les désaturases sont sensibles au statut nutritionnel, aux régulations hormonales et à la nature des AG (Wang et al., 2005) ainsi qu'aux facteurs de transcription (Jacobson et al., 2006)

6.2.4. Peroxydation des lipides

6.2.4.1. *Généralités*

L'élaboration de régimes naturellement enrichis en AG n-3 pour l'alimentation animale, et notamment porcine, contribue à diversifier l'offre de produits riches en ces derniers pour l'alimentation humaine. Toutefois, ces suppléments en AGPI peuvent favoriser la lipoperoxydation (Gladine et al., 2007) et ainsi altérer d'une part les performances et la santé des animaux et d'autre part les qualités de la viande. En effet, la peroxydation des lipides est d'importance majeure dans la dégradation de la qualité de la viande (Lauridsen et al., 2000). Elle dépend de nombreux facteurs dont notamment la teneur en AG polyinsaturés (Tichivandana et Morissey, 1985) ainsi que de la présence d'antioxydants comme la vitamine E (Monahan et al., 1992). Les phospholipides présents au sein des membranes jouent un rôle clé dans l'initiation du développement de la peroxydation (Gray et Pearson, 1987).

6.2.4.2. *Lipoperoxydation*

L'oxydation des lipides peut résulter de plusieurs voies réactionnelles en fonction du milieu et des agents initiateurs. Il s'agit de mécanismes d'auto-oxydation, de photo-oxydation et

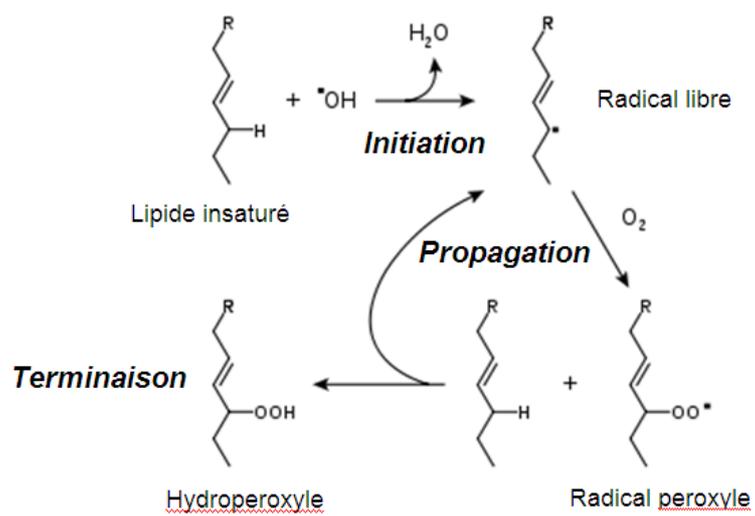


Figure 17. Auto-oxydation des lipides

d'oxydation enzymatique. La lipoperoxydation responsable de l'altération des lipides au sein de la pouvant générer des saveurs désagréables passe par la voie réactionnelle de l'auto-oxydation.

6.2.4.2.1. Mécanismes généraux

L'auto-oxydation des lipides est une réaction auto-catalytique. Elle consiste en un enchainement de trois étapes (figure 17). Une première réaction (initiation), initiée par une espèce réactive de l'oxygène produit un radical libre par élimination d'un hydrogène d'un acide gras. Puis, les réactions s'enchainent pour produire plusieurs radicaux libres (propagation) qui se combinent pour former des composés non radicalaires (terminaison) (Niki et al., 2005).

La susceptibilité à la peroxydation des lipides dans la viande dépend de trois facteurs principaux. (i) la proportion en AG polyinsaturés au sein de la membrane phospholipidique, (ii) la quantité d'espèce réactive de l'oxygène produite et enfin (iii) le taux d'antioxydant présent dans la cellule (Gladine et al., 2007).

6.2.4.2.2. Régulations

Les trois facteurs principaux dont dépend la susceptibilité à la peroxydation des lipides peuvent être modulés la faisant ainsi varier. Les deux premiers facteurs, à savoir les espèces réactives de l'oxygène (produites dans des conditions de stress) et la teneur en AG polyinsaturés (augmentée dans le cadre d'intervention nutritionnelle) augmentent la susceptibilité à la lipoperoxydation. C'est l'apport en antioxydants qui pourra réduire cette susceptibilité.

Les antioxydants peuvent être naturels ou de synthèse, organiques ou minéraux. La vitamine E est l'antioxydant le plus utilisé dans la nutrition animale. D'autres sources d'antioxydants existent. Il s'agit notamment des extraits de plantes riches en polyphénols.

7. ACIDES GRAS ESSENTIELS

7.1. Consommation, recommandation

Les AG jouent un rôle tant au niveau quantitatif que qualitatif sur la santé humaine. Diverses pathologies sont associées à notre apport trop conséquent en lipides et particulièrement mal équilibré. Nos sociétés industrialisées ont depuis l'entrée dans l'aire industrielle un apport trop conséquent en AG saturés, AG polyinsaturés n-6 et en AG *trans*, à l'inverse des AG polyinsaturés n-3 dont les apports sont en déclin (Simopoulos, 2008). Ces changements en termes d'apport d'AG peuvent s'expliquer d'une part par nos changements d'habitudes

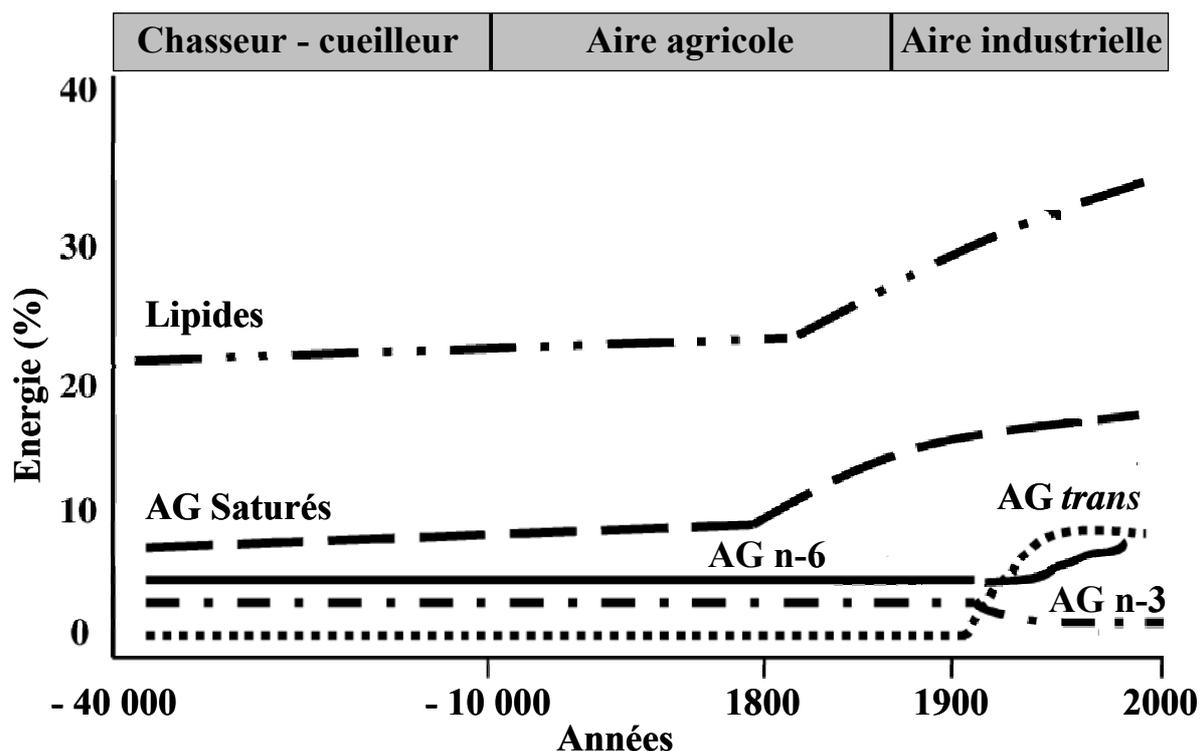


Figure 18. Schéma hypothétique de l'apport en matière grasse, acides gras (n-6, n-3, trans- et totaux) en pourcentage de calorie par rapport aux lipides depuis les populations de chasseurs – cueilleurs jusqu'à l'aire industrielle (Simopoulos, 2008).

Tableau 6. Rapport des AG n-6 / AG n-3 dans différentes populations (Simopoulos, 2008).

Populations	AG n-6/ AG n-3
Populations du Paléolithique	0,8
Grèce, jusqu'en 1960	1,0 - 2,0
Japon	4,0
Inde, campagne	5,0 - 6,1
Royaume-Uni et Europe du nord	15,0
Etats-Unis d'Amérique	16,7
Inde, ville	38 - 50

Tableau 7. Estimation de la consommation en acides gras polyinsaturés (Astorg et al., 2004)

	Lipides totaux (g/j)	C18:2 n-6 (g/j)	C18:3 n-3 (g/j)	LA / ALA	C20:4 n-6 (mg/j)	C20:5 n-3 (mg/j)	C22:5 n-3 (mg/j)	C22:6 n-3 (mg/j)	LC n-3 (mg/j)
Homme	94,1	10,6	0,9	11,5	203,9	149,9	74,8	272,6	497,3
Femme	73,6	8,1	0,7	11,1	151,9	117,8	55,9	225,9	399,6
Moyenne	83,8	9,4	0,8	11,3	177,9	133,9	65,4	249,3	448,5

alimentaires. Notre consommation en poissons sauvages, réputés riches en AG n-3 a diminué contrairement à celle des poissons d'élevage qui ont une composition en AG qui reflètent ceux présents dans leur alimentation. Notre consommation en viande a elle aussi augmenté (figure 18). Pendant très longtemps, manger de la viande était limité à la partie la plus aisée de la population du fait de son prix mais a toujours été dans nos régions très recherché (fort effet satiétogène, notion de plaisir) (Contreras, 2008). La viande des animaux terrestres est plus riche en AG n-6. D'autre part, ces changements peuvent s'expliquer par des changements des pratiques d'élevage particulièrement d'après guerre. Par l'avènement de l'industrialisation et la démocratisation de la consommation de viande, dans un souci de production de masse, les aliments pour animaux étaient proportionnellement plus riches en AG n-6 que en AG n-3, ceci se reflétant dans la viande des animaux de rente. Ainsi, le rapport des AG n-6/n-3 est passé d'un niveau compris entre 6 et 8 avant les années 1970 à un rapport actuel compris en 14 et 16 (Ailhaud et al., 2006).

L'évolution de ce rapport des AG n-6 / n-3 n'est pas équivalent selon l'époque choisie mais aussi selon la localisation de la population et ses pratiques alimentaires quotidiennes (tableau 6.)

Pour estimer nos apports réels dans notre consommation quotidienne, de nombreuses enquêtes nutritionnelles ont été menées. D'après diverses enquêtes nutritionnelles telles que SU.VI.MAX (Astorg et al., 2004), INCA (Volatier et al., 2000) et l'étude d'Aquitaine (Combe et Boué, 2001), nos apports en précurseur des AG n-3 sont équivalents à 800 mg par jour contre environ 10 g de précurseurs en AG n-6 (tableau 7).

Or, d'après les recommandations émises par l'AFSSA dans sa dernière édition des Apports Nutritionnels Conseillés (ANC, 2001), il est recommandé d'avoir chez l'homme adulte une consommation quotidienne d'ALA de 2 g contre 10 g de LA. Le rapport des précurseurs des familles des AG n-6 et n-3 est recommandé comme devant être équivalent à 5 contre environ 15 actuellement (tableau 8).

7.2.Stratégies à mettre en place

Pour atteindre les objectifs fixés par l'AFSSA dans leur dernière édition des apports nutritionnels conseillés, différentes stratégies peuvent être mises en place. L'AFSSA stipule que toute source en AG n-3 est à prendre en considération.

Tableau 8. Tableau synthétique des apports conseillés en acides gras (g/j) chez l'adulte (ANC, 2001)

	AG saturés	AG monoinsaturés	C18:2 n-6	C18:3 n-3	AG polyinsaturés à longue chaîne	DHA	Total
Homme adulte	19,5	49,0	10,0	2,0	0,5	0,12	81,0
Femme adulte	16,0	40,0	8,0	1,6	0,4	0,10	66,0
Femme enceinte	18,0	45,5	10,0	2,0	1,0	0,25	76,5
Femme allaitante	20,0	50,0	11,0	2,2	1,0	0,25	84,2
Sujet âgé	15,0	38,0	7,5	1,5	0,4	0,10	62,5

AG : acides gras ; DHA : acide docosahexaénoïque

Pour mémoire, les recommandations en termes d'apport d'AG n-3 étaient d'avoir une consommation quotidienne de 2 g en précurseur C18:3 n-3 et de 120 mg de l'acide gras terminal C22:6 n-3 (ANC, 2001).

D'après les différentes enquêtes nutritionnelles menées récemment en France, nos apports journaliers moyens en C18:3 n-3 sont en moyenne égaux à 800 mg alors que nous ingérons quotidiennement, en moyenne, 250 mg de C22:6 n-3 (Volatier et al., 2000 ; Astorg et al., 2004). Ainsi, alors que nous présentons une carence pour le précurseur de la famille des AG n-3, les besoins en dérivé terminal C22:6 n-3 sont satisfaits. De ce fait, nous ne parlerons plus que des besoins en précurseur pour le reste de l'exposé.

Les différentes stratégies pouvant être mise en place sont multiples (Whelan et al., 2006). D'une part, une des solutions peut consister à revoir de manière globale notre alimentation quotidienne en y introduisant des aliments réputés riches en C18:3 n-3. Il s'agit des huiles de table comme le colza ou bien l'huile de noix ou bien de consommer des végétaux qui en proportion sont riches en précurseurs comme la mâche. Néanmoins, au regard de notre consommation et des recommandations émises, il faut plus que doubler notre apport quotidien en C18:3 n-3, ceci signifie qu'il faut changer de manière drastique notre alimentation de tous les jours.

Il existe une autre approche qui est d'ingérer de l'huile de poisson sous forme de capsules limitant ainsi les phénomènes de peroxydation ou bien d'odeurs désagréables. Mais ces dernières sont riches en AG n-3 à longue chaîne de type C20:5 n-3 et C22:5 n-3 pour lesquelles nous ne sommes pas carencés. De ce fait, nous ne développerons pas le sujet.

Il existe sur le marché des aliments confectionnés à partir de matières premières riches en AG n-3 (lin, huile de poisson) qui vont augmenter d'autant plus la part des AG n-3 au sein de ce nouveau produit. Sans pour autant être exhaustifs, nous pouvons citer les pâtes, le pain, la margarine, la pâte à tartiner, la sauce pour salade, les produits laitiers, les barres de céréales voire même du jus d'orange ou bien encore de la viande, de l'huile de poisson microencapsulée (Whelan et al., 2006).

Enfin, une autre stratégie à mettre en place est d'utiliser la filière animale comme vecteur d'AG n-3. Brièvement, les animaux nourris par des aliments naturellement riches en AG n-3 auront un dépôt significativement augmenté en ces derniers d'une manière plus ou moins efficace selon les espèces. Chez les animaux monogastriques, il existe une relation très forte entre les AG présents dans l'alimentation et les AG qui se trouvent au sein des tissus de ces derniers (Mourot et Hermier, 2001). Cette relation est beaucoup moins forte chez les

polygastriques du fait des phénomènes de biohydrogénation au sein du rumen (Chilliard et al., 2008).

Ainsi, cette propriété pour introduire les AG n-3 jugés bon pour la santé est mise en application chez le porc, chez les poulets de chair ou les pondeuses ainsi que chez les bovins pour la production de viande ou de produits laitiers.

8. OBJECTIFS

Cette synthèse bibliographique a rappelé l'importance des facteurs d'élevage sur la qualité de produits animaux, en particulier l'effet de l'alimentation sur la qualité nutritionnelle. Pour répondre aux souhaits de l'AFSSA déjà évoqués précédemment, à savoir augmenter la part des AG (AG) n-3 dans l'alimentation humaine et avoir un équilibre en AG C18:2 n-6 / C18:3 n-3 voisin de 5, des études ont été mises en place depuis la fin des années quatre-vingt-dix pour essayer d'améliorer cette qualité nutritionnelle. Pour l'AFSSA tout nouveau vecteur qui apportera des AG n-3 dans l'alimentation humaine est à prendre en considération. Des travaux de recherche ont donc été mis en place pour répondre à leur demande en utilisant la relation particulièrement forte chez les monogastriques entre les AG ingérés et ceux déposés dans la viande.

Les objectifs de cette thèse s'inscrivent dans cette démarche ainsi que dans les axes de recherche développés par le laboratoire d'accueil.

La viande de porc enrichie en AG n-3 peut être considérée comme un nouveau vecteur. De nombreuses études ont déjà montré la faisabilité de cette démarche. Néanmoins, il reste encore à définir la stratégie optimale de supplémentation. De plus, les AG n-3 peuvent présenter une susceptibilité à la peroxydation pouvant altérer les qualités nutritionnelle, sensorielle et technologique de la viande. Il faut donc estimer ce risque sur les produits transformés. Actuellement, peu d'études rapportent des travaux sur les produits de transformation et de charcuterie tels qu'ils seront mangés par le consommateur.

La qualité nutritionnelle d'une viande pour sa fraction lipidique est la résultante de la teneur en lipides du produit et de la qualité des AG incorporés dans les tissus maigres et gras. Ainsi, la construction de la qualité nutritionnelle passe par la compréhension de la mise en place des tissus adipeux et de la synthèse des lipides pour la maîtrise des quantités de lipides déposés. Pour l'aspect qualité des AG de la viande, cette construction de la qualité passe par l'étude de la caractérisation des AG déposés, et par la connaissance de leurs mécanismes d'incorporation

dans les adipocytes ou dans les membranes des cellules et de leur préservation au sein des produits.

C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous avons mis en place deux études *in vivo* chez le porc charcutier et une étude *in vitro* sur les préadipocytes de porcelets.

Pour optimiser la supplémentation en AG n-3 aux porcs, nous avons étudié l'effet de la durée de distribution des régimes riches en AG n-3 (étude I) et dans une autre étude nous avons comparé des sources différentes d'AG n-3 dans les régimes (étude II).

A chaque fois nous avons caractérisé les dépôts d'AG dans différents tissus maigres et gras, dans la viande et dans un certain nombre de produits transformés. Selon les études nous avons également étudié la synthèse des AG *de novo* et celle des AG à longue chaîne ainsi que la peroxydation des lipides. Concernant l'effet de l'apport des sources de n-3, nous avons fait varier des paramètres peu ou pas définis dans la littérature tels que les variétés végétales utilisées (lin, chanvre, colza), leur nature (huile, graine), et les procédés technologiques de cuisson-extrusion de la graine de lin.

Pour mieux connaître la mise en place et le développement des tissus adipeux, nous avons réalisé une étude *in vitro* en étudiant l'adipoconversion en relation avec l'apport de différents AG des familles n-3 et n-6 dans le milieu de culture (étude III).

Dans l'idée d'optimiser pour le mieux le dépôt d'AG n-3 dans la viande, nous avons considéré l'ensemble des lots expérimentaux, et mis en relation les données de consommation en AG n-3 des animaux ainsi que le dépôt de ces derniers. De la sorte, nous tenterons d'avoir une vue d'ensemble quant à l'absorption et à l'efficacité du dépôt des différents AG n-3.

Ce travail de thèse a fait l'objet d'un contrat CIFRE financé par la Société VALOREX. Une partie du fonctionnement a été pris en charge par le projet « Porc Santé » financé par la Région Bretagne (études I et II). L'étude III a été financée par le CRITT SANTE BRETAGNE, projet « Adiporc ».

MATERIELS ET METHODES

1. REGIMES EXPERIMENTAUX

Les régimes expérimentaux ont été réalisés au sein du moulin expérimental de l'UMR SENAH (Saint-Gilles, France). Les régimes ont été confectionnés de manière à ce qu'ils soient isolipidiques, isoenergétiques et isoprotéiques. La base du régime des porcs charcutiers, fournie par la société Cooperl-Hunaudaye (Lamballe, France) était identique, seul l'apport de matière grasse différait. Les graines (Tradi-lin®) et l'huile de lin étaient fournies par la société Valorex (Combourtille, France), l'huile de chanvre par la société Malouine de Courtage (Saint-Malo, France), l'huile de palme, tournesol, et de colza par la société Cooperl-Hunaudaye (Lamballe, France). Les régimes où les matières grasses ont été apportées sous formes d'huile sont supplémentés en protéines (85 % de son de blé + 15 % de tourteau de tournesol). En effet, ce mélange sert de support à l'extrusion des graines. La même quantité est donc apportée dans les régimes pour être identique à un apport de graines extrudées. L'ensemble de ces régimes étaient supplémentés en antioxydants (40 ppm de vitamine E et 0,25 ppm de sélénium) fournis par la société Cooperl-Hunaudaye (Lamballe, France).

2. ANIMAUX ET PRELEVEMENTS EXPERIMENTAUX

2.1. Animaux expérimentaux

2.1.1. Etude I : Effet de la durée de distribution de la graine de lin sur les performances de croissance, le métabolisme des lipides et la qualité nutritionnelle de la viande de porc

Cinquante porcs mâles castrés de race [Large-White*Landrace] x Pietrain, provenant de l'élevage expérimental de l'UMR SENAH ont été utilisés. Les animaux élevés en loge individuelle ont été nourris *ad libitum* jusqu'à la veille de leur abattage où ils ont été mis à jeun. Au cours de l'expérimentation, les animaux ont été pesés, à jeun, hebdomadairement, les quantités d'aliments distribuées et les refus ont été enregistrés.

2.1.2. Etude II : Effet des apports et de la nature des acides gras n-3 sur les performances de croissance et la qualité nutritionnelle de la viande de porc charcutier

Quatre vingt porcs mâles castrés de race [Large-White*Landrace] x Pietrain, provenant de l'élevage expérimental de l'UMR SENAH ont été utilisés. Les animaux élevés en loge individuelle ont été nourris *ad libitum* jusqu'à la veille de leur abattage où ils ont été mis à jeun. Au cours de l'expérimentation, les animaux ont été pesés, à jeun, hebdomadairement, les quantités d'aliments distribués et les refus ont été enregistrés.

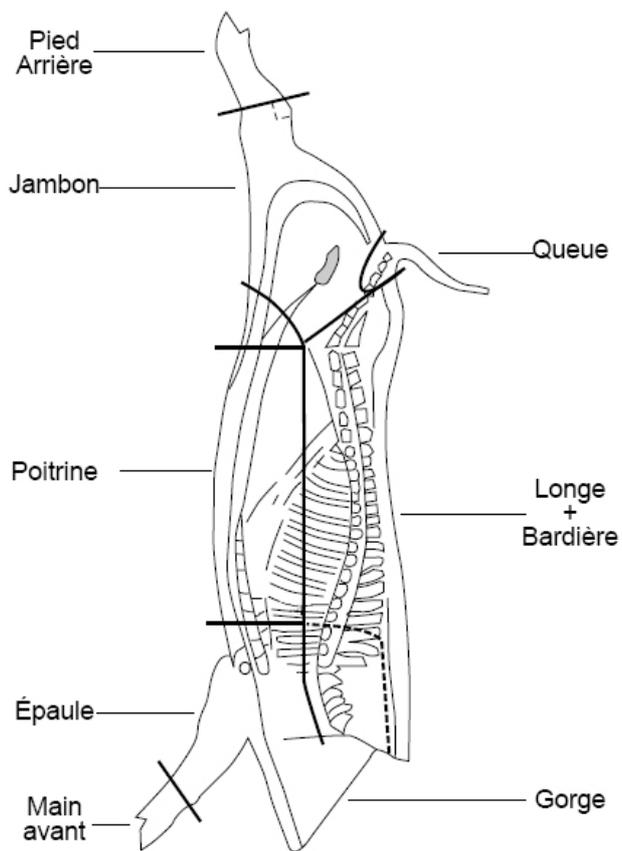


Figure 19. Découpe hollandaise normalisée du porc charcutier (d'après Métayer et Daumas, 1998)

2.1.3. Etude III : Effet de la nature des acides gras sur l'adipoconversion chez le porcelet

Huit porcelets (mâles et femelles) de race [Large-White*Landrace] x Pietrain élevés sous la mère ont été sacrifiés à l'abattoir expérimental de l'UMR SENAH par électronarcose cervicale puis exsanguination.

2.2. Abattage et découpe des animaux

Au cours de l'élevage, des biopsies du tissu adipeux sous-cutané du cou à 80 kg de poids vif.

A la fin de la période expérimentale, les animaux ont été sacrifiés à l'abattoir expérimental de l'UMR SENAH (agrément C.E. 35.275.01) selon les pratiques en vigueur dans l'industrie porcine. Brièvement, après une mise à jeun de 24 heures des porcs, ces derniers sont réceptionnés à l'abattoir et mis en attente dans la salle de stabulation avec un accès libre à l'eau. Les porcs sont par la suite abattus les uns après les autres. Ils sont anesthésiés par électronarcose et mis à mort par exsanguination sanguine par le tranchage de la gorge au niveau de la jugulaire. Les carcasses des porcs sont ensuite douchées puis échaudées pour permettre d'obtenir une carcasse exempte de toutes soies. Par ailleurs, les onglons des porcs sont ôtés conformément à la norme en vigueur. Par la suite, et après un nouveau douchage, les carcasses sont éviscérées en ôtant les abats rouges (cœur, foie) ainsi que les abats blancs (intestins, poumons, reins, ...). La carcasse est séparée en deux suivant l'axe de la colonne vertébrale. La tête et la queue du porc sont situées sur la demie carcasse gauche. La carcasse est pesée en fin de chaîne d'éviscération constituant le poids à chaud. La teneur en viande maigre (TVM) déterminée par le Fat-O-Meter repose sur le principe physique de réflectance. La sonde de l'appareil est enfoncée sur deux sites de mesure : entre la 3^{ème} et la 4^{ème} dernière vertèbre lombaire, à 8 cm de la ligne médiane dorsale ainsi que entre la 3^{ème} et la 4^{ème} dernière côte, à 6 cm de la ligne médiane dorsale. Les épaisseurs des tissus adipeux sous cutanés du dos, du cou et du jambon sont mesurées à la règlette.

Les carcasses sont ensuite réfrigérées pendant 24 h à 4°C après avoir été mises pendant 1 h dans une chambre froide avec une forte ventilation pour favoriser une rapide baisse de la température. Le lendemain de l'abattage, les carcasses sont à nouveau pesées et la demie carcasse gauche est scindée selon la découpe hollandaise normalisée (pieds, jambon, queue, longe, bardière, poitrine, épaule) en accord avec la méthode décrite par Metayer et Daumas (1998) (figure 19).

2.3. Prélèvements des échantillons

Différents prélèvements ont été réalisés à l'abattoir. Le sang a été prélevé à la saignée de l'animal et recueilli dans des tubes préalablement héparinés (10 µl/ml) et conservés à 4°C jusqu'à centrifugation (3500 g, 15 min, 4°C), séparation des phases plasmatique et érythrocytaire et stockage à -20 °C pour analyse. Dans le cadre des analyses enzymatiques, les échantillons ont été prélevés à l'éviscération et immédiatement congelés dans de l'azote liquide et stockés à -80°C jusqu'à analyse. Pour la détermination de la teneur en lipide et de la composition en acides gras, les échantillons une fois prélevés ont été immédiatement congelés à -20°C. Pour l'analyse histologique des fibres musculaires, les muscles prélevés étaient orientés dans le sens des fibres et une section de 0,5 cm x 5 cm de muscle a été prélevée. Ces bâtonnets de fibres musculaires ont été immédiatement congelés dans de l'isopentane refroidi à l'azote liquide jusqu'à analyse.

2.4.Elaboration des produits de transformations

A partir des différentes pièces issues des animaux, des transformations de la viande ont été réalisées. Des côtes de porc ont été cuites sur un gril ménager selon les recommandations faites par le constructeur de cet appareil en accord avec Kouba et al. (2003). L'ensemble des produits de charcuterie tels que de l'andouille, le jambon cru, le jambon cuit, la mousse de foie, le pâté de campagne en terrine, le pâté de campagne en conserve, la poitrine fumée et salée, le rôti de porc, la saucisse, la saucisse knack, le saucisson à l'ail ainsi que le saucisson sec ont été préparés, à partir des matières premières carnées issues des porcs de l'INRA – UMR SENAH, par des industriels de la salaisonnerie selon leurs procédés habituels de fabrication.

3. DOSAGES DE LABORATOIRE

3.1.Caractérisation des aliments expérimentaux

La composition chimique des aliments expérimentaux est caractérisée par la détermination de la teneur en matière sèche, la teneur en énergie brute, la teneur en matière azotée totale et enfin, la teneur en lipides totaux.

3.1.1. Détermination de la teneur en matière sèche

Une masse connue d'aliment (3 g) est placée dans un creuset en porcelaine, préalablement défini (poids connu). Les échantillons sont placés dans une étuve à 103°C jusqu'à masse

constante de l'échantillon dessiqué. La teneur en matière sèche est exprimée en gramme pour 100 g d'échantillon.

3.1.2. Détermination de la teneur en énergie brute

La détermination de l'énergie est réalisée selon la méthode à la bombe calorimétrique par l'utilisation de calorimètre C5000 (Ika, Staufen, Allemagne). Le principe de la détermination de l'énergie consiste à mesurer l'élévation de température provoquée par la combustion de l'échantillon dans de l'oxygène, sans perte de chaleur avec le milieu extérieur. L'élévation de température permet de calculer le pouvoir calorifique brut de l'échantillon, ceci en considérant le poids de l'échantillon combustible, la capacité calorifique du système calorimétrique ainsi que l'augmentation de la température de l'eau contenue dans la cuve intérieure de la cellule de mesure. L'énergie est exprimée en joule pour 100 g d'échantillon sec ou bien d'échantillon frais si l'on considère la teneur en eau de cet échantillon.

3.1.3. Détermination de la teneur en protéines totales

La teneur en protéine brute est déterminée selon la méthode de Dumas (AOAC, 1990) par la détermination de la teneur en azote total. En la multipliant par 6,25, on obtient la teneur en protéine brute totale.

3.2. Caractérisation de la qualité technologique de la viande de porc

3.2.1. Mesures de la qualité de la carcasse

Les pertes en eau associées au ressuage de la carcasse sont évaluées par une différence entre le poids à chaud de la carcasse après son éviscération et le poids à froid après 24 h. La teneur en viande maigre (TVM) déterminée par le Fat-O-Meter repose sur le principe physique de réflectance. La sonde de l'appareil est enfoncée sur deux sites de mesure : entre la 3^{ème} et la 4^{ème} dernière vertèbre lombaire, à 8 cm de la ligne médiane dorsale ainsi que entre la 3^{ème} et la 4^{ème} dernière côte, à 6 cm de la ligne médiane dorsale. Les épaisseurs des tissus adipeux sous cutanés du dos, du cou et du jambon sont mesurées à la réglette.

La proportion des pièces de découpe est estimée pour les différentes pièces primaires (jambon, longe, bardière, poitrine, épaule) d'intérêt agronomique par rapport au poids de la demi-carcasse gauche.

3.2.2. Mesures de la qualité du muscle longissimus dorsi

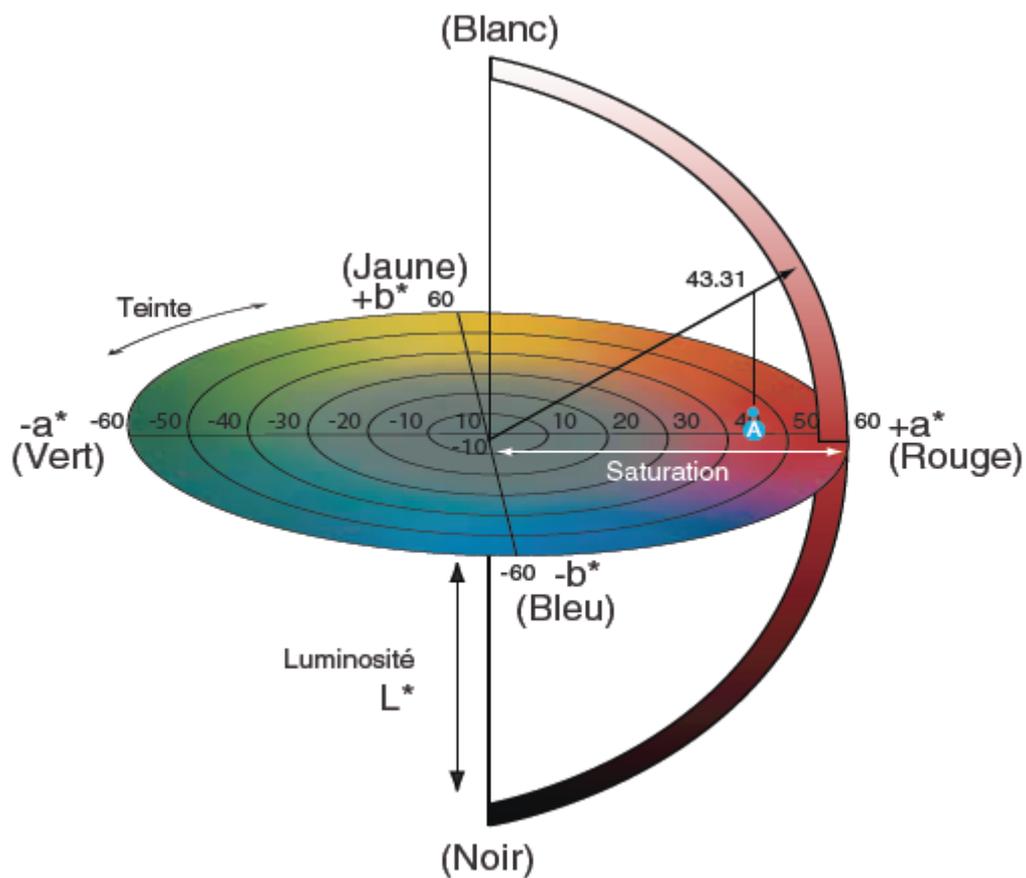


Figure 20. Composantes de la couleur mesurée au colorimètre représentés par la luminosité L^* , la composante de couleur rouge – vert a^* et la composante de couleur jaune – bleu b^* (innoboost.com).

Le pH ultime à 24 h a été mesuré par un pH-mètre à viande en enfonçant la sonde au sein du muscle. Les paramètres de couleur ont été mesurés par détermination des coordonnées CIE L*, a*, b* (Chromamètre Minolta CR 300). L*, a* et b* indiquent respectivement la luminosité, la composante de couleur rouge – vert et la composante de couleur jaune – bleu (figure 20).

Les pertes en eau post-mortem ont été réalisées sur muscle *longissimus dorsi* paré par la méthode de Honikel (1998). Brièvement, le jour de la découpe de la carcasse, environ 100 g de muscle paré de *longissimus dorsi* sont prélevés et immédiatement pesés. L'échantillon est suspendu à un crochet à l'intérieur d'un sachet gonflé et hermétiquement scellé en veillant à ce qu'il n'ait pas de contact entre la viande et le sachet. Après 24 h de stockage à 4°C, l'échantillon est sorti du sachet et est à nouveau pesé. L'opération précédente est renouvelée et le poids du muscle est à nouveau pesé à 48h. Les pertes en eau sont exprimées en pourcentage du poids initial.

3.3.Caractérisation de la fraction lipidique

3.3.1. Teneur en lipides totaux

Différentes méthodes ont été utilisées pour extraire les lipides totaux. Ces méthodes sont adaptées à l'échantillon extrait. La méthode de Folch *et al.* (1957) est réalisée sur la majorité des tissus prélevés sur le porc (muscles, tissus adipeux, abats blancs, abats rouge), produits de transformation (charcuterie et côtes de porc) et sur les régimes alimentaires fournis aux animaux.

Brièvement, une masse connue de prise d'essai est homogénéisée au Polytron (PT 3100, Kinematica, Lucerne, Suisse) dans un mélange de solvants (chloroforme/méthanol 2/1) à 12 000 tpm pendant 1 min à 1,5 min. Le broyat est filtré sur verre fritté (porosité : 100 à 160 µm) sous vide. Le filtrat est additionné de 23 ml de NaCl à 0,73 % puis mis à décanter pendant 2 heures. La phase inférieure (chloroforme + lipides) est filtrée sur du sodium sulfate anhydre (VWR, Louvain, Belgique) avec l'aide de filtre sans cendres (Durieux, Marne-la-Vallée, France). La phase inférieure est additionnée de 50 ml d'une solution de « rinçage » (Folch / NaCl à 0,58 %, 80/20) afin d'extraire les éventuelles traces de lipides et mise à décanter 15 min. La phase inférieure est elle aussi filtrée sur sodium sulfate anhydre et additionnée au précédent filtrat. Le mélange chloroforme lipide est mis à évaporer sous vide. Après évaporation du chloroforme, les résidus secs de lipide sont pesés. La teneur en lipides

est donnée par la différence entre le poids des ballons d'évaporation à vide et à sec + résidus lipidiques. Elle est exprimée en pourcentage du poids du tissu frais.

3.3.2. Classes de lipides

3.3.2.1. *Utilisation de colonnes Sep-Pak*

La séparation des lipides neutres et polaires avec l'usage des colonnes SEP-PAK est réalisée selon la méthode décrite par Juaneda et Rocquelin (1985). Brièvement, 80 mg de lipides sont introduits dans la cartouche de silice (Waters corporation, Milfort, USA). 30 ml d'un solvant A (Ether de pétrole/ éther diéthylique 92/8) sont introduits dans la cartouche. Sous un vide léger, la fraction des lipides non polaires est alors entraînée avec le solvant. Pour récupérer les lipides polaires, 30 ml de méthanol sont par la suite introduits dans la cartouche.

3.3.2.2. *Utilisation de la chromatographie liquide à haute performance*

La chromatographie liquide à haute performance est réalisée avec l'usage d'une colonne en phase inverse sur une colonne de silice greffée avec des chaînes de 18 carbones (LichroCART C18 – 5 μ - 250 x 4,6 mm). La phase mobile est constituée de deux solutions A (chloroforme) et B (méthanol : eau : ammoniacque : chloroforme ; 92:5:2:1) qui sont éluées en différentes proportions selon le temps (t = 0min : 100% A et 0% B ; t = 10 min : 70% A et 30% B et t = 20 min : 0% A et 100% B). Le débit de la pompe (HPLC pump 420 ; Kontron Instruments) est de 1,5 ml/min. La détection des classes de lipide se fait au niveau d'un détecteur à diffusion de lumière (SEDERE ; Paris ; France) avec les paramètres suivants : température de vaporisation du solvant : 40°C ; pression de gaz de nébulisation : 2,2 bar et pression du gaz auxiliaire : 0,5 bar.

La concentration en triglycérides, diglycérides, cholestérol, monoglycérides, acides gras libres, cardiolipides, phosphatidylethanolamine, phosphatidylinositol, phosphatidylsérine, phosphatidylcholine et sphingomyéline dans le muscle est mesurée et exprimée en mg pour 100 g de tissu frais.

3.3.3. Composition en acides gras

La composition en acides gras est réalisée sur les échantillons extraits (tissus adipeux, muscles, abats rouges et blancs, aliments, différents produits de transformation, ...) par chromatographie en phase gazeuse.

3.3.3.1. *Préparation des esters méthyliques d'acides gras*

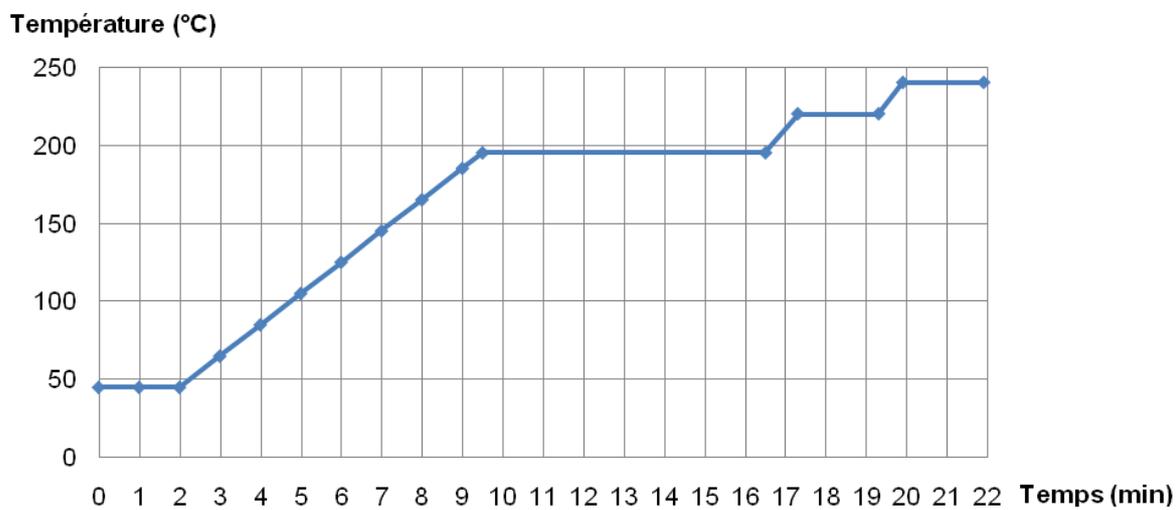


Figure 21. Programme d'élévation de température de la colonne du chromatographe. La programmation du four est la suivante : 2 min à 45°C ; élévation de température de 20°C/min : 7 min à 195°C ; élévation de 30°C/min ; 2 min à 220°C, élévation de 35°C/min ; 2 min à 240°C.

Les esters méthyliques d'acides gras extraits sont préparés selon ma méthode au trifluorure de bore (BF₃) selon Morrison et Smith (1964). Brièvement, une fraction des lipides totaux extraits (25 à 30 mg) est saponifiée à chaud (70°C) pendant 15 min dans 1 ml de solution de NaOH (0,5 N) dissoute dans du méthanol. L'acide margarique (C17:0) sert d'étalon interne et est rajouté à cette étape. Les acides gras saponifiés sont convertis en esters méthyliques au cours d'une méthylation (15 min à 70°C) dont le catalyseur est le BF₃. Après l'addition de 6 ml d'eau pour neutraliser l'excès en trifluorure de bore, les esters sont repris par addition de 1 ml de pentane. La phase supérieure composée de pentane et d'esters méthyliques est recueillie dans un flacon adéquat pour une analyse en CPG.

3.3.3.2. Chromatographie en phase gazeuse

Les esters méthyliques d'acides gras sont analysés par le chromatographe Perkin Elmer Autosystem XL. Cet appareil est équipé d'un injecteur avec split (1:10) à 220°C, d'une colonne capillaire polaire en silice (longueur de 30 mètres et diamètre de 0,25 mm ; Supelco) avec une phase stationnaire de 80% de biscyanopropyl et de 20% de cyanopropylphényl siloxane, et d'un détecteur à ionisation de flamme à 280°C. Le gaz vecteur est l'hydrogène. La température de la colonne s'élève, par des plateaux de 2, 7 et deux fois 2 minutes, à 45, 195, 220 et 240°C, avec des montées de températures entre les paliers de 20, 30 et 35°C/min (figure 21). La durée totale d'analyse des profils d'acide gras est de 21,9 minutes.

Les temps de rétention d'esters méthyliques standards permettent d'identifier les esters méthyliques d'acides gras extraits et la quantité de chaque acide gras est calculée en référence à l'étalon interne (C17:0). Les acides gras sont exprimés selon deux unités : en pourcentage des acides gras identifiés et en milligramme pour 100 grammes de tissu.

3.4. Caractérisation de la peroxydation des lipides

3.4.1. Mesure selon la méthode du 2-thiobarbituric acid-reactive substances

La peroxydation des produits de charcuterie ainsi que des tissus est déterminée par l'usage de la méthode modifiée décrite par Monahan et al. (1992) en quantifiant le 2-thiobarbituric acid-reactive substances (TBARS) comme décrit par Oriani et al. (2001). Brièvement, 1 g de tissu est homogénéisé dans 9 ml de KCl (1,15%). De cette solution, 100 µl d'homogénat sont prélevés et aliquotés à 37°C dans 80 mM de tampon Tris-malate (pH 7,4) avec 5 mM de FeSO₄ (pour catalyser la peroxydation des lipides) dans un volume final de 1 ml. A temps fixe (0, 60, 120, 200 et 300 min), des aliquots sont prélevés pour la mesure des TBARS en ajoutant 2 ml de solution stock de TCA-TBA-HCl. Après homogénéisation, la solution est

chauffée pendant 15 min dans de l'eau bouillante. Après refroidissement de la solution, le précipitât est ôté par une centrifugation à 715 g pendant 15 min. L'absorbance de l'échantillon est déterminée à 535 nm par rapport à l'absorbance du blanc (tous les réactifs moins l'homogénat). Les valeurs sont exprimées en nmole de malonaldehyde (MDA) / g de tissu à 0, 60, 120, 200 et 300 min.

3.4.2. Mesure du malondialdehyde par chromatographe liquide à haute performance

L'analyse HPLC du malondialdehyde au sein des muscles est basée sur la méthode décrite d'Agarwal et Chase (2002) et légèrement modifiée par Gladine et al. (2007). Brièvement, 5 ml d'hydroxytoluène butylé (BHT) dans de l'hexane et 8 ml d'acide trichloroacétique (TCA) sont additionnés à environ 1 g de tissu préalablement réduit en poudre et homogénéisés sous azote liquide, puis mélangés au polytron (Bioblock Scientific, Suisse) pendant 30 s à 30000 tpm. La phase supérieure est ôtée puis filtrée. 1,4 ml du filtrat sont additionnés à 0,7 ml de TCA 5% et de 1,5 ml d'acide thiobarbituric 0,8% (TBA). Après 30 min d'incubation à 70°C, le complexe TBA-TCA est ôté par du n-butanol. La phase contenant le butanol est ensuite centrifugée pendant 10 min à 1000 g. La solution obtenue est injectée dans le système HPLC (Perkin Elmer Instruments, Shelton, Connecticut) équipé avec une colonne RP C18 (ODB 5 µm, 4,6 mm x 250 mm) (Interchim, Montluçon, France) et ayant pour phase mobile (flux : 0,6 ml/min) un mélange (60/40, v/v) de phosphate de potassium (0,05 M, pH 6,8) et de méthanol. Le niveau de MDA est détecté par fluorescence (excitation à 515 nm, émission à 553 nm) en utilisant la courbe de calibration du tetraethoxypropane (TEP).

3.5. Caractérisation enzymatique

3.5.1. Mesures des enzymes de la lipogénèse

3.5.1.1. Préparation des surnageants

Pour déterminer les activités enzymatiques de la G6PDH, de l'EM, de l'ACC et de la FAS, les tissus adipeux, musculaires et hépatiques sont broyés dans 3,5 ml de saccharose 0,25 M. Les homogénats sont centrifugés (20 000 g, 40 min, 4°C) et l'activité est mesurée sur le surnageant.

3.5.1.2. Mesure de l'activité de l'enzyme malique (EM) et de la glucose-6-phosphate déshydrogénase (G6PDH)

La G6PDH et l'EM catalysent respectivement les deux réactions suivantes :

Tableau 9. Composition du milieu réactionnel pour le dosage de l'enzyme malique ou de la glucose-6-phosphate-déshydrogénase.

Milieu réactionnel		EM		G6PDH	
		Blanc (µl)	Essais (µl)	Blanc (µl)	Essais (µl)
Tp triéthanolamine (pH 7,4)	0,4 M	500	500	500	500
MnCl ₂	0,12 M	100	100	-	-
MgCl ₂	0,1 M	-	-	100	100
NADP	3,4 mM	200	200	100	100
Malate	0,03 M	-	50	-	-
Glucose-6-P	0,2 M	-	-	-	25
H ₂ O	-	2050	2000	25	-
Echantillon	-	X	X	X	X

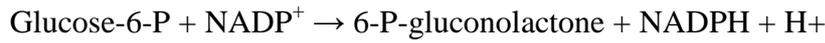
EM : enzyme malique ; G6PDH : glucose-6-phosphate-déshydrogénase ; Tp : tampon

X = 150 µl d'homogénat cellulaire

50 µl (EM) ou 25µl (G6PDH) pour les surnageants de foie

200 µl (EM) ou 25 µl (G6PDH) pour les surnageants de tissu adipeux

100 µl (EM) ou 50 µl (G6PDH) pour les surnageants de muscle



Les activités de la G6PDH et l'EM sont mesurées dans le surnageant selon les méthodes de Ficht *et al* (1959) et de Hsu & Lardy (1969), respectivement. La mesure de l'activité de ces deux enzymes se fait dans les milieux de réaction décrit dans le tableau 9.

Après avoir incubé pendant 5 min à 37°C le volume réactionnel, préalablement agité, le contenu des tubes est transvasé dans des microcuvettes et l'apparition du NADPH est mesurée à 37°C toutes les 30 s pendant 3 min à 340 nm à l'aide d'un spectrophotomètre (Uvikon, Kontron instruments, Milan, Italie). L'activité spécifique de l'enzyme est calculée de la manière suivante :

$$AS = (V_0 \times V \times 1000) / (v \times \epsilon \times c)$$

AS : activité, en nmol NADPH/min/mg de protéine

V₀ : vitesse réactionnelle (variation de l'absorbance), en min⁻¹

V : volume total du milieu réactionnel, en ml

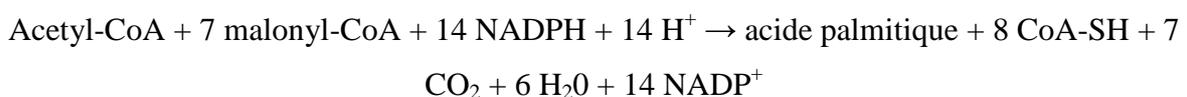
v : volume du surnageant, en ml

ε : coefficient d'extinction molaire du NADPH, qui est de 6,3 ml.μmol⁻¹.cm⁻¹

c : concentration protéique, en mg/ml

3.5.1.3. Mesure de l'activité de la fatty acid synthase (FAS)

La FAS catalyse la réaction suivante :



L'activité de la FAS est déterminée selon la méthode décrite par Bazin & Ferré (2001) par la mesure de la disparition du NADPH par spectrophotométrie à 340 nm. La solution 1 (700 μl, tampon phosphate de potassium, pH 6,5, 100 mM, PO₄H₂K anhydre 0.1 mM, malonyl-CoA 600 μM) et la solution 2 (100 μl, tampon phosphate de potassium, pH 6,5, 100 mM, PO₄HK₂ anhydre 0.1 mM, acétyl-CoA 25 μM) sont ajoutés aux surnageants (100 μl pour le tissu adipeux, 100 à 150 μl pour le tissu musculaire, 50 μl pour le foie). Cette quantité de surnageant est choisie de façon à observer une décroissance linéaire de l'absorbance pendant au moins 8 min. Le tube blanc (eau à la place du malonyl-CoA) est mesuré en permanence face à l'essai. Après 10 min d'équilibre à 37°C, la réaction est enclenchée par l'ajout de la

Tableau 10. Composition des milieux d'incubation et de la solution radioactive pour le dosage de l'acetyl-CoA-carboxylase.

	Solution d'incubation des surnageants		Solution radioactive	
	[C]	Quantité (mg)	[C]	Quantité (mg)
BSA		120		6
MgCl ₂	-	-	8,9 mM	16,2
MnCl ₂	4 mM	80	-	-
Glutathion SH	6 mM	184	3,3 mM	9,1
Citrate de potassium	10,2 mM	334	5,8 mM	16,9
EDTA	0,1 mM	3,75	1,5 mM	0,49
ATP	-	-	8,1 mM	39,9
Acétyl-CoA	-	-	0,7 mM	4,95
¹⁴ CO ₃ HNa	-	-	0,2 mCi/mmol	0,495
Tampon Tris-HCl pH 7,5		Qsp 100 ml		Qsp 9 ml

ATP : adénosine triphosphate ; BSA : bovine serum albumin ; [C] : concentration ; EDTA : acide éthylène diamine tétracétique ; qsp : quantité suffisante pour

Tableau 11. Composition du milieu réactionnel pour le dosage de l'acetyl-CoA-carboxylase.

	Milieux réactionnels	Essais (µl)	Blancs (µl)
Tissu adipeux	Solution d'incubation	250	250
	Tampon Tris	150	350
	Surnageant	200	-
	Solution radioactive	250	250
Tissu musculaire	Solution d'incubation	250	250
	Tampon Tris	50	450
	Surnageant	400	-
	Solution radioactive	250	250

solution 2. La disparition du NADPH est mesurée toutes les 60 s pendant 10 min. L'activité est exprimée en nmol de NADPH utilisée / min / mg protéine. Le calcul de l'activité est le même que celui utilisé pour la G6PDH et l'EM.

3.5.1.4. Mesure de l'activité de l'acetyl-CoA-carboxylase (ACC)

L'Acetyl-CoA carboxylase catalyse la réaction suivante :



L'incorporation de $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ dans le malonyl-CoA est mesurée selon la méthode de Lavau *et al.* (1982). Les solutions et les réactifs utilisés sont ceux listés dans le tableau 10, les dilutions des échantillons sont elles listées dans le tableau 11.

La solution radioactive est préparée extemporanément à partir d'une solution aqueuse de $^{14}\text{CO}_3\text{HNa}$ (50-62 mCi/mmol, Amersham) en ajoutant du CO_3HNa non radioactif et du tampon Tris-HCl (pH 7,5) de manière à obtenir une activité d'environ 0,2 mCi/mmol. Une pré-incubation du surnageant est d'abord réalisée en présence des cofacteurs pendant 30 min à 37°C de manière à obtenir une activation complète de l'enzyme. Puis, 250 μl de solution radioactive sont ajoutés. La réaction est arrêtée au bout de 4 min par l'addition de 200 μl d'HCl 3 N. Après évaporation à sec à l'aide d'éthanol absolu, le résidu est repris dans 0,5 ml d' H_2O ; 0,4 ml sont prélevés et placés dans une fiole à comptage où 7 ml de liquide de scintillation sont rajoutés pour une détermination de la radioactivité au compteur β . L'activité spécifique est exprimée en nmol de NADPH formée/min/mg de protéine.

$$A = (\text{dpm} \times 0,5) / (\text{S} \times \text{t} \times 0,4 \times \text{V} \times \text{c})$$

dpm : radioactivité estimée à partir de la mesure en cm déterminée au compteur β

S : radioactivité spécifique du carbonate (dpm/nmol) qui correspond à 0,2 Ci/ μmol , soit 1 μCi = 2,22 dpm soit 440 dpm/nmol

0,5/0,4 = reprise de 0,4 ml sur les 0,5 ml utilisés pour la dissolution du résidu sec

c : concentration protéique, en mg/ml

t = temps de réaction en minute

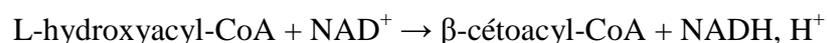
3.5.2. Mesure des activités désaturases

Le dosage des activités des enzymes désaturase $\Delta 5$, $\Delta 6$ et $\Delta 9$ est réalisé en collaboration avec le laboratoire de biochimie (Agrocampus-Ouest, Rennes, France) selon la méthode décrite par D'Andrea *et al.* (2002).

Trois grammes de tissus sont homogénéisés au potter dans 4 ml de tampon saccharose 0,25 M. L'homogénat est centrifugé à 8000 g pendant 30 min à 4°C. La phase supérieure obtenue est à son tour centrifugée à 8000 g pendant 30 min à 4°C. Le surnageant recueilli est dilué au quart dans du tampon phosphate 150 mM contenant 6 mM MgCl₂ ; 7,2 mM ATP ; 0,54 mM CoA et 0,8 mM NADH. La réaction débute par l'addition de 60 nmol de [1-¹⁴C] C18:0 (40-60 mCi/mmol), de [1-¹⁴C] C18:3 n-3 (40-60 mCi/mmol) et de [1-¹⁴C] C20:3 n-6 (40-60 mCi/mmol) pour les dosages des enzymes delta-9-désaturase (EC 1.14.19.1), delta-6-désaturase (1.14.19.3) et delta-5-désaturase (EC 1.14.19.6), respectivement. La réaction est stoppée avec 1 ml de KOH 2 M en solution éthanolique après 1 h d'incubation à 37°C. La saponification des acides gras est menée à 70°C pendant 30 min. Les savons obtenus sont acidifiés par l'ajout d'HCl 3 M et extraits par du diéthyléther. L'ajout de bromoacétonaphthone, de triéthylamine et d'acide acétique va permettre d'obtenir des naphthacyl-éthers d'acides gras qui seront séparés par HPLC selon la méthode décrite par Rioux *et al.* (2000). La radioactivité des fractions recueillies est estimée au compteur β. Elle consiste en la différence entre la radioactivité du produit de désaturation et la radioactivité totale (produit et substrat). Le pourcentage de conversion du substrat en son produit de désaturation est ainsi calculé.

3.5.3. Mesure de l'activité de la β-hydroxyacyl-CoenzymeA deshydrogenase

La β-hydroxyacyl-CoenzymeA deshydrogenase (HAD) constitue une des enzymes de la voie de la β-oxydation. Elle est considérée comme étant l'enzyme limitante. Elle catalyse la réaction suivante :



Le principe du dosage va être de suivre la disparition du NADH au spectrophotomètre à 340 nm à 30°C pendant 5 min.

Pour cela, 200 mg de muscle sont homogénéisés dans 5 ml de tampon de broyage (Na₂HPO₄ 0,1 M ; EDTA 2 mM ; NaH₂PO₄, H₂O 0,1 M ; pH 7,5). Après désintégration des membranes cellulaires au sonicateur, l'homogénat est centrifugé (1500 g, 13 min, 4°C). Le surnageant est recueilli et est conservé dans la glace jusqu'au dosage sur l'appareil COBAS.

La réaction s'effectue dans 125 µl une solution de NADH 17,2 mM diluée dans du tampon cinétique (triéthanolamine 109 mM ; EDTA 5,429 mm ; pH 7,0) et la réaction débute lors de la mise du substrat acétoacétylCoA 2 mM dans du tampon cinétique.

L'expression des résultats d'activité enzymatique est en μmoles de substrat disparu / mn / g de muscle :

$$(\Delta\text{DO} * V_t * D) / (\epsilon \text{ NADH} * L * Q)$$

ΔDO = pente de la courbe $\Delta\text{DO} = f$ (temps en min)

V_t = Volume total dans la cuve en litres

D = Dilution globale de l'échantillon

$\epsilon \text{ NADH}$ = Coefficient d'extinction molaire du NADH = 6.22 l/mol/cm

L = Epaisseur de la cuve = 0.6 cm

Q = prise essai en g

3.6. Détermination de la quantité de protéines

La quantité de protéines est déterminée par colorimétrie sur microplaque de titration selon la méthode BCA (Bicinchoninic Acid) (Smith et al., 1985). Les différentes concentrations protéiques sont calculées grâce à la mesure de la densité optique par spectrophotométrie à 562 nm, en référence à une gamme étalon réalisée avec de la BSA.

3.7. Dosage des paramètres sanguins

Quelques paramètres sanguins ont été déterminés par l'usage de l'appareillage COBAS MIRA (Roche). Il s'agit d'un spectrophotomètre multiparamétrique géré par informatique pour la réalisation d'analyses biochimiques. Les dosages sont réalisés sur la fraction plasmatique pour les dosages suivants : glucose, triglycérides, cholestérol et HDL cholestérol par les kits Bio-Mérieux.

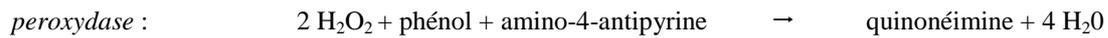
D'une manière générale, les molécules à doser sont, par voie enzymatique, mises en réaction pour former d'une manière indirecte ou non de l'eau oxygénée (H_2O_2). L'eau oxygénée formée est dosée selon une réaction de type Trinder (1969) formant ainsi un chromogène qui sera lu à la longueur d'onde appropriée.

3.7.1. Dosage du taux de cholestérol sanguin

Le cholestérol est dosé en utilisant la séquence *cholestérol estérase* – *cholestérol oxydase* – *peroxydase* – chromogène. Les réactions sont les suivantes :

cholesterol estérase : cholestérol estérifié \rightarrow cholestérol + acides gras

cholesterol oxydase : cholestérol + $\text{O}_2 \rightarrow$ cholestène-4, one-3 + H_2O_2



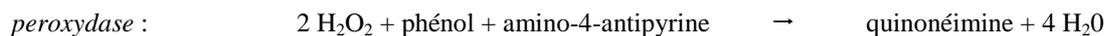
L'intensité de coloration est mesurée à 500 nm. Elle est proportionnelle à la quantité de cholestérol présente dans l'échantillon. Sa valeur est exprimée en mg/l.

3.7.2. Dosage du taux de cholestérol–HDL sanguin et détermination du taux de cholestérol-LDL

Il existe différentes classes de lipoprotéines ceci selon leur densité. Cette densité dépend de la proportion en lipides et protéines de ces dernières. Elles sont classées, selon la densité croissante, en chylomicrons, lipoprotéines de très faible densité (VLDL), lipoprotéines de faible densité (LDL) et lipoprotéines de haute densité (HDL). Les lipoprotéines les plus légères (chylomicrons, VLDL et LDL) sont précipitées par l'addition d'acide phosphotungstique en présence d'ions magnésium. Le surnageant obtenu après centrifugation (4000 g, 15 min, 4°C) contient les HDL. Le cholestérol lié aux HDL est dosé selon la même méthode décrite précédemment pour le cholestérol.

3.7.3. Dosage du taux de glucose sanguin

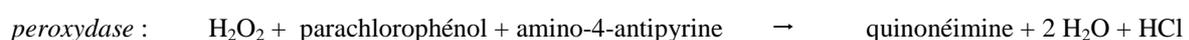
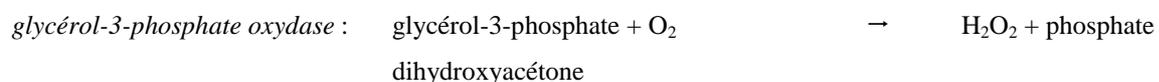
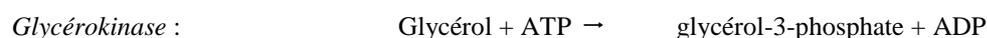
Le glucose est dosé en utilisant la séquence *glucose oxydase – peroxydase – chromogène*. Les réactions sont les suivantes :



L'intensité de coloration est mesurée à 505 nm. Elle est proportionnelle à la quantité de glucose présente dans l'échantillon. Sa valeur est exprimée en mg/l.

3.7.4. Dosage du taux de triglycérides sanguin

Les triglycérides sont dosés en utilisant la séquence *lipase – glycérokinase – glycérol-3-phosphate oxydase – peroxydase – chromogène*. Les réactions sont les suivantes :



L'intensité de coloration est mesurée à 500 nm. Elle est proportionnelle à la quantité de triglycérides présente dans l'échantillon. Sa valeur est exprimée en mg/l.

3.8. Caractérisation des tissus adipeux et musculaires

3.8.1. Caractérisation des tissus adipeux

Les tissus adipeux sont caractérisés par l'étude de la cellularité. Cela consiste à déterminer la taille et le nombre des cellules d'un tissu afin d'obtenir une distribution la plus proche possible de celle *in situ* et de calculer une valeur moyenne du diamètre adipocytaire. La méthode employée est celle décrite par Hirsch et Gallian (1968). Elle consiste en la fixation du tissu adipeux avec du tétr oxyde d'osmium ou acide osmique (OsO_4^{2-}). Les tissus adipeux prélevés à l'abattoir ont été prélevés et placés dans du sérum physiologique à 37°C jusqu'à qu'ils soient découpés en petits fragments sous une lampe infrarouge pour maintenir une température constante. Les fragments ont ensuite été lavés avec une solution de NaCl 9 ‰ à 37°C puis fixé 48h à 72h dans du mélange fixateur (0,5 ml acide osmique 4% ; 1,5 ml Sorensen A + B (23/77)). Le Sorensen A correspond à du phosphate monosodique dihydrate ($\text{NaH}_2\text{PO}_4, \text{H}_2\text{O}$), le Sorensen B correspond à de l'hydrogénophosphate disodium ($\text{NaH}_2\text{PO}_4, 12 \text{H}_2\text{O}$). A la fin de la fixation, le tissu est lavé sous vide avec une solution de NaCl 9 ‰ sur un filtre de 400 µm de diamètre. Les adipocytes ainsi lavé sont repris dans une solution d'urée 1M et mis à l'étuve pendant 48h à 37°C. Ce traitement à l'urée permet un meilleur isolement des cellules fixées. A la fin de ce traitement, les cellules ont été lavées 3 fois sous vide sur filtre (Ø 0,25 µm) avec une solution de NaCl 9 ‰. Après le dernier lavage, les cellules sont reprises dans un volume donné de Triton X-100 1 % et mises à compter au Coulter Counter pendant 30 s. L'appareil détermine la répartition de la population selon le diamètre des cellules.

3.8.2. Caractérisation des tissus musculaires

Les fibres musculaires sont caractérisées par le centre de Recherche et de Développement sur les Aliments, Agriculture et Agroalimentaire (Saint-Hyacinthe, Québec, Canada) dans le cadre d'une collaboration scientifique. Brièvement, des bâtonnets de muscles de 0,5 cm x 1 cm de longueur suivant l'axe des fibres ont été congelés dans l'isopentane refroidi dans l'azote liquide avant d'être entreposés à -80°C. 3 coupes sériées de 10 µm (espacées de 20 µm, permettant de sélectionner l'adipocyte dans sa plus grande taille) ont été réalisées à -20°C à l'aide d'un cryostat et colorées au rouge à l'huile selon la méthode de Dubowitz (1985). Les

adipocytes ainsi colorés isolés ou en faisceaux, ont été observés et photographiés à l'aide d'un microscope Nikon Eclipse (modèle E400) muni d'une caméra Spot Insight Color (modèle 3.2.0, Diagnostic Instrument Inc. Sterling Heights, EU). Une section de tissu par animal a été exploitée pour l'observation de tous les adipocytes contenus dans cette section. Le nombre est estimé par la formule de Di Girolamo et al. (1971) à partir de la teneur en lipides neutres et du volume des adipocytes.

4. ANALYSES STATISTIQUES

Les données obtenues ont été soumises à des analyses multivariées selon la procédure GLM du logiciel SAS (1989). Le seuil de signification retenu est de 5 %. Un seuil de 10 % est discuté comme une tendance. Lorsque l'effet était significatif, les moyennes sont comparées deux à deux par le test de Bonferroni.

ÉTUDE I

-

**EFFETS DE LA DUREE DE DISTRIBUTION DE LA GRAINE
DE LIN SUR LES PERFORMANCES DE CROISSANCE, LE
METABOLISME DES LIPIDES ET LA QUALITE
NUTRITIONNELLE DE LA VIANDE DE PORC**

1. INTRODUCTION

Il existe chez les animaux monogastriques, et notamment chez le porc, une très bonne relation entre les acides gras (AG) présents dans l'alimentation et les AG déposés au sein des tissus (Mourot et Hermier, 2001). Cette propriété peut être utilisée pour permettre aux consommateurs d'avoir un apport supérieur en AG polyinsaturés (AGPI) jugés bon pour la santé (Legrand et Schmitt, 2003 ; Corino et al., 2008). Les AGPI n-3 sont considérés comme jouant un rôle bénéfique pour la santé humaine notamment dans la prévention des maladies cardio-vasculaires (Conquer et Holub, 1998) et dans les cas d'hypertriglycéridémie (Simopoulos, 1991).

Parmi les sources végétales disponibles, les graines de lin sont celles qui sont les plus riches en précurseur de la famille des AG n-3. L'acide linoléique (ALA ; C18:3 n-3) représente près de 60 % des AG identifiés (Hall III et al., 2006). De nombreuses études ont été menées chez le porc montrant que la distribution de rations alimentaires additionnées de lin sous forme d'huile (Fontanillas et al., 1997), de graines de lin crues (Enser et al., 2000) ou encore de graines extrudées (Vorin et al., 2003 ; Wilfart et al., 2004a ; Bee et al., 2008 ; Chilliard et al., 2008 ; Corino et al., 2008) permettaient d'enrichir la viande des animaux de manière plus ou moins importante en AG n-3. Les changements de la composition des AG présents dans notre alimentation jouent un rôle dans la santé humaine (Caggiula et Mustad, 1997). L'enrichissement massif de la viande en AGPI, et notamment en AG n-3, sans prendre de précaution particulière, par exemple sans l'ajout d'antioxydants, peut avoir un impact négatif sur la qualité des produits. L'augmentation des AGPI est inversement corrélée à la stabilité oxydative du tissu adipeux chez le porc (Hertzman et al., 1988, Warnants et al., 1996 ; Lopez-Bote et al., 1997) générant des odeurs et des flaveurs jugées comme négatives (Romans et al., 1995b). Les AG n-3, du fait du grand nombre de doubles liaisons, contribuent à faire baisser le point de fusion du tissu adipeux (IUPAC, 1978) ce qui ne sera pas sans provoquer des problèmes technologiques pour les industriels de la salaisonnerie (soucis de tranchage ou bien d'obturation des grilles). De plus, les AG n-3, en plus d'être sensibles à une plus forte peroxydation des lipides sont aussi les substrats privilégiés de la β -oxydation (Beare-Rogers, 2001). Ainsi, et pour toutes ces raisons, il s'avère utile de ne donner que la juste dose en graines de lin pour qu'il y ait une utilisation maximale des AG dans le sens d'une meilleure biodisponibilité en AG d'intérêt pour le consommateur. Ainsi, l'apport en AG n-3 et notamment dans le cadre de notre étude en graines de lin apparaît être une étape cruciale pour déterminer la stratégie optimale de supplémentation (Wood et al., 2003; Raes et al., 2004).

Elle passe par l'utilisation de la bonne dose en faisant varier soit la concentration en AG n-3 (pourcentage de graines de lin) et/ou sa durée de distribution.

Quelques travaux ont été menés dans ce sens en vue d'optimiser l'apport en graines de lin dans la ration des animaux. Romans et al. (1995a) ont fait varier l'apport en graines jusqu'à en incorporer 15 % au sein de la ration. Ces auteurs ont montré que les doses les plus importantes de graines de lin conduisaient à une augmentation plus élevée en AG n-3 au sein des tissus, mais en parallèle, le panel de consommateurs a décelé un goût anormal pour les produits de charcuterie confectionnés à partir des porcs ayant consommé les régimes aux plus fortes teneurs en graines de lin (10 et 15 %). Les mêmes auteurs, dans une autre expérimentation, ont sélectionné un apport massif en graines de lin (15 % de la ration alimentaire) et fait varier la durée de distribution des régimes aux animaux. Les auteurs montrent qu'avec un apport massif en graines de lin, très vite, (sous 7 jours) la proportion en AG n-3 au sein des tissus est augmentée. L'apport massif en graines de lin est là encore associé à un jugement négatif des consommateurs du fait de la peroxydation des lipides.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet du passage d'une durée de distribution classique (de 50 kg à 105 kg de poids vif, soit environ 8 semaines) de régime enrichi en AG n-3 à une durée plus courte (de 80 kg de poids vif jusqu'à l'abattage, soit environ 4 semaines) sur les performances de croissance des animaux ainsi que sur la proportion des AG n-3 au sein des tissus.

2. MATERIELS ET METHODES

Ce paragraphe décrit sommairement les méthodes employées. Pour une lecture plus approfondie de la méthodologie, se reporter au chapitre « Matériels et Méthodes ».

2.1. Régimes alimentaires

Les régimes expérimentaux ont été réalisés à l'UMR SENAH par le moulin expérimental à partir d'une base commune d'aliments (sans lipides ajoutés) classiquement distribués aux porcs charcutiers (annexe 1). Les lipides ont été ajoutés sous forme d'huile de palme pour le régime palme (1,6 % ; COOPERL-HUNAUDAYE, Lamballe, France), d'huile de tournesol pour le régime tournesol (1,6 % ; COOPERL-HUNAUDAYE, Lamballe, France) ou de graines de lin extrudées Tradi-lin ® (4,2 % ; VALOREX, Combourtillé, France). Les régimes

Tableau 12. Composition des régimes expérimentaux des porcs charcutiers.

Composition centésimale, %	Palme	Tournesol	Lin
Aliment de base *	94,0	94,0	95,8
Huile de palme	1,6	-	-
Huile de tournesol	-	1,6	-
Graines de lin extrudées, Tradi-lin®	-	-	4,2
Supplémentation en protéines **	4,4	4,4	-
Supplémentation en antioxydant ***	x	x	x
Composition chimique, % poids frais			
Matière sèche	88,3	88,4	88,4
Taux de protéines	18,6	18,6	18,7
Matière grasse	3,0	3,0	3,2
Energie brute, MJ/kg	16,3	16,3	16,3
Composition en acides gras, % des acides gras identifiés			
C16:0	19,6	13,7	13,3
C18:0	3,0	3,1	2,9
C18:1 n-9	24,0	23,6	21,0
C18:2 n-6	48,1	54,6	36,0
C18:3 n-3	3,5	2,6	24,4
C18:2 n-6 / C18:3 n-3	13,7	20,7	1,5

* Annexe 1

** 85% de son de blé + 15% de tourteau de tournesol

*** 40 ppm vitamine E + 0,25 ppm sélénium

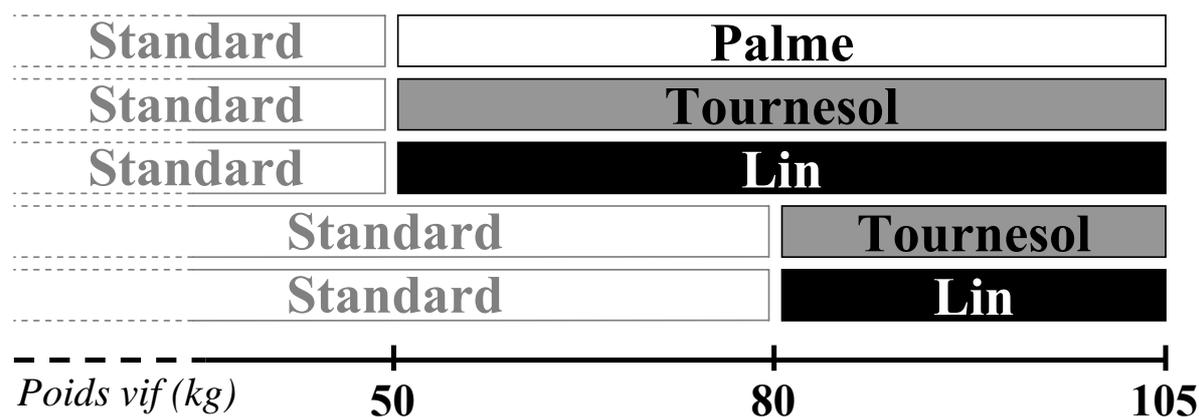


Figure 22. Schéma expérimental de la conduite d'élevage. Chaque lot est composé est 10 animaux soumis, après un élevage classique en pré-expérimentation à l'aliment standard, à trois régimes : palme, supplémenté en tournesol et supplémenté en tournesol sur deux périodes de distribution : 50-105 kg et 80-105 kg.

étaient isolipidiques (3,1 %), isoprotéiques (18,6 %) et isoénergétiques (16,3 MJ/kg). Pour compenser l'apport en protéines *via* les graines de lin du régime lin, les régimes palme et tournesol étaient supplémentés de 0,2 % avec un support riche en protéines. Pour se prémunir des risques d'oxydation, l'ensemble des régimes étaient supplémentés en antioxydant (vitamine E 40 ppm et sélénium 0,25 ppm). La composition des régimes expérimentaux est présentée dans le tableau 12.

Le régime palme était particulièrement riche en AG saturés, le régime tournesol en AG n-6 et le régime lin en AG n-3. Le rapport C18:2 n-6 / C18:3 n-3 est égal, respectivement, à 13,7 ; 20,7 et 1,5 pour les régimes palme, tournesol et lin.

2.2. Animaux expérimentaux

Des porcs mâles castrés de race [Large-White*Landrace] x Pietrain, provenant de l'élevage expérimental de l'UMR SENAH ont été utilisés. Pour étudier l'effet de la durée de distribution des régimes riches en AG polyinsaturés, deux périodes expérimentales ont été mises en place : une période classique allant d'un poids vif de 50 kg jusqu'au stade commercial d'abattage (105 kg) et une période plus courte allant de 80 à 105 kg. Le schéma expérimental (figure 22) était composé de 5 lots de 10 animaux chacun.

Les animaux élevés en loge individuelle ont été nourris *ad libitum* jusqu'à la veille de leur abattage où ils ont été mis à jeun. Au cours de l'expérimentation, de manière hebdomadaire, les porcs ont été pesés à jeun et les quantités d'aliments distribuées et les refus ont été enregistrés. A 80 kg de poids vif, des biopsies du tissu adipeux sous-cutané du cou ont été réalisées.

2.3. Prélèvements des tissus et dosages expérimentaux

Les animaux ont été abattus à l'abattoir expérimental de l'UMR SENAH selon les normes en vigueur dans l'industrie porcine à l'abattoir. Ce dernier répond aux normes vétérinaires et est immatriculé sous le numéro d'agrément CE 35.275.01.

Le sang a été prélevé sous héparine lors de la saignée, stocké à 4°C jusqu'à centrifugation pour la séparation du plasma et des hématies. Le plasma a été récupéré et stocké à -20°C jusqu'à détermination des paramètres sanguins : cholestérolémie (total, HDL et LDL), glycémie et triglycéridémie.

Les tissus nécessaires à la mesure des activités des enzymes désaturases ont été prélevés après l'abattage des porcs et ont été immédiatement utilisés pour la réalisation du dosage.

Les tissus nécessaires aux dosages des enzymes de la lipogenèse (FAS, EM, ACC, G6PDH), du métabolisme oxydatif (HAD) et aux dosages de biologie moléculaire ont été prélevés après abattage et conservés à -80°C jusqu'à réalisation du dosage.

Après l'abattage, les tissus (tissu adipeux sous cutané dorsal, panne, tissu adipeux intermusculaire du jambon, muscle *longissimus dorsi*, muscle *semimembranosus*, foie) ont été prélevés et conservés dans les conditions nécessaires à la bonne réalisation du dosage.

2.3.1. Mesures enzymatiques

Les mesures des activités des enzymes désaturases $\Delta 5$, $\Delta 6$ et $\Delta 9$ ont été réalisées immédiatement après abattage sur le tissu adipeux sous cutané dorsal, le muscle *longissimus dorsi* ainsi que sur le foie selon la méthode décrite par D'Andrea et al. (2002).

Les mesures des activités des enzymes de la lipogenèse ont été réalisées sur le muscle *longissimus dorsi*, muscle *semi-membranosus*, tissus adipeux sous cutané dorsal, panne, tissu adipeux intermusculaire du jambon et le foie. Le dosage de l'activité de l'enzyme malique (EM, EC 1.1.1.40) et de la glucose-6-phosphate déshydrogénase (G6PDH, EC 1.1.1.49) a été réalisé selon la modification de Gandemer et al. (1983) de la méthode de Fitch et al. (1959) et de Hsu et Lardy (1969), respectivement. L'activité de l'acetyl-CoA-carboxylase (ACC, EC 6.4.1.2) a été dosée selon la méthode de la fixation du $H^{14}CO_3^-$ (Chang et al., 1967 ; Chakrabarty et Leveille, 1969). L'activité de la Fatty acid synthase (FAS, EC 2.3.1.85) a été mesurée selon la méthode décrite par Lavau et al. (1982).

La mesure de l'activité de la β -hydroxyacyl Coenzyme A deshydrogenase (HAD) a été réalisée selon la méthode décrite par Bass et al. (1969) sur les muscles *longissimus dorsi*, et *semi-membranosus*.

2.3.2. Mesures des caractéristiques des tissus

Les caractéristiques des tissus adipeux ont été déterminées par la mesure des paramètres de la cellularité des adipocytes. Ces paramètres ont été déterminés sur le tissu adipeux sous cutané dorsal, sur la panne ainsi que sur le tissu adipeux intermusculaire du jambon. Le nombre, la fréquence et le diamètre des adipocytes ont été mesurés.

Les caractéristiques des tissus musculaires ont été déterminées par les mesures histologiques sur les muscles *longissimus dorsi* et *semi-membranosus*. Pour cela, deux bâtonnets par muscle (0,5 cm * 5 cm) ont été prélevés dans le sens des fibres. Ils ont été plongés dans de

Tableau 13. Matières premières carnées nécessaires à l'élaboration des produits de charcuteries élaborées par les industriels de la salaisonnerie.

	Andouille	Jambon cru	Jambon cuit	Mousse de foie	Pâté de campagne (terrine)	Pâté de campagne (conservé)	Poitrine fumée – salée	Rôti de porc	Saucisse	Saucisse knack	Saucisson à l'ail	Saucisson sec
Bardière					X	X			X	X	X	X
Chaudin	X											
Foie				X	X	X						
Gorge					X	X				X		
Gras de mouille				X								
Jambon		X	X									
Longe								X				
Maigre chute de poitrine et de col											X	
Maigre épaule 3D*									X	X	X	
Maigre longe												X
Poitrines							X					

l'isopentane refroidi à l'azote liquide. Les fibres musculaires ont été stockées à -80°C jusqu'à analyse. Le typage des fibres musculaires selon leur métabolisme glycolytique et/ou oxydatif ainsi que la détermination de la taille et de la fréquence des adipocytes intramusculaires ont été réalisés au laboratoire Agriculture et Agroalimentaire Canada du centre de recherche et de développement sur les aliments (St-Hyacinthe, Québec, Canada).

2.3.3. Mesures de la teneur et de la composition en acides gras

La détermination de la teneur en lipides totaux ainsi que de la composition en AG des tissus ont été réalisées sur le tissu adipeux sous cutané dorsal, la panne, le tissu adipeux intermusculaire du jambon, le muscle *longissimus dorsi*, le muscle *semi-membranosus* et le foie. La détermination des lipides totaux a été réalisée selon la méthode de Folch (1957). La composition en AG a été déterminée après saponification et dérivation des AG au BF3 selon Morrison et Smith (1964) par un passage en chromatographie en phase gazeuse.

2.4. Découpe et transformation

Les paramètres de la qualité technologique ont été estimés après abattage par la mesure du poids des porcs ainsi que par la prise de sa Teneur en Viande Maigre (TVM) au Fat-O-Meater et par la mesure de l'épaisseur du gras de couverture du jambon, du dos et du cou. Après un stockage de 24h à 4°C, les carcasses ont été à nouveau pesées. Les demi-carcasses gauches ont été découpées selon une découpe hollandaise normalisée en différentes pièces primaires (pieds, jambon, queue, longe, bardière, poitrine, épaule). Les paramètres de couleurs (L*, a*, b*) ainsi que le pH et les pertes en eau ont été mesurés sur le muscle *longissimus dorsi*.

Pour la confection des produits de transformation (charcuterie et viande fraîche), les différentes matières premières carnées ont été prélevées après la découpe primaire. Deux côtes de porc premières (os + muscle + tissu adipeux) ont été prélevées puis mises sous vide et stockées à -20°C jusqu'à analyse (teneur en lipides, composition en AG, peroxydation des lipides). Pour la réalisation des différents produits de charcuterie, les matières premières carnées présentées dans le tableau 13 ont été prélevées. Une fois les matières premières reçues, les industriels de la salaisonnerie ont réalisé leurs produits selon leur recette habituelle (andouille, jambon cru, jambon cuit, mousse de foie, pâté de campagne (terrines et conserve), poitrine fumée/salée, rôti de porc, saucisse, saucisse knack, saucisson à l'ail, saucisson sec).

Tableau 14. Effets des régimes sur les performances de croissance des porcs charcutiers

	Palme		Tournesol		Lin	Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Age début, j	105,0 ^b	125,7 ^a	104,7 ^b	125,7 ^a	104,6 ^b	0,5	NS	***
Age fin, j	157,7 ^b	157,6 ^b	160,2 ^{ab}	154,8 ^c	162,9 ^a	4,6	NS	***
Poids début, kg	50,9 ^b	78,9 ^a	50,0 ^b	79,0 ^a	49,5 ^b	2,9	NS	***
Poids fin, kg	104,7 ^b	112,1 ^a	105,5 ^b	112,9 ^a	105,3 ^b	3,2	NS	***
Aliments consommé, kg	162,8 ^a	112,8 ^b	157,8 ^a	108,1 ^b	162,1 ^a	13,0	NS	***
Gain moyen quotidien, g/j	1018 ^b	1048 ^b	1006 ^b	1174 ^a	963 ^b	119	NS	**
Ingéré moyen, kg/j	3,1 ^b	3,5 ^a	2,9 ^c	3,7 ^a	2,8 ^c	0,3	*	***
Indice de consommation	2,8 ^b	3,4 ^a	2,9 ^b	3,2 ^b	2,9 ^b	0,3	NS	***

ETR = écart type résiduel ; R = effet régime ; P = Effet durée

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : P>0,05 ; * : P<0,05 ; ** : P<0,01 ; *** : P<0,001

La peroxydation des lipides a été estimée de deux manières. D'une part, par le dosage des TBARS selon la méthode modifiée décrite par Monahan et al. (1992). D'autre part, par le dosage spécifique du malondialdéhyde, basé sur la méthode décrite par Agarwal et Chase (2002), réalisé en collaboration avec l'unité INRA de recherche sur les herbivores de Clermont-Ferrand (63).

2.5.Statistiques

Les données obtenues ont été soumises à des analyses multivariées selon la procédure GLM du logiciel SAS (1989) en prenant en considération l'effet du régime, de la durée de distribution et de leur interaction. Aucune interaction n'ayant été observée, seul l'effet régime et durée de distribution sera rapporté. Le seuil de signification retenu est de 5 %. Un seuil de 10 % est discuté comme une tendance. Lorsque l'effet était significatif, les moyennes sont comparées deux à deux par le test de Bonferroni.

3. RESULTATS

3.1.Performances de croissance

Les résultats des performances de croissance des porcs sont présentés dans le tableau 14.

La durée de distribution des régimes expérimentaux modifie significativement l'ensemble des paramètres zootechniques alors que la nature des AG présents dans l'alimentation a une influence significative uniquement sur la quantité d'aliments ingérés quotidiennement.

Le poids et l'âge des animaux ne sont pas significativement influencés par la nature des AG alimentaires mais le sont par la durée de distribution des régimes expérimentaux ($p < 0,001$). Les porcs nourris sur la période 50-105 kg entrent en expérimentation à un âge moyen de $104,8 \pm 0,5$ j pour un poids moyen de $50,1 \pm 1,6$ kg. Ceux nourris sur la période 80-105 kg entrent plus tardivement dans l'étude expérimentale à un âge et à un âge moyen respectivement de $125,7 \pm 0,5$ j pour $79,0 \pm 1,7$ kg. L'âge et le poids d'abattage des porcs sont influencés par la durée de distribution ($p < 0,001$). Les animaux nourris sur la période 80-105 kg ont un poids moyen d'abattage supérieur à ceux nourris sur la période 50-105 kg, respectivement $112,5 \pm 3,1$ kg contre $105,2 \pm 3,4$ kg. Cette différence de poids des porcs est associée à une différence d'âge. Les animaux nourris sur la période 50-105 kg ont un âge moyen supérieur ($p < 0,001$) à ceux de la période 80-105 kg, respectivement de $160,3 \pm 5,6$ j

Tableau 15. Consommation en AG n-3 et n-6 des porcs charcutiers.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Apport en C18:2 n-6									
Totaux (g)	2498,4 ^b	1960,0 ^c	2741,2 ^a	1248,9 ^d	1872,4 ^c		197,5	***	***
Journalier (g/j)	47,8 ^b	61,6 ^a	49,5 ^b	43,2 ^c	32,2 ^d		3,9	***	***
Apport en C18:3 n-3									
Totaux (g)	199,8 ^c	110,0 ^d	153,9 ^{cd}	857,1 ^b	1285,0 ^a		65,2	***	***
Journalier (g/j)	3,8 ^c	3,5 ^c	2,8 ^c	29,6 ^a	22,1 ^b		1,2	***	***

ETR = écart type résiduel ; R = effet régime ; P = Effet durée

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$;

NS : $P > 0,05$; *** : $P < 0,001$

contre $156,2 \pm 3,5$ j. Ces différences significatives entre les deux durées de distribution sur l'âge et le poids d'abattage des animaux expérimentaux se trouvent être dues au décalage d'une semaine des porcs pour des raisons pratiques de calendrier.

Les animaux élevés sur les mêmes périodes de distribution des régimes ont la même consommation en aliments expérimentaux. Elle est respectivement égale à $110,5 \pm 11,1$ kg contre $160,9 \pm 13,8$ kg pour les périodes 80-105 kg et 50-105 kg (tableau 15). Cette différence de consommation en aliments expérimentaux, entraîne à un apport différent en AG n-6 et n-3 pour les porcs des différents lots expérimentaux. Les porcs recevant les régimes expérimentaux sur la période 50-105 kg ont une consommation totale supérieure en AG n-6 et n-3 par rapport aux porcs élevés sur la période allant de 80 à 105 kg.

Le gain moyen quotidien (GMQ) est égal en moyenne à 995 ± 106 g/j pour les porcs nourris sur la période 50-105 kg contre 1111 ± 143 g/j pour les porcs nourris sur la période 80-105 kg. L'indice de consommation est plus important pour les porcs nourris avec les régimes expérimentaux sur la période 80-105 kg que sur la période 50-105 kg et est, respectivement en moyenne, de $3,3 \pm 0,3$ contre $2,9 \pm 0,3$. L'ingestion moyenne des aliments expérimentaux par les animaux est influencée par la durée de distribution ($p < 0,001$) ainsi que par la nature des AG ($p < 0,05$). La quantité ingérée moyenne est plus élevée pour les porcs élevés sur la période 80-105 kg ($3,3 \pm 0,3$ kg/j) que pour les aux porcs élevés sur la période 50-105 kg ($3,0 \pm 0,3$ kg/j). Les porcs nourris avec l'aliment palme présentent une valeur d'ingéré moyen intermédiaire ($3,1$ kg/j) entre celui des porcs nourris avec un aliment tournesol ou lin.

Les variations des indicateurs zootechniques associées à la durée de distribution étaient des résultats attendus. Selon le stade physiologique du porc, leur capacité à consommer des aliments et à les assimiler n'est pas identique. Ainsi, avec le temps, le porc va absorber plus d'aliment et avoir une croissance plus importante. De ce fait, lorsque les performances de croissance des animaux sont étudiées sur deux périodes différentes (80-105 kg ou 50-105 kg), il y a un effet artificiel qui est mis en évidence.

La nature des AG alimentaires n'influence pas les paramètres zootechniques. Ces résultats ont été montrés par de nombreux auteurs (Bucharles et al., 1987 ; Mourot et al., 1994 ; Romans et al., 1995a et b ; Fontanillas et al. 1997 ; Riley et al., 2000 ; Kouba et al., 2003 ; Haak et al., 2008). Quelques auteurs ont mis en évidence la notion d'une valeur seuil (concentration en AG ainsi que durée de son apport) sous laquelle aucun effet sur les paramètres zootechniques ne peut être observé. Zhan et al. (2009) ont mis en évidence que chez le porc cette valeur seuil correspondait à une durée de distribution de 60 jours des aliments pour une concentration en

Tableau 16. Rendement de découpe et paramètres de la qualité technologique des porcs charcutiers

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	ETR	R	D
Carcasse chaude, kg	86,6 ^b	91,8 ^a	84,2 ^c	90,1 ^a	83,5 ^c		2,7	*	***
Carcasse froide, kg	84,7 ^b	88,4 ^a	82,3 ^c	88,2 ^a	81,6 ^c		2,6	*	***
Perte au ressuage, % du poids de carcasse	2,2	3,6	2,2	2,1	2,1		1,4	NS	NS
Proportion des pièces de découpe de la carcasse gauche									
Jambon, %	24,2	24,5	24,8	23,8	24,5		0,9	NS	NS
Longe, %	27,0	27,3	27,6	26,7	27,1		0,8	NS	NS
Bardière, %	7,3	7,1	6,3	7,0	7,0		0,8	NS	NS
Epaule, %	23,3	23,3	23,1	24,4	23,1		1,6	NS	NS
Poitrine, %	12,1	11,9	11,9	12,0	12,0		0,9	NS	NS
Qualités technologiques de la carcasse gauche									
Épaisseur du tissu adipeux sous cutané du jambon, mm	17,6	14,5	14,3	14,2	13,2		4,3	NS	NS
Épaisseur du tissu adipeux du dos, mm	21,0 ^a	16,7 ^b	16,2 ^b	18,8 ^{ab}	17,5 ^b		3,0	***	NS
Épaisseur du tissu adipeux du cou, mm	35,2 ^a	34,3 ^a	28,9 ^b	37,6 ^a	32,9 ^a		6,2	*	*
Teneur en viande maigre	60,5	61,6	62,5	61,7	62,2		2,2	NS	NS
Qualités technologiques du muscle <i>longissimus dorsi</i>									
pHu à 24h	5,9 ^a	5,5 ^b	5,9 ^a	5,6 ^b	5,9 ^a		0,1	NS	***
L*	55,3 ^{ab}	56,5 ^a	53,6 ^b	55,3 ^{ab}	53,6 ^b		2,1	NS	***
a*	8,1	8,4	7,7	7,2	8,3		1,1	NS	NS
b*	4,6 ^{ab}	5,2 ^a	4,2 ^b	4,3 ^b	4,3 ^b		0,8	NS	*
Perte en eau après 48h, % du poids du muscle	6,5	5,8	5,4	4,4	5,5		2,7	NS	NS
Perte après cuisson, % du poids du muscle	26,6	23,0	24,2	23,2	24,1		3,6	NS	NS

ETR : écart type résiduel ; D : effet durée ; R = effet régime ; pHu : pourcentage d'hydrogène ultime ;

Les moyennes affectées d'une lettre différentes sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : P>0,05 ; * : P<0,05 ; ** : P<0,01 ; *** : P<0,001

graines de lin égale à 5 %. Les bénéfices en termes de paramètres zootechniques lors de la distribution de régime à base de graines de lin sont souvent associés aux éléments intrinsèques de la graines de lin (mucilage ou lipopolysaccharides) plus qu'à la nature des AG (Hall III et al., 2006). Néanmoins, les AG n-3 apportent aussi un bénéfice zootechnique aux animaux. Liu et al. (2003) ont mis en évidence les effets positifs des AG n-3 par un enrichissement de l'alimentation des porcs par de l'huile de poisson. Ainsi, les bénéfices zootechniques qui sont associés à l'introduction de matières premières riches en AG n-3 (sous une certaine dose) dans les régimes, seraient dûs à une action conjuguée du C18:3 n-3 et des éléments intrinsèques des graines (liposaccharides, mucilage). Toutefois, les graines peuvent aussi stocker des facteurs anti-nutritionnels comme des cyanogènes, lesquels, s'ils ne sont pas supprimés, peuvent réduire les performances de croissance des animaux.

Dans le cadre de notre étude, la durée de distribution des aliments la plus longue était de 55,5 jours pour un apport en graines de lin équivalent à 5,2 %. Nous nous trouvons à la limite du seuil proposé par Zhan et al. (2009), d'où l'absence d'effet sur les performances des animaux.

3.2.Paramètres de qualité technologique

3.2.1. Poids des carcasses et pertes au ressuage

Les poids des carcasses des porcs mesurés à chaud, (immédiatement après abattage) ainsi qu'à froid (après 24 h à 4°C) sont significativement influencés par la nature des AG ($p < 0,05$) présents dans l'alimentation ainsi que par la durée de distribution des régimes ($p < 0,001$) (tableau 16). Les animaux nourris sur la période 80-105 kg ont un poids de carcasse chaude significativement supérieur à celui des porcs nourris sur la période 50-105 kg. Les porcs nourris au régime palme ont un poids de carcasse chaude et froide qui présente des valeurs intermédiaires par rapport aux carcasses des porcs nourris avec le régime lin et tournesol.

Les porcs alimentés durant la période 80-105 kg ont été abattus à un poids plus élevé que ceux de la période 50-105 kg (tableau 14). Néanmoins, le poids des porcs nourris avec le régime palme n'était pas significativement différent du poids des porcs nourris au régime tournesol et lin de la période de distribution 50-105 kg contrairement aux observations faites pour le poids de carcasse. La différence est peut être due à un poids de viscère supérieur.

Les pertes au ressuage des carcasses ne sont pas significativement influencées par la nature des régimes ni que par la durée de distribution des régimes conformément aux résultats trouvés par Romans et al (1995a et b) ainsi que par Haak et al. (2008).

3.2.2. Proportion des pièces de découpe des porcs charcutiers

Les différentes pièces de découpe des porcs, pour être comparées d'un lot à l'autre, sont exprimées en proportion par rapport au DERC¹, nivelant ainsi les différences de poids des carcasses observées précédemment.

La nature des AG présents dans l'alimentation ainsi que la durée de distribution des régimes expérimentaux ne modifient pas significativement la proportion des différentes pièces de découpe (tableau 16). D'une manière générale, les auteurs n'associent pas d'effets significatifs entre la nature des AG présents dans l'alimentation des porcs et la proportion des pièces de découpe (Bucharles et al., 1987 ; Miller et al. 1990 ; Myer et al., 1992 ; Mourot et al., 1994 ; Riley et al., 2000 ; Vorin et al., 2003). Il en est de même pour l'absence d'effet associé à l'augmentation de la durée de distribution des régimes aux porcs (Romans et al., 1995a et b ; Haak et al., 2008).

3.2.3. Épaisseur des tissus adipeux sous cutanés et teneur en viande maigre de la carcasse

L'épaisseur des tissus adipeux sous cutanés (TASC), ne semblent pas réagir de manière semblable selon les régimes et les durées de distribution. L'épaisseur du TASC dorsal est significativement influencée par la nature des AG présents dans l'alimentation du porc ($p < 0,001$). Elle est plus importante pour les animaux du lot palme. L'épaisseur du TASC du cou des porcs est significativement influencée par la nature des AG alimentaires ($p < 0,05$) ainsi que par la durée de distribution des régimes aux animaux ($p < 0,05$) alors que l'épaisseur du TASC du jambon des porcs n'est influencé par aucun des deux paramètres. Ces résultats indiquent qu'au sein d'un même tissu (tissu adipeux sous cutané), il existe des particularités selon la localisation du tissu.

Dans le cadre de notre étude, le développement du tissu adipeux et donc des adipocytes qui le constituent de 50 à 105 kg) s'effectue essentiellement par hypertrophie (Anderson et Kauffman, 1973). L'augmentation de la taille des adipocytes s'expliquant par une accumulation de lipides, il apparaît nécessaire de s'intéresser à la voie de la lipogenèse. D'après divers auteurs (Anderson et Kauffman, 1972 ; Mourot et al., 1995b), tous les tissus adipeux n'ont pas le même potentiel en terme d'activité des enzymes de la lipogenèse. Pour résumer, chez le porc, on observe un gradient croissant dans le potentiel de synthèse en allant de la tête vers la queue et de l'extérieur de l'animal vers l'intérieur de sa cavité abdominale (Mourot et al., 1999). Ainsi, le TASC du jambon, en termes d'activités des enzymes de la

¹ DERC = poids de jambon + épaule + poitrine (sans hampe) + longe (sans hampe) + bardière + demie-tête (avec cervelle et langue)

lipogénèse est plus actif que le TASC du dos et que le TASC du cou ce qui se traduit classiquement par une épaisseur plus élevée du TASC du jambon. Cependant, dans notre étude, cela n'est pas vérifié.

La teneur en viande maigre (TVM), en moyenne égale à $61,7 \pm 2,2$, n'est ni influencée par la nature des AG présents dans l'alimentation des porcs, ni par la durée de distribution des régimes. La TVM consiste à faire le ratio entre le muscle et le gras au sein de la carcasse de porc (Daumas et al., 1998), la mesure du gras de couverture est un des paramètres entrant dans le calcul de cet indice, mais pas le seul.

3.2.4. Qualité technologique du muscle *longissimus dorsi*

Le pH ultime (pHu), mesuré après 24h de stockage à 4°C du muscle *longissimus dorsi* (LD) des carcasses de porc, est significativement influencé par la durée de distribution des régimes ($p < 0,001$) aux porcs. L'augmentation de la durée de distribution des régimes alimentaires aux animaux conduit à une augmentation du pHu du muscle LD. A notre connaissance, il n'y a pas d'études sur ce sujet et nous n'avons pas d'hypothèse pour expliquer ces variations.

Les paramètres de couleur ont été mesurés sur le muscle LD des porcs. La luminance L^* du muscle est significativement influencée ($p < 0,001$) par la durée de distribution des régimes aux animaux tout comme l'indice b^* (nuance du jaune au bleu) ($p < 0,05$), chez les porcs recevant le régime tournesol.

D'une manière générale, l'augmentation de la durée de distribution des régimes alimentaires aux porcs contribue à donner un muscle plus clair par rapport à la période de distribution plus courte. La nature du régime alimentaire distribué aux animaux n'induit pas d'effets sur les paramètres de couleur de la viande de porc. Nos données sont en accord avec la bibliographie à ce sujet (Kouba et al., 2003 ; Haak et al., 2008).

Enfin, les pertes en eau du muscle LD des porcs, associées à un stockage pendant 48h à 4°C ou bien à une cuisson ne sont pas significativement différentes selon la nature des AG dans l'alimentation ou bien la durée de distribution des régimes aux animaux.

Après 48 h de stockage à 4°C, le muscle LD perd en moyenne $5,5 \pm 2,7$ % de sa masse fraîche sous forme d'eau. Après cuisson, c'est en moyenne $24,5 \pm 3,6$ % de sa masse fraîche qui est perdue sous forme de perte en eau.

Tableau 17. Teneur en lipides totaux des tissus adipeux, musculaires et du foie des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport à la matière fraîche.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	ETR	R	D
Tissus adipeux									
TA sous cutané dorsal	67,4	65,1	66,9	66,8	68,2		5,0	NS	NS
Panne	70,7	69,5	68,5	73,7	69,6		7,0	NS	NS
TA intermusculaire du jambon	58,6 ^b	59,5 ^b	62,2 ^{ab}	60,0 ^b	65,5 ^a		4,8	*	**
Tissus musculaires									
<i>Longissimus dorsi</i>	1,6	1,7	1,7	1,8	1,6		0,4	NS	NS
<i>Semimembranosus</i>	1,7	2,0	1,7	2,0	2,0		0,5	NS	NS
Foie	3,1	3,1	3,4	3,4	3,3		0,6	NS	NS

ETR : écart type résiduel ; D : effet durée ; R = effet régime ;

Les moyennes affectées d'une lettre différentes sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$;

NS : $P > 0,05$; * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$.

Pour conclure sur les paramètres de la qualité technologique des carcasses des porcs charcutiers, d'une part : la nature des AG présents au sein des régimes n'entraîne pas de baisse de la qualité technologique (l'augmentation de l'épaisseur du TASC du cou et du dos est à nuancer puisque la teneur en viande maigre de la carcasse n'est pas modifiée significativement) ; d'autre part, l'augmentation de la durée de distribution des régimes aux porcs modifie les paramètres de la couleur du muscle LD, notamment en donnant un muscle légèrement plus clair.

3.3.Teneurs en lipides totaux

3.3.1. Teneurs en lipides totaux des tissus

Les teneurs en lipides totaux des tissus des porcs sont différentes d'un tissu à un autre (tissus adipeux, musculaires et hépatique) (tableau 17). Contrairement aux idées reçues, la viande de porc, et plus particulièrement le muscle paré, présente une teneur en lipides très faible puisqu'elle est comprise entre 1,6 et 1,8 % pour le muscle *longissimus dorsi* et entre 1,7 et 2,0 % pour le muscle *semimembranosus* (SM). La masse adipeuse de la carcasse totale est passée de 40 % dans les années 1960 à environ 20 % dans les années 2000 (Chilliard et al., 2008). Cette baisse de l'adiposité totale de la carcasse a entraîné une baisse de la teneur en lipides des tissus adipeux de 10 à 15 % ainsi que celle des muscles, dans une proportion moindre (Chilliard et al., 2008).

La nature des régimes du porc ainsi que leur durée de distribution n'influencent pas la teneur en lipides totaux du TASC du dos, de la panne des muscles LD et SM et ont peu d'influence sur la teneur en lipides du tissu adipeux intermusculaire. Nos résultats sont en accord avec ceux trouvés dans la littérature (Allee et al., 1972 ; St. John et al., 1987 ; Rhee et al., 1988 ; Van Oeckel, et al., 1996 ; Warnants et al., 1996 ; Leskanich et al., 1997 ; Kouba et Mouro, 1999 ; Riley et al., 2000 ; Kouba et al., 2003 ; Haak et al., 2008). La teneur en lipides totaux du TAIJ est influencée à la fois par les régimes et leur durée de distribution.

3.3.2. Teneurs en lipides totaux des produits de transformation

3.3.2.1. *Côtes de porc crues et cuites*

La nature des AG présents dans l'alimentation ainsi que la durée de distribution des régimes aux animaux n'influence pas de manière significative la proportion en lipides totaux des côtes de porc (tableau 18). La cuisson des côtes de porc augmente la proportion en lipides totaux ($p < 0,001$). La cuisson fait passer la proportion moyenne en lipides totaux des côtes crues de

Tableau 18. Teneur en lipides totaux des côtes de porc crues et cuites des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport à la matière fraîche.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques			
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	C
Côte de porc crue	8,7	8,2	8,6	9,7	9,6	1,9	NS	NS	***	
Côte de porc cuite	12,5	11,7	11,8	10,9	12,3	2,1	NS	NS		

C : effet cuisson ; ETR : écart type résiduel ; D : effet durée ; R = effet régime.

NS : P>0,05 ; *** : P<0,001.

Tableau 19. Teneur en lipides totaux des produits de charcuterie (n=5 par lot) des porcs nourris aux régimes lin, tournesol et palme.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
Andouille	18,3	19,0	17,3	1,1	NS
Jambon cru	14,4	14,2	12,5	2,6	NS
Jambon cuit	3,5	4,0	3,4	0,5	NS
Mousse de foie	29,7	26,2	29,8	2,3	NS
Pâté de campagne en terrine	34,4	32,5	31,6	1,4	NS
Pâté de campagne en conserve	30,6 ^b	33,6 ^a	29,7 ^b	2,5	*
Poitrine fumée/salée	19,9 ^b	25,8 ^a	20,1 ^b	2,3	*
Rôti de porc	8,7 ^b	15,7 ^a	5,9 ^b	2,5	*
Saucisse	19,8 ^a	19,7 ^a	16,9 ^b	2,0	*
Saucisse knack	26,4	27,0	27,0	1,4	NS
Saucisson à l'ail	19,1	18,2	19,1	0,5	NS
Saucisson sec	28,3 ^a	26,9 ^b	25,7 ^b	1,6	*

ETR : écart type résiduel ; R = effet régime ;

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : P>0,05 ; * : P<0,05.

9,0 ± 1,9 % à une proportion de 11,9 ± 2,1 % pour les côtes cuites. L'augmentation de la proportion en lipides ne s'explique pas par une augmentation au sens strict de la quantité de ces derniers. Ce sont les pertes en eau causées par la cuisson des côtes de porc qui augmente artificiellement la proportion en lipides.

3.3.2.2. Produits de charcuterie

Les produits de charcuterie élaborés à partir des porcs nourris par les régimes expérimentaux ont des teneurs en lipides totaux différentes (tableau 19). La grande diversité de la teneur en lipides des produits de charcuterie contribue à véhiculer une mauvaise image de la viande de porc (Mourot et al., 2007) alors qu'il existe des produits de charcuterie maigres comme le jambon cuit.

La nature des AG présents dans l'alimentation des animaux n'influence pas la teneur en lipides totaux des produits de charcuterie confectionnés à partir des matières premières carnées : l'andouille, le jambon cru, le jambon cuit, la mousse de foie, le pâté de campagne en terrine, la saucisse knack et le saucisson à l'ail. L'absence d'effet significatif de la nature des régimes distribués aux porcs servant à l'élaboration des produits de charcuterie sur la proportion en lipides totaux confirme les travaux de Specht-Overholt et al. (1997) sur le lard, le bacon, et le Braunschweiger (saucisse à base de foie), et l'étude de D'Arrigo et al. (2004) sur la mousse de foie, et celle d'Hoz et al. (2007) sur le jambon sec.

Par contre, la nature des AG présents dans l'alimentation des porcs qui serviront à l'élaboration des produits de charcuterie tels que le pâté de campagne en conserve, la poitrine fumée / salée, le rôti de porc et la saucisse, influence la teneur en lipide totaux ($p < 0,05$).

D'une manière globale, la proportion des lipides totaux est égale ou inférieure pour les produits de charcuterie issus des animaux nourris au régime lin par rapport au régime palme. Ainsi, pour les produits de charcuterie, dont la proportion en lipides totaux est inférieure à celles des produits du lot palme, issus des animaux ayant été nourris au lin seraient de ce fait plus sains pour la santé puisque moins riches en matière grasse (Mourot et al., 2007).

3.4. Composition en acides gras des tissus des porcs charcutiers

Pour une meilleure lisibilité, seule la composition en AG des différentes familles (saturés, monoinsaturés et polyinsaturés) ainsi qu'en AG majeurs des AGM (C18:1), AGPI n-6 (C18:2 et C20:4) et AGPI n-3 (C18:3, C20:5, C22:5 et C22:6) sera présentée et discutée.

Tableau 20. Composition en acides gras du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,16	1,13	1,14	1,11	1,11	0,08	NS	NS	
C14:1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NS	NS	
C16:0	24,67	23,89	23,51	24,23	23,26	1,09	NS	NS	
C16:1	2,10	1,87	1,93	1,82	1,87	0,22	NS	NS	
C18:0	14,27	13,94	13,53	14,62	14,12	1,28	NS	NS	
C18:1	41,15 ^a	38,83 ^b	38,38 ^b	38,23 ^b	38,67 ^b	1,86	*	NS	
C18:2	13,21 ^b	16,82 ^a	17,97 ^a	13,02 ^b	12,60 ^b	1,50	***	NS	
C20:0	0,31	0,27	0,29	0,28	0,30	0,04	NS	NS	
C18:3	0,81 ^c	0,85 ^c	0,81 ^c	3,98 ^b	5,27 ^a	0,37	***	***	
C20:1	1,05	0,96	0,92	0,95	0,88	0,15	NS	NS	
C20:2	0,67 ^b	0,81 ^a	0,85 ^a	0,63 ^b	0,57 ^b	0,07	***	NS	
C20:3	0,08 ^a	0,09 ^a	0,09 ^a	0,06 ^b	0,05 ^b	0,01	**	NS	
C20:4	0,18 ^b	0,19 ^b	0,24 ^a	0,21 ^{ab}	0,14 ^c	0,04	**	NS	
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,02 ^a	0,03 ^a	0,01	***	**	
C20:5	0,01 ^c	0,02 ^c	0,01 ^c	0,05 ^b	0,08 ^a	0,01	***	NS	
C24:0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	NS	NS	
C24:1	0,09 ^a	0,10 ^a	0,11 ^a	0,07 ^b	0,05 ^b	0,02	***	NS	
C22:5	0,08 ^c	0,08 ^c	0,08 ^c	0,17 ^b	0,21 ^a	0,01	***	**	
C22:6	0,03 ^{ab}	0,02 ^b	0,03 ^{ab}	0,02 ^b	0,05 ^a	0,02	NS	**	
Σ AGS	40,41	39,23	38,47	40,24	38,79	2,06	NS	NS	
Σ AGM	44,40 ^a	41,77 ^b	41,34 ^b	41,09 ^b	41,50 ^b	1,92	***	NS	
Σ AGPI	15,19 ^b	19,00 ^a	20,19 ^a	18,67 ^a	19,71 ^a	1,89	***	NS	
Σ AG n-3	1,01 ^c	1,06 ^c	1,01 ^c	4,28 ^b	5,67 ^a	0,40	***	***	
Σ AG n-6	13,52 ^b	17,12 ^a	18,33 ^a	13,77 ^b	13,47 ^b	1,53	***	NS	
AG n-6/n-3	13,48	16,14	18,27	3,22	2,38				
C18:2 / C18:3	16,42	19,82	22,37	3,28	2,39				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

En guise de préambule, gardons à l'esprit que l'observation de la composition en AG de tissus résulte d'un instantané à un moment *t*. En effet, cette composition est la résultante de plusieurs phénomènes : le dépôt des AG ingérés, la synthèse *de novo* des AG et des triglycérides mais aussi leurs dégradations soit pour le métabolisme énergétique (β -oxydation) ou bien par la peroxydation des lipides.

3.4.1. Composition en acides gras des tissus adipeux

Les compositions en AG du tissu adipeux sous cutané dorsal (TASCD), de la panne et du tissu adipeux intermusculaire du jambon (TAIJ) des porcs ont été mesurées et sont respectivement présentées dans les tableaux 20 ; 21 et 22. Une biopsie du TASC du cou des porcs a été réalisée à 80 kg. La composition en AG de cette dernière est présentée dans le tableau 23.

Les sommes des AG saturés (AGS) des tissus adipeux des porcs ne sont influencées significativement ni par la nature des régimes, ni par la durée de leur distribution. La somme des AGS au sein du TASCD, de la panne et du TAIJ est en moyenne respectivement égale à $39,4 \pm 2,1$ % ; $47,4 \pm 2,0$ % et de $37,9 \pm 3,1$ %. Le régime palme distribué aux animaux était plus riche en AGS que les régimes tournesol et lin (19,6 % de C16:0 contre 13,7 % et 13,3 % pour les régimes tournesol et lin, respectivement). L'absence d'effet du régime semble indiquer que la bonne relation entre la composition des AG alimentaires et celles des AG déposés au sein des tissus des porcs ne serait pas valable pour les AGS. Il faut préciser que les proportions de ces derniers peuvent être modulées par la synthèse *de novo* des lipides. L'acide palmitique (C16:0) est l'acide gras qui sera synthétisé par les enzymes de la voie de la lipogénèse. La possibilité de synthétiser par l'organisme ces AG rendrait ainsi plus difficile toute intervention nutritionnelle en vue d'augmenter la proportion des AG saturés dans la viande de porc, si tant est que cela présente un intérêt nutritionnel car l'AFSSA recommande une diminution de leur consommation (ANC, 2001).

La somme des AG monoinsaturés (AGM) est influencée par la nature des régimes des animaux pour le TASCD ($p < 0,001$) et le TAIJ ($p < 0,05$) des porcs au contraire de la panne où aucun effet statistique n'est observé. La distribution des régimes tournesol et lin aux animaux diminue la proportion des AGM du TASCD et du TAIJ par rapport au régime palme. La diminution de la proportion des AGM au sein du TASCD et du TAIJ s'explique par la diminution de la proportion du C18:1 n-9, AG majeur de la famille des AGM. Différents auteurs ont déjà mis en évidence une telle baisse de la proportion des AGM par la baisse du

Tableau 21. Composition en acides gras de la panne des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
C14:0	1,33	1,30	1,36	1,26	1,28		0.13	NS	NS
C14:1	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00		0.01	NS	NS
C16:0	27,80 ^a	27,34 ^{ab}	27,01 ^{ab}	27,37 ^{ab}	26,56 ^b		1.09	NS	*
C16:1	1,80 ^a	1,63 ^{ab}	1,64 ^{ab}	1,50 ^b	1,50 ^b		0.20	*	NS
C18:0	18,73 ^{ab}	18,10 ^{ab}	17,72 ^b	19,20 ^a	18,96 ^{ab}		1.16	*	NS
C18:1	36,22	32,78	33,05	32,97	32,60		2.55	NS	NS
C18:2	11,38 ^b	15,94 ^a	16,39 ^a	11,69 ^a	11,49 ^a		1.87	**	NS
C20:0	0,29	0,29	0,28	0,28	0,32		0.09	NS	NS
C18:3	0,72 ^c	0,79 ^c	0,73 ^c	3,96 ^b	5,22 ^a		0.54	***	NS
C20:1	0,72	0,69	0,62	0,69	0,63		0.11	NS	NS
C20:2	0,44	0,56	0,55	0,43	0,46		0.14	NS	NS
C20:3	0,06	0,06	0,08	0,06	0,08		0.05	NS	NS
C20:4	0,16 ^b	0,19 ^a	0,21 ^a	0,16 ^b	0,10 ^c		0.02	***	*
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,03 ^a	0,03 ^a		0.01	***	NS
C20:5	0,02 ^c	0,01 ^c	0,03 ^c	0,06 ^b	0,09 ^a		0.01	***	*
C24:0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01		0.01	NS	NS
C24:1	0,08 ^a	0,09 ^a	0,09 ^a	0,06 ^b	0,06 ^b		0.01	***	NS
C22:5	0,08 ^b	0,09 ^b	0,08 ^b	0,17 ^a	0,20 ^a		0.03	***	NS
C22:6	0,04 ^{ab}	0,02 ^b	0,04 ^{ab}	0,03 ^{ab}	0,05 ^a		0.02	NS	*
Σ AGS	48,14	47,03	46,36	48,11	47,13		2.00	NS	NS
Σ AGM	38,84	35,19	35,43	35,25	34,83		2.77	NS	NS
Σ AGPI	13,02	17,78	18,21	16,65	18,04		2.33	NS	NS
Σ AG n-3	0,93 ^c	0,98 ^c	0,96 ^c	4,29 ^b	5,63 ^a		0.51	***	NS
Σ AG n-6	11,65 ^b	16,24 ^a	16,70 ^a	11,93 ^b	11,95 ^b		1.90	**	NS
AG n-6/n-3	12,51	16,73	17,48	2,79	2,11				
C18:2 / C18:3	15,76	20,21	22,45	2,96	2,20				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

C18:1 n-9 (Romans et al., 1995a et b; Specht-Overholt et al., 1997; Matthews et al., 2000). Cette baisse de la proportion de cet AG s'expliquerait par la baisse de l'activité de l'enzyme $\Delta 9$ désaturase, responsable de la synthèse des AGM. Elle est diminuée par la distribution de régimes riches en LA (Kouba et Mourot, 1998) et/ou en ALA (Kouba et al., 2003).

La somme des AG polyinsaturés (AGPI) au sein des tissus adipeux des animaux est significativement influencée par les régimes (TASCD : $p < 0,001$ et TAIJ : $p < 0,01$). La proportion en AGPI de la panne des porcs n'est ni influencée par la nature des régimes, ni par la durée de distribution de ces derniers. La distribution des régimes tournesol et lin aux animaux permet une hausse des AGPI au sein des tissus adipeux par rapport au régime palme. Elle est d'environ 30 % dans le TASCD et de 25 % dans le TAIJ.

La composition du tissu adipeux est un bon reflet de celle de l'alimentation (Mourot et Hermier, 2001). En effet, les AG présents dans l'alimentation sont très rapidement déposés dans les tissus adipeux. Romans et al. (1995b) en faisant ingérer à des porcs un régime composé de 15 % de graines de lin observent une hausse significative de la proportion du C18:3 n-3 dès 7 jours au sein du TASCD, quelles que soient les couches le constituant (extérieure ou intérieure). L'augmentation significative de la proportion des AGPI au sein des tissus adipeux lors de la distribution de ces derniers au travers de l'alimentation des animaux confirme donc les études précédentes menées sur le porc (Romans et al., 1995a et b, Fontanillas et al., 1997 ; Matthews et al., 2000 ; Bee et al., 2008 ; Huang, 2008).

La proportion des AG n-6 totaux au sein des tissus adipeux est significativement influencée par la nature des régimes (TASCD : $p < 0,001$; panne : $p < 0,01$; TAIJ : $p < 0,01$) mais pas par leur durée de distribution à l'exception du TAIJ ($p < 0,031$). La proportion des AG n-6 totaux est augmentée avec le régime tournesol.

Cette hausse de la proportion des AG n-6 totaux au sein des tissus adipeux des porcs nourris au régime tournesol se fait essentiellement au niveau du précurseur C18:2 n-6 (LA) mettant en avant la bonne corrélation entre les AG du régime et les AG déposés. L'augmentation de la durée de distribution du régime tournesol permet une hausse significative du LA seulement au sein du TAIJ.

La proportion du principal dérivé de la famille des AG n-6, l'acide arachidonique C20:4 n-6 (ARA) est significativement influencée dans les trois TA par la nature des régimes distribués aux animaux ($p < 0,001$). La distribution du régime tournesol permet une hausse de la

Tableau 22. Composition en acides gras du tissu adipeux intermusculaire du jambon des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,40	1,33	1,33	1,32	1,27	0,12	NS	NS	
C14:1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	NS	NS	
C16:0	25,09 ^a	24,83 ^a	23,80 ^{ab}	24,05 ^{ab}	23,18 ^b	1,50	*	NS	
C16:1	2,60 ^a	2,21 ^b	2,32 ^b	2,36 ^b	2,19 ^b	0,16	**	NS	
C18:0	12,19	13,20	11,45	12,11	11,84	1,61	NS	NS	
C18:1	36,57 ^a	34,87 ^b	34,58 ^b	35,82 ^{ab}	34,23 ^b	1,40	*	*	
C18:2	18,29 ^b	19,83 ^b	22,76 ^a	18,08 ^b	18,65 ^b	2,31	**	*	
C20:0	0,20	0,21	0,19	0,20	0,19	0,03	NS	NS	
C18:3	1,15 ^c	1,14 ^c	1,11 ^c	4,03 ^b	6,46 ^a	0,38	***	***	
C20:1	0,72	0,68	0,69	0,71	0,67	0,09	NS	NS	
C20:2	0,65	0,70	0,80	0,67	0,63	0,11	NS	NS	
C20:3	0,12	0,13	0,12	0,12	0,09	0,04	NS	NS	
C20:4	0,46 ^a	0,50 ^a	0,47 ^a	0,00 ^b	0,00 ^b	0,04	***	NS	
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,04 ^a	0,04 ^a	0,01	***	NS	
C20:5	0,03 ^c	0,04 ^c	0,03 ^c	0,08 ^b	0,10 ^a	0,01	***	NS	
C24:0	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,02 ^a	0,02	NS	*	
C24:1	0,19	0,13	0,15	0,13	0,09	0,09	NS	NS	
C22:5	0,17	0,12	0,13	0,20	0,26	0,10	NS	NS	
C22:6	0,15	0,05	0,06	0,07	0,09	0,14	NS	NS	
Σ AGS	38,88	39,58	36,77	37,67	36,49	3,07	NS	NS	
Σ AGM	40,09 ^a	37,90 ^b	37,75 ^b	39,08 ^{ab}	37,23 ^b	1,50	*	*	
Σ AGPI	21,03 ^b	22,52 ^{ab}	25,48 ^a	23,25 ^a	26,28 ^a	2,62	**	**	
Σ AG n-3	1,62 ^c	1,48 ^c	1,45 ^c	4,50 ^b	7,00 ^a	0,44	***	***	
Σ AG n-6	18,75 ^b	20,33 ^b	23,23 ^a	18,08 ^b	18,65 ^b	2,33	**	*	
AG n-6/n-3	11,89	13,75	16,08	4,04	2,68				
C18:2 / C18:3	15,88	17,46	20,58	4,51	2,90				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

proportion de ce dernier mettant en avant une activité *de novo* des enzymes désaturases à partir du précurseur. Celle-ci est néanmoins très faible chez les animaux et est estimée à environ 0,1 % (Plourde et Cunnane, 2007). Très peu d'études existent sur ce sujet, ceci pouvant s'expliquer par différentes raisons telles que (i) un apport en précurseur LA qui est abondant dans les pays industrialisés, (ii) les non-végétariens ont un apport abondant en ARA, (iii) un excès des dérivés oxygénés des AG n-6 pourrait augmenter le risque de pathologies dégénératives. Une raison supplémentaire pourrait être le nombre important de réactions nécessaires pour la synthèse de l'ARA. En effet, pas moins de trois réactions enzymatiques successives sont nécessaires pour synthétiser à partir du précurseur l'acide arachidonique : la delta 6 désaturase, une élongase et la delta 5 désaturase. Les étapes de désaturation sont considérées comme limitantes dans la voie de biosynthèse des AGPI à longue chaîne (Sprecher, 2002).

En corolaire à cette hausse de l'ARA dans les TA par la distribution du régime tournesol, le régime lin fait baisser sa proportion. La hausse de l'ARA par la distribution du LA dans l'alimentation, et *a contrario*, la baisse de ce dernier par la distribution d'ALA dans les régimes met en évidence les compétitions qui existent pour la biosynthèse des AGPI à longue chaîne. Les familles d'AG n-6 et n-3 sont en effet en compétition en tant que substrat pour les enzymes désaturases (Cho et al., 1999a et b ; Nakamura et Nara, 2004). Ainsi, l'apport supplémentaire en ALA par le régime lin entraînent une baisse de l'ARA par rapport au régime palme mettrait en évidence l'orientation de la voie de la biosynthèse des AG à longue chaîne en faveur des AG n-3 par rapport aux AG n-6. Ces résultats confirment les travaux de Plourde et Cunnane (2007) mettant en évidence que les AG n-3 constituent le substrat privilégié des enzymes désaturases. L'apport d'ALA a donc orienté la voie de biosynthèse de façon à diminuer les AG n-6 à longue chaîne. On observe les mêmes résultats pour la proportion du C20:3 n-6 au sein des TASCd des porcs.

L'augmentation de la distribution des régimes influence la proportion en ARA au sein de la panne des porcs. C'est par l'augmentation de la distribution du régime lin que l'on observe une baisse de la proportion de l'ARA passant de 0,16 % à 0,10 %. Ces résultats confirment l'hypothèse émise précédemment sur l'orientation possible de la biosynthèse des AGPI à longue chaîne à partir du précurseur LA ou ALA et justifie en partie les recommandations émises par l'AFSSA d'un juste équilibre entre les précurseurs LA et ALA égal à 5.

La proportion des AG n-3 totaux au sein des tissus adipeux est significativement influencée par la nature des régimes mais aussi de leur durée de distribution. L'apport d'AG n-3 au cours de l'alimentation du porc par le régime lin conduit à une hausse de la proportion de ces AG au sein des tissus des animaux soit par dépôt du précurseur, soit par la synthèse *de novo* des dérivés à longue chaîne.

L'augmentation de la proportion de ces AG jugés bons pour la santé, au sein des TA est en grande partie due à l'augmentation du précurseur ALA de 4 ou 5 fois par rapport au régime palme, quel que soit le tissu adipeux. En effet, le régime lin a une teneur en ALA de près de 7 fois plus importante que le régime palme. Une fois ingéré par l'animal, cet AG est absorbé au cours des phases de digestion dans l'intestin grêle et est transporté, via le système circulatoire, vers différents tissus pour y être déposé (Nelson et Ackman, 1988). L'augmentation de la durée de distribution du régime lin aux porcs permet d'avoir une hausse significative de la proportion en ALA au sein des tissus. Ces résultats sont en accord avec la littérature (Romans et al., 1995b ; Fontanillas et al., 1997 ; Leskanich et al., 1997, Matthews et al., 2000 ; Riley et al., 2000 ; Mourot et Hermier, 2001 ; Kouba et al., 2003 ; Raes et al., 2004 ; Chilliard et al., 2008) et confirment que le porc constitue un bon modèle quant à la relation entre les AG ingérés et les acides déposés au sein des tissus.

La distribution du régime lin aux animaux permet d'augmenter la proportion des AG n-3 à longue chaîne. La proportion en acide eicosapentaénoïque (EPA) des TA est plus élevée lorsque les porcs consomment du lin et est d'autant plus importante lorsque sa durée de distribution est augmentée. De la même manière, dans le TASCDC, la consommation du régime lin et l'augmentation de sa durée de distribution augmente la proportion de l'acide docosapentaénoïque (DPA). L'effet durée de distribution n'est plus visible dans la panne alors que dans le TAIJ, le DPA ne varie pas significativement.

Enfin, la proportion en acide docosahexaénoïque (DHA), AG terminal de la série n-3, est influencée par la durée de distribution du régime lin au sein du TASCDC ($p=0,017$). Cette hausse de la proportion du DHA va à l'encontre de nombreux travaux chez le porc (Cunnane et al., 1990 ; Morgan et al., 1992 ; Cherian et Sim, 1995 ; Specht-Overholt et al., 1997 ; Ahn et al., 1996 ; Riley et al., 2000) où la hausse des AG n-3 se limitait au DPA. Néanmoins, quelques auteurs ont trouvé des résultats similaires quant à la hausse du DHA par l'apport d'ALA dans l'alimentation (Enser et al., 2000 ; Huang et al., 2008). Cependant, bien que l'effet soit significatif, il n'est observé que dans un seul tissu et est relativement restreint puisque l'on passe de 0,02 % à 0,05 % lorsque la durée de distribution du régime lin est augmentée.

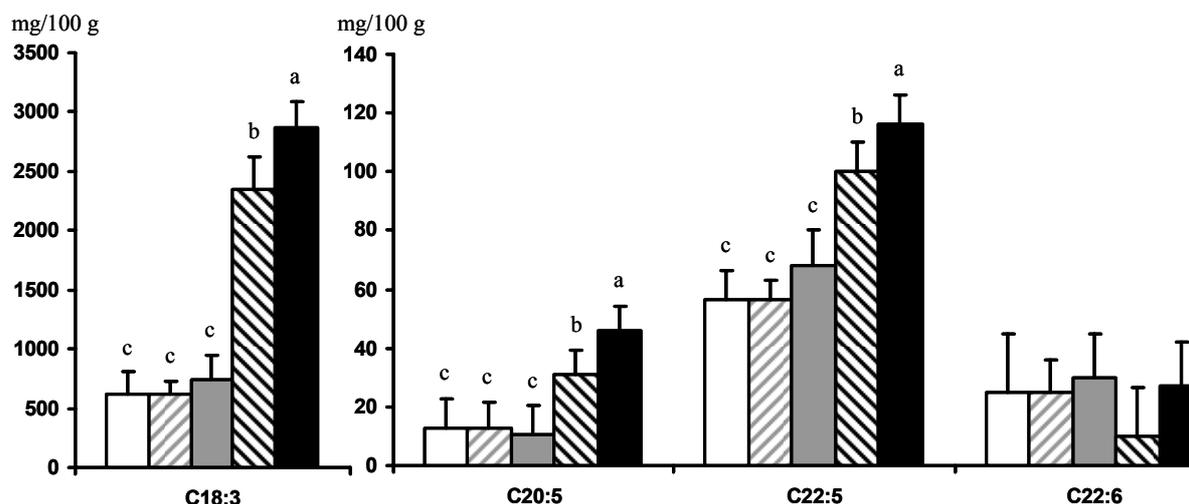


Figure 23. Quantité en mg/100 g des principaux acides gras n-3 du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers. Les lettres identiques indiquent que les valeurs ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 5%.

Régimes : palme □ ; tournesol 80-105 kg ▨ ; tournesol 50-105 kg ▩ ; lin 80-105 kg ▤ ; lin 50-105 kg ■

Tableau 23. Composition en acides gras d'une biopsie à 80 kg de poids vif du tissu adipeux sous cutané du cou des porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

				Statistiques	
	Palme 50-80 kg	Tournesol 50-80 kg	Lin 50-80 kg	ETR	R
C14:0	1,30	1,26	1,23	0,09	NS
C14:1	0,03	0,04	0,04	0,02	NS
C16:0	23,60	22,42	22,03	0,85	NS
C16:1	2,81	2,64	2,48	0,20	NS
C18:0	11,47	10,75	11,20	0,60	NS
C18:1	41,59	39,14	38,54	1,66	NS
C18:2	15,47 ^c	19,84 ^a	16,64 ^b	1,12	***
C20:0	0,23	0,21	0,21	0,02	NS
C18:3	0,98 ^b	1,09 ^b	4,54 ^a	0,19	***
C20:1	0,96	0,87	0,86	0,10	NS
C20:2	0,73	0,83	0,67	0,07	NS
C20:3	0,09	0,10	0,09	0,02	NS
C20:4	0,19 ^b	0,26 ^a	0,18 ^b	0,06	*
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,04 ^a	0,01	***
C20:5	0,00	0,00	0,06	0,28	NS
C24:0	0,01	0,01	0,01	0,03	NS
C24:1	0,11	0,13	0,13	0,29	NS
C22:5	0,11 ^b	0,11 ^b	0,27 ^a	0,12	*
C22:6	0,05	0,05	0,11	0,10	NS
Σ AGS	36,69 ^a	34,73 ^b	34,76 ^b	1,22	*
Σ AGM	45,52 ^a	42,82 ^b	42,08 ^b	1,57	*
Σ AGPI	17,79 ^b	22,44 ^a	23,15 ^a	1,36	***
Σ AG n-6	15,93 ^c	20,36 ^a	17,51 ^b	0,46	***
Σ AG n-3	1,13 ^b	1,25 ^b	4,98 ^a	1,15	***
AG n-6/n-3	14,08	16,36	3,54		
C18:2 / C18:3	15,87	18,29	3,69		

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ; Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ; Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ; NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; *** : p<0,001

Les données de la teneur en AG n-3 (en mg/100g) du TASC D suivent le même schéma que lorsque l'on s'intéressait à leur proportion en pourcentage d'AG identifiés à ceci près que le DHA ne varie plus de manière significative quel que soit les conditions observées (figure 23).

Nos résultats sont intéressants d'un point de vue nutritionnel. En effet, augmenter la proportion des AG à longue chaîne dans les tissus adipeux par l'augmentation de la durée de distribution des régimes expérimentaux aux animaux est doublement intéressant. D'une part puisque ces AG sont les précurseurs des médiateurs oxygénés qui ont un rôle important dans la prévention de bon nombre de pathologies humaines. D'autre part, ces AG à longue chaîne se situent de manière préférentielle dans les membranes des cellules. Celles-ci leur assurent une meilleure protection par rapport aux phénomènes de peroxydation des lipides que s'ils étaient stockés dans la vacuole lipidique. En plus de la composition en AG des tissus adipeux, il faut aussi prendre en compte l'aspect économique. D'une part, l'apport de graines de lin dans l'alimentation des animaux génère un coût. De ce fait, augmenter la durée de distribution de régimes supplémentés en graines de lin augmente le prix de revient de la carcasse du porc. Mais il serait incomplet, lors de ces évocations économiques, de ne pas préciser la plus-value générée par l'enrichissement en AG n-3 des tissus. En effet, lorsque les tissus sont suffisamment enrichis, on peut prétendre à la mention « source en oméga 3 » soit 15 % des ANC (300 mg pour 100 g) ou bien à la mention « riche en oméga 3 » soit 30 % des ANC (600 mg pour 100 g). Ces allégations sont bien valorisées lors de la vente auprès des consommateurs. En final, l'augmentation du prix de revient de la carcasse est presque entièrement compensée par l'augmentation du prix de vente auprès du consommateur.

Les résultats de la composition en AG de la biopsie du TASC du cou réalisée à 80 kg de poids vif sur les porcs sont présentés dans le tableau 23. La nature des AG alimentaires influence significativement la composition en AG du tissu et ceci après seulement un mois d'élevage (50 à 80 kg).

Les proportions en précurseurs des familles des AG n-6 (LA) et des AG n-3 (ALA) sont significativement augmentées lors de la distribution des régimes tournesol et lin, respectivement. Ces résultats confirment la rapidité de l'absorption et de l'assimilation des précurseurs n-6 et n-3. Romans et al. (1995b) voyaient dès 7 jours une augmentation du dépôt du précurseur n-3 dans le cas d'un régime à base de graines de lin.

Tableau 24. Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* (fraction lipides totaux) de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,17	1,18	1,13	1,13	1,14	0,21	NS	NS	
C14:1	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	NS	NS	
C16:0	24,13	24,38	23,82	24,66	23,94	1,07	NS	NS	
C16:1	3,29	3,25	3,22	3,17	3,02	0,39	NS	NS	
C18:0	11,46 ^b	11,82 ^{ab}	11,26 ^b	12,37 ^a	11,86 ^{ab}	0,63	**	*	
C18:1	40,11	41,15	40,20	40,48	39,29	2,61	NS	NS	
C18:2	13,56	12,72	14,50	11,40	12,89	2,64	NS	NS	
C20:0	0,26	0,24	0,24	0,23	0,24	0,02	NS	NS	
C18:3	0,42 ^c	0,37 ^c	0,42 ^c	1,58 ^b	2,28 ^a	0,15	***	***	
C20:1	0,65	0,62	0,70	0,67	0,61	0,11	NS	NS	
C20:2	0,37	0,39	0,45	0,36	0,35	0,04	NS	NS	
C20:3	0,33	0,29	0,29	0,28	0,27	0,09	NS	NS	
C20:4	2,90	2,43	2,65	2,24	2,16	0,82	NS	NS	
C22:1	0,00 ^c	0,00 ^c	0,00 ^c	0,03 ^b	0,06 ^a	0,01	***	**	
C20:5	0,17 ^c	0,13 ^c	0,13 ^c	0,37 ^b	0,65 ^a	0,10	***	**	
C24:0	0,01 ^b	0,06 ^{ab}	-	0,10 ^a	0,04 ^{ab}	0,06	NS	*	
C24:1	0,48 ^a	0,47 ^a	0,47 ^a	0,29 ^{ab}	0,23 ^b	0,21	*	NS	
C22:5	0,42 ^b	0,35 ^b	0,34 ^b	0,49 ^b	0,76 ^a	0,14	**	NS	
C22:6	0,21	0,13	0,15	0,13	0,19	0,07	NS	NS	
Σ AGS	37,05	37,66	36,45	38,49	37,22	1,67	NS	NS	
Σ AGM	44,55	45,52	44,62	44,66	43,22	2,76	NS	NS	
Σ AGPI	18,39	16,81	18,93	16,85	19,56	3,83	NS	NS	
Σ AG n-3	1,56 ^c	1,28 ^c	1,33 ^c	2,85 ^b	4,16 ^a	0,43	***	**	
Σ AG n-6	16,46	15,14	17,14	13,64	15,05	3,43	NS	NS	
AG n-6/n-3	10,66	11,86	13,01	4,90	3,62				
C18:2 / C18:3	32,07	34,65	34,90	7,29	5,65				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Les proportions des dérivés à longue chaîne sont augmentées pour certains AG. Dans la série des AG n-6, la proportion en ARA est augmentée significativement lors de la distribution du régime tournesol. Dans la série des AG n-3, seule la proportion du DPA est augmentée de manière significative lors de la distribution du régime lin. Les proportions de l'EPA et du DHA ne sont pas influencées par la nature du régime pour ce tissu adipeux à ce stade de croissance.

Nos résultats montrent qu'avec une durée de distribution courte (environ 1 mois) et sur la période d'élevage 50-80 kg, l'animal arrive à mettre en place une synthèse *de novo* des AG à longue chaîne. Selon la quantité des AG n-3 des régimes distribués aux animaux, la réponse en terme de synthèse des AG à longue chaîne est variable. Lors de l'étude menée par Romans et al. (1995b), avec une distribution de régimes enrichis à 15 % de graines de lin, la proportion des dérivés à longue chaîne des AG n-3 était augmentée de manière significative qu'après une distribution de 14 jours. Nos résultats montrent des résultats similaires, à l'exception de l'EPA et du DHA, mais pour une période de distribution d'un mois. La différence en terme de composition en AG peut venir de la quantité d'AG n-3 distribuée aux animaux plus faible dans notre étude (4,2 % contre 15 %).

3.4.2. Composition en acides gras des tissus musculaires

3.4.2.1. *Composition en acides gras des lipides totaux des muscles*

Les compositions en AG des muscles *longissimus dorsi* et *semimembranosus* des porcs sont respectivement présentées dans les tableaux 24 et 25.

Au sein des muscles *longissimus dorsi* et *semimembranosus* la nature des AG ainsi que la durée de distribution des régimes n'influencent pas de manière significative la proportion de la somme des AG saturés, monoinsaturés et polyinsaturés à l'exception de la somme des AGS dont la proportion diminue avec l'augmentation de la durée de distribution des régimes dans le muscle *semimembranosus*. Ces résultats sont contradictoires avec les effets observés précédemment sur les différents tissus adipeux. Au sein de ces derniers, les familles d'AG étaient d'une manière globale significativement modifiées par la nature des AG présents dans l'alimentation. La composition en AG est relativement équivalente dans les deux muscles étudiés. Ces valeurs sont communément trouvées pour le porc à ce stade d'élevage (Riley et al., 2000 ; Vorin et al., 2003 ; Wilfart et al., 2004a ; Haak et al., 2008 ; Mourot, 2009). La proportion en AG n-6 totaux des muscles n'est pas influencée par les régimes alloués aux porcs ainsi que par leur durée de distribution, au contraire de la proportion des AG n-3 au sein des muscles qui est statistiquement influencée par les régimes ainsi que par la durée de

Tableau 25. Composition en acides gras du muscle *semimembranosus* de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,08	1,16	1,06	1,12	1,06	0,13	NS	NS	
C14:1	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	NS	NS	
C16:0	22,91 ^{ab}	23,49 ^a	22,37 ^b	23,32 ^a	22,34 ^b	0,88	NS	***	
C16:1	3,39	3,28	3,30	3,12	3,16	0,35	NS	NS	
C18:0	10,17 ^b	10,87 ^{ab}	9,89 ^b	11,22 ^a	10,31 ^b	0,58	NS	***	
C18:1	41,23	40,24	40,40	40,29	41,41	2,54	NS	NS	
C18:2	14,74	14,88	16,70	13,30	13,63	2,39	NS	NS	
C20:0	0,23	0,28	0,22	0,23	0,21	0,03	NS	NS	
C18:3	0,49 ^c	0,58 ^c	0,51 ^c	1,96 ^b	2,54 ^a	0,16	***	***	
C20:1	0,63	0,68	0,67	0,68	0,66	0,10	NS	NS	
C20:2	0,40	0,47	0,49	0,44	0,39	0,05	NS	NS	
C20:3	0,32	0,35	0,29	0,31	0,24	0,10	NS	NS	
C20:4	3,06	2,62	2,96	2,45	2,16	0,82	NS	NS	
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,05 ^a	0,05 ^a	0,01	***	NS	
C20:5	0,23 ^b	0,19 ^b	0,16 ^b	0,47 ^a	0,64 ^a	0,16	***	NS	
C24:0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	NS	NS	
C24:1	0,47 ^a	0,40 ^a	0,42 ^a	0,29 ^b	0,23 ^b	0,11	**	NS	
C22:5	0,43 ^{ab}	0,35 ^b	0,36 ^b	0,57 ^a	0,74 ^a	0,18	**	NS	
C22:6	0,20	0,13	0,17	0,16	0,19	0,06	NS	NS	
Σ AGS	34,39 ^a	35,80 ^a	33,54 ^b	35,90 ^a	33,93 ^b	1,34	NS	***	
Σ AGM	45,75	44,62	44,81	44,44	45,53	2,67	NS	NS	
Σ AGPI	19,86	19,58	21,66	19,66	20,53	3,50	NS	NS	
Σ AG n-3	1,66 ^c	1,60 ^c	1,50 ^c	3,47 ^b	4,36 ^a	0,42	***	NS	
Σ AG n-6	17,80	17,50	19,66	15,75	15,79	3,12	NS	NS	
AG n-6/n-3	10,71	11,09	13,14	4,52	3,62				
C18:2 / C18:3	30,63	26,30	33,54	6,83	5,38				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

distribution du régime lin. Ces variations sont dues d'une part à l'augmentation significative de l'ALA par la distribution de régimes lin ($p < 0,001$) et l'augmentation de la durée de sa distribution ($p < 0,001$). Au sein des muscles, la proportion en ALA est augmentée de 4 à 5 fois avec le régime lin par rapport au régime palme. Cette hausse de la proportion du précurseur au sein des muscles est accompagnée par celle de la proportion des dérivés à longue chaîne à l'exception du DHA.

Les données des teneurs des différents AG n-3 du muscle LD sont similaires à celles observées pour leur proportion (figure 24)

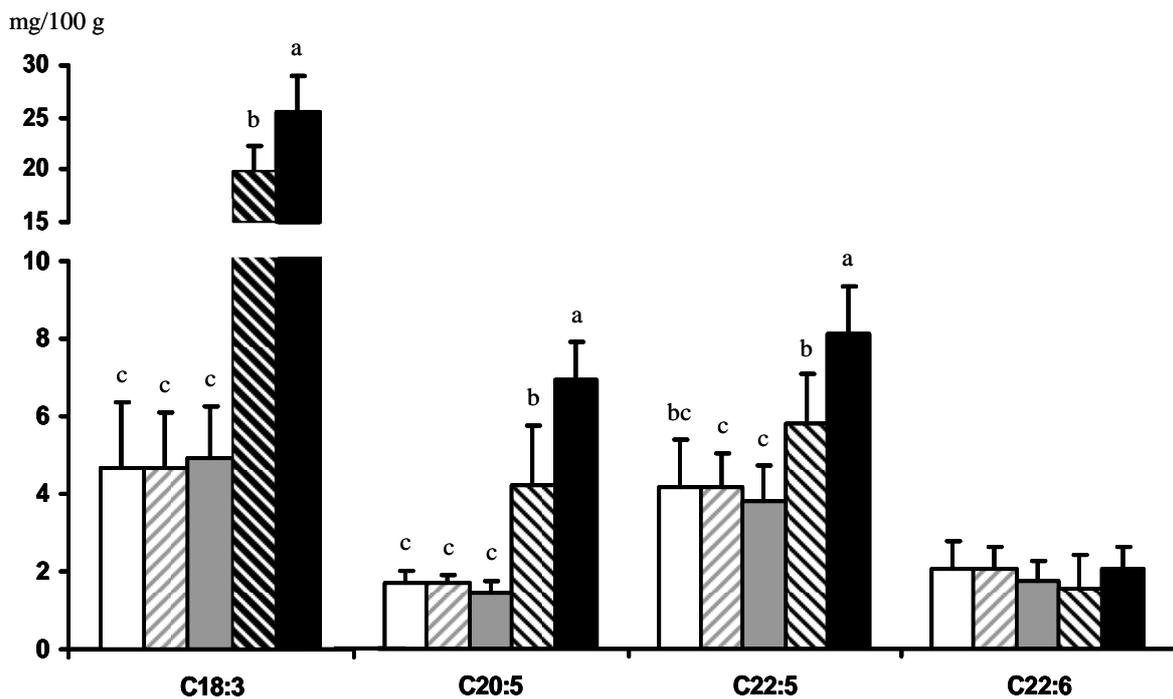


Figure 24. Quantité en mg/100 g des principaux acides gras n-3 du muscle *longissimus dorsi* des porcs charcutiers. Les lettres identiques indiquent que les valeurs ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 5%.

Régimes : palme □ ; tournesol 80-105 kg ▨ ; tournesol 50-105 kg ▩ ; lin 80-105 kg ▤ ; lin 50-105 kg ■

3.4.2.2. Muscle *longissimus dorsi* - lipides neutres et polaires

Les compositions en AG des lipides neutres et polaires du muscle *longissimus dorsi* sont présentées respectivement dans les tableaux 26 et 27.

Les proportions des familles d'AG monoinsaturés et polyinsaturés au sein des lipides neutres du muscle LD des porcs ne sont pas significativement influencées par la nature des régimes ainsi que par la durée de leur distribution. La proportion en AGS des lipides neutres du muscle LD des porcs est plus forte dans le cas d'une durée de distribution courte (80-105 kg) et est plus faible pour une distribution plus longue (50-105 kg) avec le régime lin.

Tableau 26. Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* (fraction lipides neutres) de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,49	1,33	1,39	1,38	1,46	0,22	NS	NS	
C14:1	0,07	0,06	0,09	0,07	0,10	0,05	NS	NS	
C16:0	25,56 ^{ab}	25,57 ^{ab}	25,00 ^{ab}	25,83 ^a	24,74 ^b	0,89	NS	**	
C16:1	4,19	3,98	4,13	3,77	3,98	0,33	NS	NS	
C18:0	11,53 ^{ab}	11,99 ^a	11,14 ^b	12,43 ^a	11,32 ^b	0,86	NS	***	
C18:1	48,11	47,44	48,27	46,99	47,38	1,46	NS	NS	
C18:2	6,55	7,21	7,31	6,49	6,60	1,44	NS	NS	
C20:0	0,25 ^b	0,22 ^b	0,24 ^b	0,23 ^b	0,31 ^a	0,04	*	***	
C18:3	0,29 ^c	0,34 ^c	0,30 ^c	1,00 ^b	1,63 ^a	0,19	***	***	
C20:1	0,92 ^a	0,78 ^b	0,90 ^a	0,80 ^b	0,88 ^{ab}	0,11	NS	**	
C20:2	0,42	0,31	0,39	0,29	0,36	0,12	NS	NS	
C20:3	0,07	0,10	0,09	0,08	0,05	0,05	NS	NS	
C20:4	0,52	0,58	0,52	0,54	0,67	0,26	NS	NS	
C22:1	ND	ND	ND	ND	ND	-	-	-	
C20:5	0,12	0,07	0,08	0,15	0,23	0,08	NS	NS	
C24:0	ND	ND	ND	ND	ND	-	-	-	
C24:1	0,23	0,19	0,15	0,18	0,13	0,11	NS	NS	
C22:5	0,12 ^b	0,13 ^b	0,11 ^b	0,16 ^b	0,36 ^a	0,11	***	*	
C22:6	0,05	ND	0,04	0,15	0,32	0,41	NS	NS	
Σ AGS	38,80 ^{ab}	39,12 ^{ab}	37,80 ^b	39,84 ^a	37,79 ^b	1,56	NS	**	
Σ AGM	53,42	52,36	53,50	51,71	52,37	1,57	NS	NS	
Σ AGPI	7,78	8,52	8,70	8,45	9,83	1,90	NS	NS	
Σ AG n-3	0,44 ^c	0,48 ^c	0,49 ^c	1,22 ^b	2,27 ^a	0,30	***	***	
Σ AG n-6	6,96	7,73	7,82	6,98	7,20	0,17	NS	NS	
AG n-6/n-3	14,55	15,06	18,25	14,07	10,86				
C18:2 / C18:3	17,77	16,28	16,59	5,97	3,22				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

La nature des régimes ainsi que la durée de leur distribution n'influence pas les proportions en AGS, AGM et AGPI des lipides polaires.

Nos résultats montrent que les fractions neutre et polaire des lipides ont une composition en AG complètement différente. En effet, les lipides polaires sont beaucoup plus riches en AGPI que les lipides neutres (Cook et Spence, 1987 ; Chow, 1992 ; Romans et al., 1995b ; Warnants et al. 1999 ; Kouba et al., 2003). Les lipides polaires correspondent aux phospholipides qui sont les constituants principaux des membranes plasmiques. La richesse en AGPI est nécessaire pour un bon fonctionnement de ces dernières. Les AGPI, ayant un point de fusion supérieur aux autres familles d'AG, procurent aux membranes plasmiques une meilleure fluidité permettant aussi de meilleurs échanges avec le milieu environnant avec le bon fonctionnement des protéines membranaires. Les lipides neutres, à savoir les triglycérides, sont eux stockés au sein des vacuoles lipidiques. Celles-ci sont riches en C18:1 n-9 mais aussi en AGS (Bee et al., 2002)..

La proportion en AG n-6 des lipides neutres du muscle LD n'est significativement influencée ni par la nature des régimes reçus par les porcs au cours de leur alimentation, ni par la durée de distribution de ces régimes. Par contre, la proportion des AG n-6 des lipides polaires est plus importante avec l'augmentation de la durée de distribution du régime lin. Ces résultats sont étonnants puisque la composition des lipides neutres en AG n-6, même avec le régime tournesol, ne varie pas.

Les proportions des AG n-3 des lipides neutres et polaires du muscle LD sont influencées par le régime ainsi que par la durée de distribution du régime lin. Au sein des lipides neutres, les proportions en ALA et en DPA sont significativement augmentées par le régime lin ainsi que par leur durée de distribution, contrairement à l'EPA dont la proportion ne varie pas. La proportion de DHA dans les lipides neutre du muscle LD ne varie pas.

Au sein des lipides polaires du muscle LD, les proportions en ALA ainsi que de l'EPA et du DPA sont statistiquement augmentées ($p < 0,001$) par la distribution de régime lin. La proportion en DHA tend ($p = 0,063$) à être augmentée par la distribution du régime lin. L'augmentation de la durée de distribution des régimes permet l'augmentation significative de l'ALA ($p < 0,01$) ainsi que de l'EPA ($p < 0,001$) et du DPA ($p < 0,001$). La proportion du DHA ($p = 0,117$) ne varie pas significativement.

L'augmentation de la proportion des AG n-3 se fait de la même manière que pour les AG de l'ensemble de la fraction des lipides (Romans et al., 1995a et b ; Enser et al., 2000 ; Riley et al., 2000 ; Kouba et al., 2003). L'augmentation de la proportion des AG se fait de manière plus importante pour les lipides polaires constitutifs des membranes. En effet, la membrane

Tableau 27. Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* (fraction lipides polaires) de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	0,36	0,41	0,60	0,55	0,27	0,50	NS	NS	
C14:1	0,23	0,11	0,21	0,20	0,19	0,15	NS	NS	
C16:0	24,26	22,28	23,70	24,40	22,83	3,51	NS	NS	
C16:1	1,30	1,39	1,37	1,53	1,33	0,59	NS	NS	
C18:0	14,26	14,27	14,14	15,57	13,78	2,51	NS	NS	
C18:1	16,73	16,65	16,15	16,99	14,66	3,32	NS	NS	
C18:2	29,07	30,91	30,92	26,23	30,73	6,27	NS	NS	
C20:0	0,34	0,29	0,36	0,27	0,33	0,09	NS	NS	
C18:3	0,71 ^c	0,39 ^c	0,37 ^c	1,79 ^b	2,94 ^a	0,54	***	***	
C20:1	0,30	0,29	0,31	0,36	0,35	0,09	NS	NS	
C20:2	1,00	0,73	0,72	1,08	0,57	0,57	NS	NS	
C20:3	0,76	0,99	0,87	0,76	0,79	0,31	NS	NS	
C20:4	6,49	8,64	6,71	6,31	5,88	3,00	NS	NS	
C22:1	0,20	ND	0,19	0,21	0,18	0,05	NS	NS	
C20:5	0,91 ^b	0,32 ^c	0,71 ^{bc}	0,77 ^{bc}	1,74 ^a	0,51	***	***	
C24:0	1,92	0,53	1,50	1,71	0,82	1,15	NS	NS	
C24:1	0,98 ^{ab}	1,36 ^a	1,15 ^{ab}	0,81 ^b	0,64 ^b	0,40	**	NS	
C22:5	1,11 ^b	1,20 ^b	0,70 ^b	1,36 ^b	2,27 ^a	0,75	**	NS	
C22:6	0,34	0,27	0,32	0,36	0,53	0,17	NS	NS	
Σ AGS	40,12	37,30	39,76	41,76	37,59	6,65	NS	NS	
Σ AGM	19,55	19,54	19,21	19,80	17,09	3,58	NS	NS	
Σ AGPI	40,33	43,16	41,03	38,44	45,32	9,81	NS	NS	
Σ AG n-3	3,76 ^{bc}	2,89 ^c	2,68 ^c	4,83 ^b	8,14 ^a	1,80	***	*	
Σ AG n-6	35,56 ^b	39,54 ^a	37,63 ^{ab}	32,53 ^c	36,62 ^b	1,86	**	NS	
AG n-6/n-3	5,81	3,81	6,56	4,89	5,95				
C18:2 / C18:3	10,74	15,19	14,23	7,36	4,72				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

phospholipidique incorpore les AG à longue chaîne de manière sélective par rapport à la vacuole lipidique (Hertzman et al., 1988) et a une affinité plus grande pour les AG avec un nombre de carbones important C20-C22.

3.4.3. Composition en acides gras du foie

La proportion des AGS (tableau 28) au sein des foies des porcs est statistiquement influencée par la nature des régimes ($p=0,004$) ainsi que par la durée de distribution ($p=0,011$). La distribution des régimes tournesol et lin diminue la proportion des AGS au sein des foies des porcs. Pour une même période de distribution, les animaux du lot palme ont 42,05 % d'AGS contre 40,84 et 41,45 % pour les lots tournesol et lin, respectivement. C'est la richesse en AGPI des régimes qui va participer aux dépôts de ces derniers au sein du foie et ainsi participer à la baisse de la proportion des AGS. L'augmentation de la durée de distribution des régimes permet de diminuer la proportion en AGS au sein des foies. La proportion des AGS au sein des foies des porcs est plus importante dans la période d'élevage 80-105 kg par rapport à une durée de distribution plus longue allant de 50 à 105 kg. La baisse de la proportion en AGS au sein des foies peut s'expliquer de deux manières :

- La première serait d'envisager que les régimes distribués aux animaux préalablement à l'étude expérimentale étaient plus riches en proportion en AGS que ne l'est le régime palme de l'étude. Ainsi, cela expliquerait pourquoi la proportion des AGS dans les foies diminue avec l'augmentation de la durée de distribution.
- Une autre explication serait d'envisager que la synthèse *de novo* des lipides est significativement diminuée au sein des foies des porcs. L'AG synthétisé suite à la lipogénèse est l'acide palmitique (C16:0), un AG saturé. Ainsi, une baisse des activités des enzymes de la lipogénèse, telle que celle de l'enzyme terminale de la voie de la lipogénèse (synthase des acides gras, FAS), conduisant à la synthèse de C16:0, est à envisager. Néanmoins, chez le porc, le foie ne constitue pas un site majeur dans le métabolisme des lipides face aux tissus adipeux (Mourot et al., 1999)

La proportion des classes d'AG monoinsaturés des foies des porcs est diminuée lors de la distribution de régimes riches en AGPI. La proportion est diminuée que ce soit dans le cas de la distribution du régime à base de tournesol, conformément à Kouba et Mourot (1998), mais aussi, et d'une manière plus importante, lors de la distribution du régime lin, conformément aux résultats de Kouba et al. (2003).

Enfin, la proportion des AG polyinsaturés des foies des porcs est augmentée lors de la distribution de régimes riches en ces derniers par rapport au régime palme.

Tableau 28. Composition en acides gras du foie de porcs charcutiers. Résultats exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	0,40 ^a	0,32 ^b	0,44 ^a	0,36 ^{ab}	0,39 ^{ab}	0,10	*	*	
C14:1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	NS	NS	
C16:0	15,95 ^a	14,68 ^b	15,87 ^a	14,76 ^b	14,66 ^b	1,01	NS	*	
C16:1	1,11 ^a	0,78 ^b	0,95 ^{ab}	0,80 ^b	0,79 ^{ab}	0,28	NS	*	
C18:0	25,26 ^{ab}	26,75 ^{ab}	24,10 ^b	27,05 ^a	26,11 ^{ab}	1,89	*	**	
C18:1	16,96	14,98	16,46	15,02	14,81	1,78	NS	NS	
C18:2	15,66 ^c	17,47 ^b	18,70 ^a	17,09 ^b	17,46 ^b	1,12	***	NS	
C20:0	0,41 ^a	0,33 ^{ab}	0,41 ^a	0,24 ^b	0,26 ^b	0,09	NS	*	
C18:3	0,45 ^c	0,64 ^c	0,50 ^c	2,37 ^b	3,40 ^a	0,51	***	NS	
C20:1	0,28	0,27	0,26	0,28	0,28	0,03	NS	NS	
C20:2	0,41	0,48	0,49	0,44	0,40	0,07	NS	NS	
C20:3	0,51 ^{bc}	0,54 ^b	0,42 ^c	0,68 ^a	0,58 ^{ab}	0,11	*	**	
C20:4	17,53 ^a	17,47 ^a	17,06 ^a	11,78 ^b	11,10 ^b	2,04	***	NS	
C22:1	0,01 ^b	0,04 ^b	0,01 ^b	0,10 ^a	0,09 ^a	0,04	*	*	
C20:5	0,54 ^b	1,01 ^b	0,37 ^b	4,16 ^a	4,72 ^a	1,18	***	NS	
C24:0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	NS	NS	
C24:1	1,01 ^a	1,16 ^a	1,07 ^a	0,39 ^b	0,26 ^b	0,22	***	NS	
C22:5	2,06 ^{bc}	2,12 ^b	1,66 ^c	3,50 ^a	3,45 ^a	0,42	***	*	
C22:6	1,42	0,91	1,21	0,95	1,20	0,32	NS	NS	
Σ AGS	42,05 ^{ab}	42,12 ^{ab}	40,84 ^c	42,45 ^a	41,45 ^{bc}	0,90	**	*	
Σ AGM	19,38 ^a	17,23 ^b	18,76 ^{ab}	16,59 ^b	16,24 ^b	1,88	*	*	
Σ AGPI	38,57 ^c	40,65 ^b	40,40 ^b	40,97 ^{ab}	42,31 ^a	1,33	*	NS	
Σ AG n-3	4,98 ^b	5,23 ^b	4,15 ^b	11,65 ^a	13,35 ^a	1,83	***	NS	
Σ AG n-6	33,19 ^b	34,95 ^a	35,76 ^a	28,87 ^c	28,56 ^c	1,92	***	NS	
AG n-6/n-3	6,70	7,62	8,65	2,48	2,15				
C18:2 / C18:3	37,28	39,94	41,48	7,31	5,40				

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

La proportion des AG n-6 totaux des foies des porcs est augmentée par la distribution du régime tournesol. La proportion du LA des foies des porcs est augmentée ($p=0,001$) de 3 points avec le régime tournesol par rapport au régime palme. La proportion de l'acide arachidonique est elle aussi influencée par la nature des AG présents dans l'alimentation ($p<0,001$) passant d'un niveau moyen de 17 % dans les foies des animaux nourris à l'aliment palme ou tournesol à une proportion moyenne de 11 % dans les foies des animaux nourris au régime lin. Cette baisse de la proportion s'explique par une compétition des dérivés à longue chaîne au niveau de la membrane phospholipidique. En effet, les AG n-3 entrent en compétition avec l'acide arachidonique pour être intégrés au niveau de la membrane plasmique (Enser et al., 2000).

La proportion des AG n-3 au sein des foies des porcs est augmentée : ALA ($p<0,0001$) EPA ($p<0,001$) et DPA ($p<0,001$) avec le régime lin. La proportion en DHA des foies des porcs, comme dans les autres tissus n'est pas augmentée, comme montré par Riley et al. (2000). Ainsi, on peut émettre comme hypothèse que l'augmentation de la proportion des AG n-3 dans les foies des porcs viendrait compenser la baisse de la proportion en ARA au niveau des membranes plasmiques.

3.4.4. Composition en acides gras des côtes de porc

Les côtes de porc sont constituées d'un assemblage de tissus musculaires, adipeux et osseux. Dans le cas de notre étude, les côtes prélevées étant des côtes premières, le muscle correspond au muscle *longissimus dorsi* et le gras de parage correspond au tissu adipeux sous cutané dorsal. Les proportions des tissus musculaires et adipeux peuvent être estimées et correspondent globalement à 90 / 10, respectivement. La composition en AG des côtes de porc sera donc le reflet de la composition en AG des tissus musculaires et adipeux.

Les résultats des côtes de porc crues et cuites sont présentées respectivement dans les tableaux 29 et 30.

La composition en AG des sommes des AG saturés, monoinsaturés et polyinsaturés des côtes de porc crues et cuites est influencée par les régimes alimentaires et par leur distribution. La nature des régimes influence de manière significative la somme des AG monoinsaturés et polyinsaturés ($p<0,001$) sans affecter celle des AG saturés. La distribution des régimes tournesol et lin diminue la proportion en AGM au sein des côtes de porc alors qu'elle permet l'augmentation de la proportion en AGPI. A l'effet régime mis en évidence sur la somme des AG monoinsaturés et polyinsaturés, il peut se cumuler un effet durée de distribution des

Tableau 29. Composition en acides gras des côtes de porc crues des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,28 ^{bc}	1,71 ^a	1,25 ^{bc}	1,56 ^{ac}	1,24 ^b	0,35		***	
C14:1	0,02 ^b	0,05 ^a	0,03 ^b	0,03 ^a	0,02 ^b	0,02		*	
C16:0	25,37 ^a	25,47 ^a	24,48 ^b	25,57 ^a	24,36 ^b	0,85		***	
C16:1	2,59	2,52	2,34	2,41	2,30	0,25			
C18:0	13,66	13,50	13,27	13,97	14,03	0,98			
C18:1	42,03 ^a	39,63 ^b	39,25 ^b	39,51 ^b	39,49 ^b	1,84	**		
C18:2	11,57 ^c	13,49 ^b	15,83 ^a	11,18 ^c	11,55 ^c	1,17	***	***	
C20:0	0,26	0,24	0,25	0,22	0,25	0,03			
C18:3	0,65 ^c	0,60 ^c	0,66 ^c	2,90 ^b	4,16 ^a	0,20	***	***	
C20:1	0,92	0,86	0,85	0,90	0,84	0,10			
C20:2	0,49 ^{bc}	0,54 ^b	0,64 ^a	0,45 ^c	0,45 ^c	0,05	***	**	
C20:3	0,10 ^{ac}	0,12 ^a	0,10 ^{ac}	0,08 ^{bc}	0,07 ^b	0,04	**		
C20:4	0,61	0,70	0,65	0,43	0,62	0,24			
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,02 ^b	0,03 ^b	0,01	***	***	
C20:5	0,04 ^c	0,02 ^c	0,02 ^c	0,08 ^b	0,12 ^a	0,03	***	*	
C24:0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01			
C24:1	0,15 ^a	0,15 ^{ab}	0,16 ^a	0,20 ^a	0,07 ^b	0,08		*	
C22:5	0,12 ^b	0,14 ^b	0,11 ^b	0,26 ^a	0,27 ^a	0,06	***		
C22:6	0,06 ^a	0,02 ^b	0,04 ^{ab}	0,04 ^{ab}	0,06 ^a	0,03		*	
Σ AGS	40,67 ^{ab}	41,16 ^{ac}	39,33 ^b	41,51 ^a	39,96 ^{bc}	1,52		***	
Σ AGM	45,70 ^a	43,21 ^b	42,61 ^b	43,06 ^b	42,75 ^b	1,96	***		
Σ AGPI	13,63 ^c	15,62 ^b	18,05 ^a	15,42 ^b	17,29 ^a	1,32	***	***	
Σ AG n-6	12,27 ^c	14,31 ^b	16,58 ^a	11,69 ^c	12,24 ^c	1,15	***	***	
Σ AG n-3	0,86 ^c	0,78 ^c	0,83 ^c	3,28 ^b	4,60 ^a	0,25	***	***	
AG n-6/n-3	14,31	18,48	19,96	3,59	2,66	1,07			
C18:2/C18:3	17,86	22,70	24,07	3,87	2,78	1,09			

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

régimes. Celle-ci influence de manière significative la somme des AG saturés ($p < 0,05$) et polyinsaturés ($p < 0,001$). L'augmentation de la durée distribution des régimes tournesol et lin diminue la proportion des AG saturés au profit des AG polyinsaturés au sein des côtes de porc.

La composition en AG de la côte de porc répond aux mêmes effets mis en évidence pour le TASCDC et le LD. Il est à nouveau mis en évidence d'une part l'effet inhibiteur des AG polyinsaturés alimentaires sur la synthèse des AG monoinsaturés au sein des tissus (Kouba et Mourot, 1998 ; Kouba et al., 2003), et d'autre part, la bonne relation entre les AG alimentaires et les AG déposés (Mourot et Hermier, 2001) au sein des tissus, par l'augmentation des AG polyinsaturés lors de la distribution des régimes tournesol et lin.

De la même manière que pour les proportions des différentes familles d'AG, les principaux AG constitutifs des séries n-6 et n-3, ont le même type de réponse face à la nature des AG alimentaires et à leur durée de distribution.

La somme des AG n-6 est significativement influencée par la nature des régimes ($p < 0,001$) et leur durée de distribution (côte crue : $p < 0,001$; côte cuite : $p < 0,05$). La distribution du régime tournesol permet une hausse significative des AG n-6 totaux face aux régimes palme et lin. L'augmentation de la distribution de ce dernier confirme cet effet en mettant en évidence une proportion supérieure en AG n-6 totaux pour la période de distribution longue (50-105 kg) face à la période de distribution courte (80-105 kg). Cette hausse des AG n-6 totaux s'explique par l'augmentation du LA. La proportion en ARA n'est significativement influencée ni par la nature des régimes ni par leur durée de distribution. Ces résultats, quant à la proportion de l'ARA, sont similaires à ceux trouvés pour le LD mais sont différents de ceux du TASCDC. La partie « maigre » de la côte de porc aurait plus d'influence sur les teneurs en AG que la partie « grasse », respectivement représentées par le muscle LD et le TASCDC.

La proportion en AG n-3 totaux des côtes de porc crues et cuites est significativement influencée par la nature des régimes ($p < 0,001$) allouées aux animaux ainsi que leur durée de distribution ($p < 0,001$). La distribution du régime lin permet une hausse de la proportion des AG n-3 et l'augmentation de sa durée de distribution accroît les proportions d'AG n-3.

Cette hausse massive des AG n-3 totaux, est de la même manière que pour les AG n-6 totaux, en partie due au précurseur de la famille. La proportion en ALA des côtes de porcs crues et cuites est en effet significativement influencée par la nature des régimes alimentaires ($p < 0,001$) ainsi que par la durée de distribution ($p < 0,001$). La distribution du régime lin ainsi que l'augmentation de sa durée de sa distribution permet d'augmenter la proportion en ALA

Tableau 30. Composition en acides gras des côtes de porc cuites des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'acides gras identifiés.

	Palme		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C14:0	1,29	1,28	1,29	1,32	1,26	0,08			
C14:1	0,02	0,04	0,02	0,08	0,03	0,06			
C16:0	25,19 ^a	24,96 ^{ab}	24,45 ^{bc}	25,05 ^{ac}	24,33 ^b	0,73	*	*	
C16:1	2,65 ^a	2,51 ^{ab}	2,47 ^{ab}	2,50 ^{ab}	2,33 ^b	0,22	**		
C18:0	13,39	13,59	13,07	13,87	13,92	0,78			
C18:1	42,00 ^a	40,05 ^b	39,74 ^b	40,14 ^b	39,65 ^b	1,47	***		
C18:2	11,85 ^c	14,20 ^b	15,19 ^a	11,42 ^c	11,60 ^c	0,91	***	*	
C20:0	0,25	0,24	0,26	0,23	0,24	0,04			
C18:3	0,80 ^c	0,67 ^c	0,80 ^c	2,85 ^b	3,96 ^a	0,22	***	***	
C20:1	0,90	0,87	0,87	0,90	0,86	0,11			
C20:2	0,50 ^{bc}	0,57 ^b	0,69 ^a	0,46 ^c	0,45 ^c	0,12	***		
C20:3	0,09 ^a	0,08 ^{ab}	0,09 ^{ac}	0,07 ^{bc}	0,06 ^b	0,02	*		
C20:4	0,62	0,56	0,63	0,66	0,72	0,18			
C22:1	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,00 ^b	0,03 ^a	0,00	***	***	
C20:5	0,04 ^c	0,00 ^d	0,01 ^d	0,06 ^b	0,11 ^a	0,02	***	***	
C24:0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
C24:1	0,14 ^b	0,13 ^b	0,16 ^a	0,09 ^c	0,08 ^c	0,02	***		
C22:5	0,14 ^c	0,14 ^c	0,12 ^c	0,21 ^b	0,26 ^a	0,03	***		
C22:6	0,05 ^a	0,02 ^b	0,04 ^a	0,02 ^b	0,04 ^a	0,02		***	
Σ AGS	40,21 ^{ab}	40,15 ^{ab}	39,16 ^b	40,54 ^a	39,82 ^{ab}	1,23		*	
Σ AGM	45,71 ^a	43,61 ^b	43,27 ^b	43,71 ^b	42,97 ^b	1,59	***		
Σ AGPI	14,08 ^c	16,24 ^b	17,58 ^a	15,74 ^b	17,21 ^a	1,08	***	***	
Σ AG n-6	12,56 ^c	14,84 ^b	15,91 ^a	12,15 ^c	12,39 ^c	0,92	***	*	
Σ AG n-3	1,02 ^c	0,83 ^c	0,97 ^c	3,14 ^b	4,36 ^a	0,24	***	***	
AG n-6/n-3	12,51	17,86	17,16	3,89	2,84	1,96			
C18:2/C18:3	15,30	21,35	20,10	4,04	2,94	2,60			

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; D = effet durée de distribution R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

dans les côtes de porc. Cet effet de la nature du régime sur la proportion en AG est observable pour l'EPA ainsi que le DPA. La proportion de DHA ne varie pas, comme pour le TASCDC ainsi que le LD. L'augmentation de la durée de distribution du régime lin permet d'augmenter uniquement la proportion de l'EPA de la même manière que pour le LD. Comme montré pour l'ARA, la composition en AG des côtes de porc est plus similaire à celle du LD, notamment pour les AG à longue chaîne.

La production de côtes de porcs à partir d'animaux ayant consommé le régime lin permet d'avoir une hausse importante de la proportion des AG n-3, notamment par la hausse de la proportion du précurseur mais aussi par celle de l'EPA et du DPA. La composition en AG de la côte de porc a un profil plus proche du muscle LD que du TASCDC. La cuisson des côtes permet toujours d'avoir un apport significatif en AG n-3 pour le consommateur. En guise d'illustration, pour 100 g de côte de porc consommée, 396 mg d'ALA sont apportés pour 444 mg d'AG n-3 totaux, soit plus de 20 % des recommandations émises par l'AFSSA. Le rapport entre les précurseurs LA et ALA des côtes de porcs des animaux ayant mangé du lin sont en deçà du rapport de 5 pour être compris entre 4,0 et 2,8.

3.4.5. Composition en acides gras des produits de charcuteries

Dans le but de permettre au consommateur d'augmenter significativement leurs apports en AG n-3, il faut mettre à sa disposition des aliments supplémentés en ces AG. Ainsi, les produits de charcuterie confectionnés à partir des matières premières carnées vont apporter une part significative des apports nutritionnels conseillés par l'AFSSA lors de leur dernière édition des ANC (2001).

Cette étude présente l'originalité de déterminer le profil en AG d'un grand nombre de produits de charcuterie, qui, jusqu'à lors, ont été peu ou pas caractérisés à l'exception peut être des travaux de Specht-Overholt et al. (1997), D'Arrigo et al. (2004) et Hoz et al. (2007) pour des produits de charcuterie comme la poitrine de porc, le bacon, le Braunschweiger (saucisse à base de foie), la mousse de foie et le jambon cru.

Les compositions en AG des produits de charcuterie sont présentées dans les tableaux 31 à 42.

Les proportions des classes d'AG saturés, monoinsaturés, polyinsaturés des produits de charcuterie issus des porcs de l'étude sont influencées par la nature des régimes alimentaires.

Tableau 31. Composition en acides gras de l'andouille réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g d'andouille.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	6	6	7	6	NS
C14:0	207 ^a	206 ^a	167 ^b	16	*
C16:0	4007 ^a	4046 ^a	3182 ^b	314	*
C18:0	3096 ^a	3108 ^a	2260 ^b	247	**
C18:1	4989	5415	4699	426	NS
C18:2	695 ^c	1466 ^a	910 ^b	104	***
C18:3	45 ^c	63 ^b	275 ^a	16	***
C20:4	127	145	131	9	NS
C20:5	9 ^b	4 ^c	18 ^a	3	**
C22:5	20 ^b	21 ^b	48 ^a	4	***
C22:6	8	11	12	2	NS
Σ AGS	7344 ^a	7396 ^a	5640 ^b	579	*
Σ AGM	5400	5826	5053	458	NS
Σ AGPI	959 ^c	1811 ^a	1459 ^b	135	***
Σ AG n-6	839 ^c	1631 ^a	1057 ^b	113	***
Σ AG n-3	82 ^b	100 ^b	352 ^a	20	***
LA/ALA	16	23	3		

Tableau 32. Composition en acides gras du jambon cuit réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de jambon cuit.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	3	3	3	1	NS
C14:0	32	38	30	5	NS
C16:0	638	735	596	106	NS
C18:0	328	392	316	55	NS
C18:1	1208	1360	1099	210	NS
C18:2	320 ^b	448 ^a	369 ^b	71	*
C18:3	18 ^b	21 ^b	99 ^a	15	***
C20:4	28 ^a	33 ^a	21 ^c	8	*
C20:5	2 ^b	2 ^b	8 ^a	1	***
C22:5	4 ^b	6 ^b	10 ^a	1	***
C22:6	2	3	3	1	NS
Σ AGS	1010	1178	952	168	NS
Σ AGM	1315	1479	1191	230	NS
Σ AGPI	399 ^b	544 ^a	535 ^a	92	*
Σ AG n-6	355 ^b	488 ^a	397 ^b	77	*
Σ AG n-3	27 ^b	33 ^b	120 ^a	17	***
LA/ALA	18	21	4		

Tableau 33. Composition en acides gras du jambon cru réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de jambon cru.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	11	13	10	4	NS
C14:0	148	154	126	41	NS
C16:0	2711	2792	2313	650	NS
C18:0	1306	1415	1185	296	NS
C18:1	5366	5356	4512	1139	NS
C18:2	1444 ^b	1848 ^a	1428 ^b	287	*
C18:3	98 ^b	103 ^b	544 ^a	34	***
C20:4	94	75	63	24	NS
C20:5	3 ^b	6 ^b	19 ^a	6	***
C22:5	14 ^b	10 ^b	28 ^a	7	**
C22:6	5	4	10	7	NS
Σ AGS	4212	4416	3657	992	NS
Σ AGM	5653	5641	4834	1214	NS
Σ AGPI	1679 ^b	2123 ^a	2126 ^a	323	*
Σ AG n-6	1553 ^b	1953 ^a	151 ^b	294	*
Σ AG n-3	120 ^b	123 ^b	601 ^a	38	***
LA/ALA	15	18	2,6		

Tableau 34. Composition en acides gras de la mousse de foie réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de mousse de foie.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	50	20	23	29	NS
C14:0	334	299	335	25	NS
C16:0	6599	5596	6317	491	NS
C18:0	3544	2936	3499	279	NS
C18:1	10072	8594	9798	770	NS
C18:2	3066 ^b	3657 ^a	3183 ^b	237	*
C18:3	188 ^b	167 ^b	1146 ^a	55	***
C20:4	189 ^a	153 ^b	52 ^c	10	***
C20:5	9 ^b	7 ^b	50 ^a	2	***
C22:5	31 ^b	27 ^c	67 ^a	3	***
C22:6	24	17	20	4	NS
Σ AGS	10595	8911	10242	810	NS
Σ AGM	10946	9327	10600	829	NS
Σ AGPI	3654 ^c	4192 ^b	4656 ^a	310	*
Σ AG n-6	3273 ^b	3830 ^a	3252 ^b	248	*
Σ AG n-3	253 ^b	218 ^b	1284 ^a	61	***
LA/ALA	16	22	3		

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; R = effet régime
 Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;
 Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;
 Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;
 Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)
 Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;
 NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Tableau 35. Composition en acides gras du pâté de campagne en terrine réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de pâté de campagne en terrine.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	25	23	22	2,1	NS
C14:0	397	350	351	26,8	NS
C16:0	7983 ^a	6613 ^b	6929 ^b	538	*
C18:0	4349 ^a	3284 ^b	3599 ^b	293	*
C18:1	12896	11050	12135	876	NS
C18:2	3963 ^b	4464 ^b	3667 ^c	229	*
C18:3	246 ^b	214 ^b	1333 ^a	66,6	***
C20:4	189	188	215	46,7	NS
C20:5	31 ^b	7 ^c	56 ^a	19,6	*
C22:5	38 ^b	31 ^b	78 ^a	5,6	***
C22:6	20	20	22	2,7	NS
Σ AGS	12856 ^a	10337 ^b	10982 ^b	867	*
Σ AGM	14034	11984	13090	963	NS
Σ AGPI	4712 ^c	5139 ^b	5543 ^a	285	*
Σ AG n-6	4184 ^b	4677 ^a	3904 ^b	207	*
Σ AG n-3	335 ^b	273 ^b	1489 ^a	77,5	***
LA/ALA	16	21	3		

Tableau 36. Composition en acides gras du pâté de campagne en conserve réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage d'acides gras identifiés.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	16	20	17	2	NS
C14:0	300 ^b	368 ^a	299 ^b	26	***
C16:0	6166 ^b	6868 ^a	5738 ^b	508	**
C18:0	3584	3927	3533	275	NS
C18:1	11347 ^a	11227 ^a	9903 ^b	916	*
C18:2	3473 ^b	4911 ^a	3652 ^b	315	***
C18:3	220 ^b	274 ^b	1487 ^a	97	***
C20:4	149 ^a	171 ^a	105 ^b	31	**
C20:5	13 ^b	13 ^b	51 ^a	4	***
C22:5	28 ^b	29 ^b	66 ^a	9	***
C22:6	17	14	13	8	NS
Σ AGS	10164 ^b	11295 ^a	9669 ^c	809	**
Σ AGM	12134 ^b	12146 ^b	10679 ^a	961	*
Σ AGPI	4128 ^b	5698 ^a	5603 ^a	414	***
Σ AG n-6	3650 ^b	5114 ^b	3781 ^b	310	***
Σ AG n-3	278 ^b	329 ^b	1617 ^a	106	***
LA/ALA	16	18	2		

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; R = effet régime
 Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ; Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ; Σ AGPI :
 C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ; Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6) ;
 Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;
 NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Tableau 37. Composition en acides gras de la poitrine salée / fumée réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de poitrine salée / fumée.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	13 ^b	17 ^a	14 ^b	2	*
C14:0	174 ^b	238 ^a	181 ^b	16	***
C16:0	3418 ^b	4476 ^a	3331 ^b	360	***
C18:0	1910 ^b	2398 ^a	1793 ^b	252	**
C18:1	6386 ^b	8095 ^a	6033 ^b	826	***
C18:2	2203 ^b	3093 ^a	2178 ^b	440	***
C18:3	118 ^b	157 ^b	935 ^a	109	***
C20:4	72	77	48	21	NS
C20:5	2 ^b	3 ^b	23 ^a	3	***
C22:5	15 ^b	17 ^b	40 ^a	2	***
C22:6	4	5	9	4	NS
Σ AGS	5578 ^b	7209 ^a	5371 ^b	615	***
Σ AGM	6885 ^b	8741 ^a	6528 ^b	869	**
Σ AGPI	2544 ^b	3518 ^a	3349 ^a	553	*
Σ AG n-6	2298 ^b	3196 ^a	2244 ^b	424	***
Σ AG n-3	139 ^b	182 ^b	1008 ^a	114	***
LA/ALA	18	20	2		

Tableau 38. Composition en acides gras du rôti de porc réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de rôti de porc.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	6 ^b	12 ^a	6 ^b	1	***
C14:0	89 ^b	185 ^a	88 ^b	18	***
C16:0	1838 ^b	3577 ^a	1807 ^b	403	**
C18:0	945 ^b	1855 ^a	1041 ^b	289	*
C18:1	3309 ^b	5565 ^a	3090 ^b	686	**
C18:2	909 ^b	1950 ^a	739 ^b	156	***
C18:3	51 ^b	81 ^b	260 ^a	59	**
C20:4	45	57	45	24	NS
C20:5	3 ^b	3 ^b	11 ^a	1	***
C22:5	8 ^b	10 ^b	17 ^a	1	***
C22:6	4	4	4	1	NS
Σ AGS	2900 ^b	5664 ^a	2964 ^b	715	**
Σ AGM	3586 ^b	6022 ^a	3317 ^b	723	**
Σ AGPI	1073 ^b	2194 ^a	1113 ^b	244	**
Σ AG n-6	962 ^b	2018 ^a	789 ^b	178	***
Σ AG n-3	66 ^b	98 ^b	292 ^a	61	**
LA/ALA	18	24	3		

Tableau 39. Composition en acides gras de la saucisse de porc réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisse de porc.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	15 ^a	14 ^a	12 ^b	1	**
C14:0	222 ^a	221 ^a	181 ^b	24	*
C16:0	4120 ^a	4050 ^a	3288 ^b	417	**
C18:0	2131 ^b	2108 ^b	1785 ^a	215	*
C18:1	7577 ^a	7216 ^a	5972 ^b	782	**
C18:2	2312 ^b	2861 ^a	2236 ^b	290	**
C18:3	151 ^b	179 ^b	935 ^a	79	***
C20:4	78	65	64	26	NS
C20:5	3 ^b	3 ^b	19 ^a	1	***
C22:5	18 ^b	16 ^b	40 ^a	3	***
C22:6	10 ^b	10 ^b	14 ^a	2	***
Σ AGS	6533 ^a	6436 ^a	5304 ^b	658	**
Σ AGM	8105 ^a	7697 ^b	6652 ^c	930	*
Σ AGPI	2700 ^a	3292 ^b	3428 ^b	385	*
Σ AG n-6	2412 ^b	2951 ^a	2318 ^b	307	**
Σ AG n-3	183 ^b	208 ^b	1009 ^a	82	***
LA/ALA	15	16	2		

Tableau 40. Composition en acides gras de la saucisse knack réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisse knack.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	18	19	18	1	NS
C14:0	284	280	266	12	NS
C16:0	5613	5553	5310	275	NS
C18:0	3255 ^a	3226 ^a	2981 ^b	174	*
C18:1	9581	9667	9868	527	NS
C18:2	3338	3404	3365	184	NS
C18:3	184 ^c	266 ^b	1371 ^a	33	***
C20:4	77 ^b	86 ^a	67 ^c	6	***
C20:5	1 ^b	1 ^b	20 ^a	1	***
C22:5	19 ^c	24 ^b	55 ^a	3	***
C22:6	7 ^b	6 ^b	11 ^a	1	***
Σ AGS	9233	9141	8644	464	NS
Σ AGM	10274	10699	10609	740	NS
Σ AGPI	3825 ^b	3978 ^b	5081 ^a	225	***
Σ AG n-6	3443	3521	3458	190	NS
Σ AG n-3	211 ^c	298 ^b	1457 ^a	37	***
LA/ALA	18	13	2		

AGS : acide gras saturé ; AGM : acide gras monoinsaturé ; AGPI : acide gras polyinsaturé ; ETR : écart type résiduel ; R = effet régime

Σ AGS : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0 ;

Σ AGM : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1 ;

Σ AGPI : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6 ;

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05 ;

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Tableau 41. Composition en acides gras du saucisson à l'ail réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisson à l'ail.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	12 ^b	12 ^b	14 ^a	1	**
C14:0	205	195	219	14	NS
C16:0	4186	3834	4276	278	NS
C18:0	2243	1922	2226	138	NS
C18:1	7099	6392	7036	445	NS
C18:2	2014 ^b	2778 ^b	2039 ^a	139	***
C18:3	124 ^b	125 ^b	781 ^a	41	***
C20:4	65 ^b	71 ^a	58 ^b	5	***
C20:5	5 ^b	4 ^b	17 ^a	1	***
C22:5	14 ^b	13 ^b	38 ^a	2	***
C22:6	7	6	7	1	NS
Σ AGS	6701	6006	6779	432	NS
Σ AGM	7680	6903	7577	475	NS
Σ AGPI	2342 ^b	3132 ^a	3106 ^a	190	**
Σ AG n-6	2093 ^b	2865 ^a	2083 ^b	146	**
Σ AG n-3	151 ^b	149 ^b	842 ^a	44	***
LA/ALA	16	22	3		

Tableau 42. Composition en acides gras du saucisson sec réalisée à partir des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg d'acides gras pour 100 g de saucisson sec.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
C12:0	19 ^b	15 ^c	17 ^a	1	**
C14:0	286	243	261	14	NS
C16:0	5693	4846	5336	278	NS
C18:0	3225	2766	3201	138	NS
C18:1	9418	8217	8806	445	NS
C18:2	2711 ^c	3627 ^a	2985 ^a	139	***
C18:3	190 ^b	174 ^b	1322 ^a	41	***
C20:4	85	75	81	6	NS
C20:5	4 ^b	4 ^b	25 ^a	1	***
C22:5	23 ^b	18 ^b	57 ^a	2	***
C22:6	7	4	7	1	NS
Σ AGS	9306	7951	8899	432	NS
Σ AGM	10133	8843	9465	475	NS
Σ AGPI	3179 ^c	4097 ^b	4659 ^a	190	**
Σ AG n-6	2826 ^c	3730 ^a	3103 ^b	146	**
Σ AG n-3	224 ^b	200 ^b	1411 ^a	43	***
LA/ALA	14	21	2		

Ainsi, par rapport aux produits de charcuterie issus des porcs nourris au régime palme, la proportion des AG saturés est significativement réduite dans l'andouille (tableau 31), dans le pâté de campagne en terrine (tableau 35) et en conserve (tableau 36) et dans la saucisse (tableau 39). Ces derniers sont considérés comme mauvais vis-à-vis de la santé humaine, bien qu'ils ne soient pas tous à considérer en bloc. En effet, certains comme l'acide gras myristique présentent des intérêts physiologiques (Hughes et al., 1996 ; Rioux et Legrand, 2007). Ces résultats avaient été trouvés en partie par Ahn et al. (1996) pour le rôti de porc, par Leskanich et al. (1997) pour la saucisse, par Specht-Overholt et al. (1997) pour différents produits de charcuterie et enfin par Hoz et al. (2007) pour le jambon cru. Cependant, ni Enser et al. (2000) ni D'Arrigo et al. (2004) n'avaient associé à l'introduction des graines de lin dans l'alimentation des porcs, une baisse de la proportion en AG saturés au sein des produits de charcuterie.

Les proportions en AG monoinsaturés des produits de charcuterie des porcs ayant été nourris par le régime lin, comparativement aux mêmes produits de charcuteries des porcs nourris à l'aliment palme, sont diminuées dans le pâté de campagne en conserve (tableau 36) et dans la saucisse (tableau 39). Cette baisse de la proportion des AGM dans les produits de charcuterie avait été décrite précédemment par Ahn et al. (1996) ainsi que par Specht-Overholt et al. (1997). Nos résultats sont en accord avec ceux trouvés précédemment au sein du muscle.

Les proportions en AG polyinsaturés des produits de charcuterie étudiés issus des porcs nourris au régime lin, par rapport aux produits de charcuterie issus des porcs nourris au régime palme, sont significativement augmentées. Cette hausse est valable pour l'ensemble des 12 produits de charcuterie étudiés (tableau 31 à 42).

Les produits de charcuterie sont issus des matières premières carnées de porcs nourris aux régimes palme, tournesol ou lin. Ainsi, de la même manière qu'il existe une bonne relation entre les AG présents dans l'alimentation et les AG présents dans les tissus, il existe une bonne relation entre les AG présents dans l'alimentation de l'animal et ceux présents dans les produits de charcuterie qui vont être générés à partir de leurs tissus. De ce fait, augmenter l'apport en AG polyinsaturés, et notamment des AG n-3, conduit globalement à une baisse de la proportion en AG saturés et monoinsaturés et à une hausse des AG polyinsaturés. La baisse de la proportion des AG monoinsaturés s'explique par le rôle inhibiteur connu des AG n-3 sur l'enzyme $\Delta 9$ désaturase (Kouba et Mourot, 1998 ; Kouba et al., 2003). La proportion des AGM étant diminuée dans les tissus, cela se retrouve dans les produits de charcuterie générés

Tableau 43. Recouvrement en précurseur ALA par l'ingestion de 100 g de produits de charcuterie issus de porcs nourris au régime lin.

	ALA, mg/100g	ANC, %
Pâté de campagne (conserve)	1487,3	74,4
Saucisse Knack	1371,3	68,6
Pâté de campagne (terrines)	1333,4	66,7
Saucisson sec	1322,0	66,1
Mousse de foie	1146,2	57,3
Saucisse	935,5	46,8
Poitrine salée/fumée	935,2	46,8
Saucisson à l'ail	780,8	39,0
Jambon cru	543,6	27,2
Andouille	274,7	13,7
Rôti de porc	260,4	13,0
Jambon cuit	99,4	5,0

ALA : acide α -linoléique ; ANC : apport nutritionnel conseillé

à partir de ces tissus. Il en est de même pour les AG polyinsaturés, ils sont significativement augmentés au sein des produits de transformation.

L'ensemble des douze produits de charcuterie voit leur proportion en précurseur ALA augmentée de manière significative. Cette hausse de la proportion du précurseur est poursuivie jusqu'au DPA (EPA inclus). Ces résultats confirment des études précédentes (Fogerty, et al., 1990 ; Ahn et al., 1996 ; Leskanich et al., 1997 ; Specht-Overholt et al., 1997 ; Enser et al., 2000; D'Arrigo et al., 2004 ; Hoz et al., 2007). L'absence d'effet significatif du régime lin sur la proportion en DHA a été préalablement trouvée par Ahn et al. (1996), Specht-overholt et al. (1997), Enser et al. (2000), D'Arrigo et al. (2004), Hoz et al. (2007). Sur les 12 produits de charcuterie, la saucisse (tableau 39) et la saucisse knack (tableau 40) présentent une augmentation de la proportion en DHA. Ces résultats confirment ceux de Leskanich et al. (1997) qui avaient trouvés sur la saucisse une augmentation de l'acide gras terminal de la famille n-3 avec des porcs nourris au régime lin par rapport aux porcs nourris au régime palme.

L'AFSSA recommande dans sa dernière édition des ANC (2001) un rapport LA/ALA équivalent à 5 ou inférieur. Dans notre étude, ce rapport est systématiquement inférieur à cette recommandation de 5. Le rapport au sein des produits de charcuterie des animaux nourris au régime palme était compris entre 18,4 (poitrine salée/fumée ; tableau 37) et 14,3 (saucisson sec ; tableau 42). Le rapport des produits de charcuterie issus de porcs nourris au régime lin est compris entre 3,8 (jambon cuit) et 2,3 (poitrine salée/fumée & saucisson à l'ail).

De plus, l'AFSSA recommande un apport quotidien dans notre alimentation de 2 g de précurseur ALA. Sur la base de 100 g de produits de charcuterie, le pâté de campagne en conserve apporte près de $\frac{3}{4}$ des recommandations journalières, la saucisse knack 68,6 % et le pâté de campagne en terrine 66,7 % (tableau 43). Le jambon cuit, qui constitue le produit de charcuterie le moins enrichi en AG n-3, mais aussi le moins riche en lipides totaux, n'apporte que 5 % des apports nutritionnels conseillés par la consommation de 100 g de ce dernier. Néanmoins, dans le cadre d'un régime adapté, il n'est pas conseillé d'avoir une consommation aussi importante en pâté de campagne. Sur la base d'une dose de 40 g, ce dernier couvre environ 30 % des ANC.

Nos résultats montrent qu'il est possible d'augmenter la qualité nutritionnelle de la viande de porc, et notamment ici des produits de charcuterie, en distribuant aux animaux un aliment

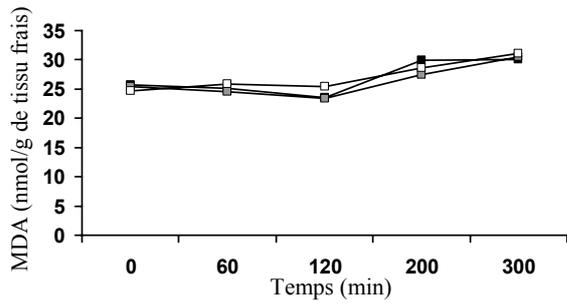


Figure 25. Peroxydation des lipides du *longissimus dorsi* des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min (■ contrôle ; ■ tournesol ; □ lin).

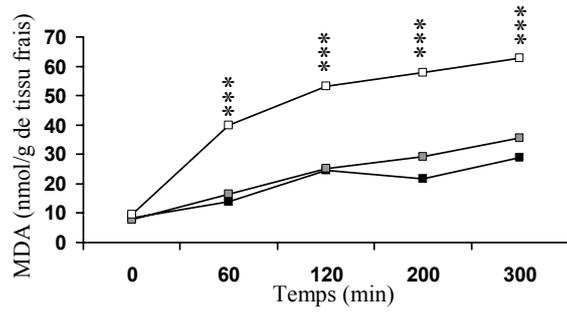


Figure 26. Peroxydation des lipides des côtes de porc des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min (■ contrôle ; ■ tournesol ; □ lin).

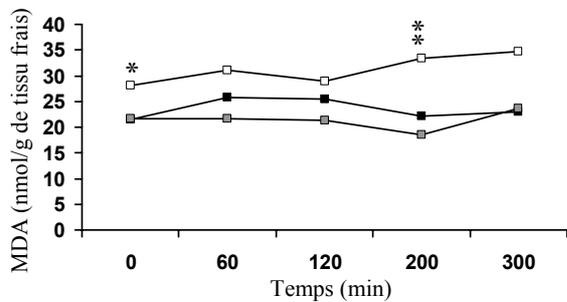


Figure 27. Peroxydation des lipides des poitrines fumées / salée des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min (■ contrôle ; ■ tournesol ; □ lin).

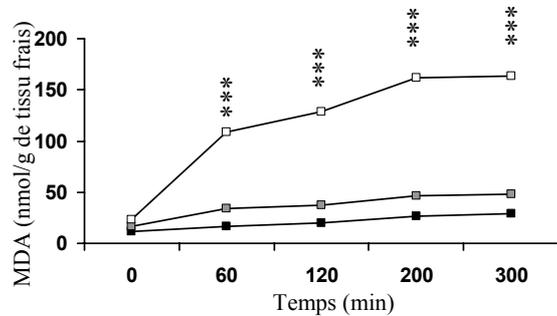


Figure 28. Peroxydation des lipides du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min (■ contrôle ; ■ tournesol ; □ lin).

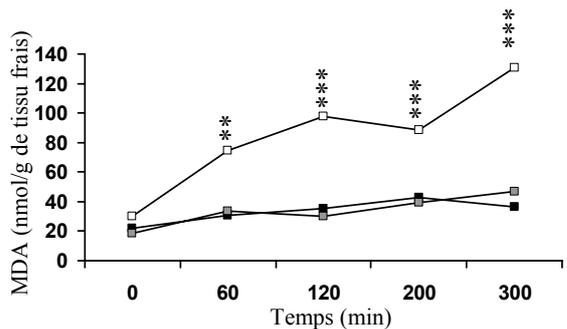


Figure 29. Peroxydation des lipides des saucissons secs des porcs charcutiers induite par le fer à 37°C pendant 300 min (■ contrôle ; ■ tournesol ; □ lin).

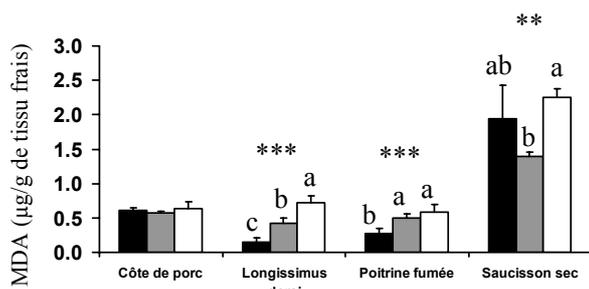


Figure 30. Peroxydation des lipides des côtes de porc, du *longissimus dorsi*, de la poitrine salée / fumée et du saucisson sec des porcs charcutiers (■ contrôle ; ■ tournesol ; □ lin).

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$;

riche en AG n-3, ici les graines de lin, au cours de leur élevage. Le consommateur a donc à sa disposition des produits de charcuterie, prêts à être consommés, qui procurent un apport significatif en AG n-3 allant ainsi dans le sens des recommandations nutritionnelles de l'AFSSA.

3.5. Peroxydation des lipides

La peroxydation des lipides a été estimée selon deux méthodes. L'une consistait à mesurer par HPLC la production de malonaldehyde. L'autre consistait à mesurer par une stimulation forcée de la peroxydation (méthode TBARS) la production d'équivalent du malonaldehyde.

3.5.1. Méthode TBARS

La susceptibilité à l'oxydation des lipides est significativement supérieure lorsque la matrice carnée provient de porc nourris au lin dans le cas des côtes de porc (figure 26 ; $p < 0,001$), du tissu adipeux sous cutané dorsal (figure 28 ; $p < 0,001$) et des saucissons secs (figure 29 ; $p < 0,001$) et ceci dès 60 min de stimulation. A l'opposé, les peroxydes des lipides du muscle *longissimus dorsi* ne sont pas significativement influencé par les régimes distribués aux animaux, dont ils sont issus (figure 25). Les lipides de la poitrine fumée / salée ont une susceptibilité supérieure à l'oxydation au temps $t=0$ min ($p < 0,05$) et au temps $t=200$ min ($p < 0,01$) lorsqu'elles proviennent d'animaux nourris au lin (figure 27).

Les AG n-3 sont particulièrement susceptibles à la peroxydation lorsqu'ils ne sont pas protégés par des antioxydants. Ces derniers sont particulièrement riches en doubles liaisons et d'autant plus fragiles (IUPAC, 1978). Nos résultats, quant à la susceptibilité supérieure à la peroxydation des côtes de porc, du tissu adipeux sous cutané dorsal et du saucisson sec sont en accord avec la bibliographie (Houben et Krol, 1980 ; Frankel, 1984 ; Cameron et Enser, 1991 ; Rey et al., 2001 ; Hoz et al., 2004 ; Hoz et al., 2007). Cependant, nos aliments expérimentaux avaient été supplémentés en antioxydants (40 ppm de vitamine E et 0,25 ppm de sélénium). Il semblerait de ce fait que la dose employée ou bien que les antioxydants utilisés n'étaient pas appropriés. L'augmentation de la dose en antioxydants permettrait de limiter les phénomènes de peroxydation. Une supplémentation massive en vitamine E dans l'alimentation des animaux permettait de se prémunir de l'altération des lipides (Cannon et al., 1996 ; Teye et al., 2006).

Le sel et/ou la fumée peut aussi faire office d'antioxydant. C'est ce que nous observons dans le cas de la poitrine fumée /salée. Pendant très longtemps, ce furent les seuls moyens de conserver de la viande dans le temps. Les phénols contenus dans la fumée (Pearson et Gillett,

1996 ; Coronado et al., 2002) ainsi que les nitrites (Kanner, 1994 ; Izumimoto et al., 1997) ont un rôle connu comme suppresseur ou inhibiteur de la peroxydation.

Enfin, la localisation des lipides de concert avec la localisation des antioxydants pourrait limiter la peroxydation. En effet, les membranes sont naturellement riches en AG polyinsaturés et sont le premier lieu de la peroxydation (Lauridsen et al., 1999). Or les membranes sont aussi un lieu de stockage de la vitamine E. Par la proximité immédiate des AG polyinsaturés et de la vitamine E, il peut se mettre en place une prévention des processus de peroxydation, ceci sur le site même du premier lieux d'oxydation (Morrissey et al., 1994). C'est ce que nous observons au sein du muscle *longissimus dorsi* des porcs nourris au lin.

La mesure du niveau de MDA peut être mise en relation avec le niveau d'acceptabilité des produits et la production de goût rance. Ce seuil est de 0,5 µg de MDA / g de tissu selon Gray et Pearson (1987) et Lanari et al. (1995) ou bien de 1,0 µg de MDA / g de tissu selon Buckley et Connolly (1980). Dans notre étude expérimentale, dans le cas de la poitrine fumée/salée, la teneur moyenne de MDA est de $1,71 \pm 0,35$ µg par g de tissu. Si l'on confronte nos résultats de peroxydation des lipides avec ceux des tests consommateurs réalisés sur les mêmes produits (tableau 53), nous ne sommes pas en accord avec ces différents auteurs. D'autres paramètres sont peut être à prendre en considération comme les apports extérieurs en épices jouant un rôle d'exhausteur de goût.

3.5.2. Méthode HPLC

La mesure par HPLC de la quantité de MDA produit sans stimuler la peroxydation des lipides ne donnent pas des résultats similaires à ceux mesurés précédemment par la méthode TBARS. Le muscle *longissimus dorsi* ainsi que la poitrine fumée issus des porcs nourris au lin ont une susceptibilité supérieure à la peroxydation des lipides face au lot palme. Les saucissons secs du lot tournesol ont un potentiel de peroxydation inférieur face au lot lin, alors que les côtes de porc n'ont pas de différences significatives quant à ce paramètre (figure 30).

Les molécules mesurées entre d'une part le test TBARS et la mesure du MDA ne semblent pas équivalent. Le test TBARS mesurerait plutôt des aldéhydes totaux alors que la mesure par HPLC du MDA serait plus spécifique.

Cependant, gardons à l'esprit qu'il ne s'agit que d'une mesure d'un potentiel de peroxydation.

3.6. Classes de lipides neutres et polaires.

Tableau 44. Composition en lipides neutres et en lipides polaires des lipides du muscle *longissimus dorsi* de porcs charcutier. Les résultats sont exprimés en mg pour 100 g de muscle

	Palme		Tournesol		Lin	Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Lipides neutres								
Tri-acylglycérol	188,8 ^b	208,8 ^a	196,1 ^{ab}	195,8 ^{ab}	190,4 ^b	5,18	**	*
Di-acylglycérol	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	NS	NS
Mono-acylglycérol	0,30	0,78	0,23	0,90	0,34	0,26	NS	NS
Cholestérol	8,90	10,30	8,90	7,60	9,60	0,71	NS	NS
Acides gras libres	1,50	0,90	1,80	1,30	0,30	0,45	NS	NS
Lipides polaires								
Cardiolipides	1,60	2,20	2,10	0,70	2,10	0,47	NS	NS
Phosphatidyléthanolamine	55,6 ^b	107,5 ^a	56,7 ^b	118,4 ^a	49,8 ^b	28,28	NS	***
Phosphatidylinositol	16,60	10,30	16,30	16,40	16,00	1,93	NS	NS
Phosphatidylsérine	18,90	8,80	9,60	16,80	10,60	3,93	NS	NS
Phosphatidylcholine	74,50	90,30	80,00	74,50	65,30	6,58	NS	NS
Sphingomyéline	7,9 ^{ab}	6,3 ^b	7,6 ^{ab}	12,7 ^a	6,9 ^b	1,77	*	NS

ETR : écart type résiduel ; R = effet régime ; D = effet durée de distribution

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$;

NS : $p > 0,05$; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$

Tableau 45. Typage des fibres musculaires du muscle *longissimus dorsi* chez le porc charcutier (pourcentage des fibres totales).

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
Fibre I	14,5	12,9	12,4	0,7	NS
Fibre IIA	16,3	17,0	19,9	1,0	NS
Fibre IIX	10,6	14,0	15,6	1,1	NS
Fibre IIB	58,9	55,9	52,3	1,3	NS

ETR : écart type résiduel ; R : effet régime ; NS : $p > 0,05$

Les résultats des classes de lipides neutres et polaires du muscle *longissimus dorsi* des porcs sont présentés dans le tableau 44.

Les différentes classes de lipides ont été déterminées au sein du muscle *longissimus dorsi*. Les lipides totaux sont séparés en deux classes de lipides, les lipides neutres et les lipides polaires. La composition en lipides neutres est répartie entre les tri-, di- et mono- acylglycérols ainsi que le cholestérol. Seule la fraction des tri-acylglycérols des lipides du muscle *longissimus dorsi* est significativement influencée par la nature des régimes. Ce sont les animaux du lot tournesol qui présentent une part des TG plus importante que les animaux du lot palme. Il n'y a pas d'effet régime sur la quantité des di-acylglycérol et mono-acylglycérol ainsi que du cholestérol au sein des lipides du muscle LD.

Les quantités d'AG libres, présents en très faible quantité au sein des lipides du muscle LD n'est pas influencée par la nature des régimes.

La quantité de phosphatidyléthanolamine diminue avec l'augmentation de la durée de distribution des régimes. La quantité de sphingomyéline est plus importante au sein du muscle des animaux du lot lin par rapport au lot tournesol durant la période 80-105 kg.

L'effet des AG alimentaires sur la proportion et la composition en phospholipides et en lipides neutres est peu documenté. Nos résultats sont en désaccord avec ceux de Leszczynski et al. (1992), de Kouba et Mourot (1999) et de Vorin et al. (2003) qui ne trouvaient pas d'effets significatifs associés à la nature des régimes distribués.

Cependant, l'absence d'effet significatif sur la quantité de cholestérol dans le muscle est confirmée par les travaux de (Diersen-Shade et al., 1986; Richard et al., 1983) et entre en contradiction avec ceux de Kouba et Mourot (1999).

3.7. Cellularité des tissus musculaires et adipeux

3.7.1. Cellularité des fibres musculaires

Les fibres du muscle *longissimus dorsi* ont été caractérisées selon leur métabolisme oxydatif, glycolytique ou mixte (tableau 45). Le métabolisme oxydatif est élevé dans les fibres I et IIA, intermédiaire dans les fibres IIX et faible dans les fibres IIB. En revanche, le métabolisme glycolytique est faible dans les fibres I, intermédiaire dans les fibres IIA et IIX, et élevé dans les fibres IIB (Henckel et al., 1997 ; Lefaucheur, 2003). Le porc constitue un modèle original puisque l'isoforme IIB de la chaîne de myosine est fortement exprimée alors qu'elle n'est pas retrouvée chez les autres espèces de gros mammifères d'élevage (Lefaucheur, 2003). Les régimes alimentaires n'ont pas influencé les proportions des différents types de fibres musculaires de manière significative ($p < 0,10$).

Tableau 46. Effet des régimes sur le nombre et le diamètre des adipocytes du muscle *longissimus dorsi* des porcs charcutiers.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
Diamètre, µm	52,4	51,4	54,2	4,9	NS
Lipides totaux, %	1,74	1,71	1,64	0,41	NS
Lipides neutres, %	68,33 ^a	68,81 ^a	59,73 ^b	6,09	**
Nombres d'adipocytes / g	179754	180828	130643	40647	†

Les valeurs en colonnes avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%

ETR : écart type résiduel ; R : effet régime ; NS : p>0,10 ; † : p<0,10 ; ** : p<0,01

Tableau 47. Cellularité du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers

	Palme	Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Diamètre, µm	76,3	73,9	71,2	76,3	71,0	6,8	NS	NS
Adipocytes, g/tissu	3242	3793	3944	3330	4112	1179	NS	NS
Adipocytes totaux	9 737 013	11 301 868	9 946 350	10 057 575	11 422 468	3 018 550	NS	NS

ETR : écart type résiduel ; D : effet durée ; R : effet régime ; NS : p>0,05

Tableau 48. Cellularité de la panne des porcs charcutiers.

	Palme	Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Diamètre, µm	78,8	75,8	78,5	73,6	76,8	7,6	NS	NS
Adipocytes, g/tissu	3227	3356	3084	4016	3656	4016	NS	NS
Adipocytes totaux	4 963 328	4 534 153	3 733 652	4 923 591	4 935 603	2 053 926	NS	NS

ETR : écart type résiduel ; D : effet durée ; R : effet régime ; NS : p>0,05

L'ontogenèse des fibres musculaires intervient au cours de la vie fœtale du porc. Elle se fait en deux générations, la première du 35^{ème} au 55^{ème} jour de vie fœtale et la seconde du 55^{ème} au 90^{ème} jour de vie fœtale (Wigmore et Sticklang, 1983). Au 90^{ème} jour de vie fœtale chez le porc, le nombre total de fibres musculaires est considéré comme définitivement fixé. La croissance ultérieure des muscles se fait uniquement par hypertrophie des fibres existantes. Mais des facteurs externes comme la température ambiante ou bien l'exercice peuvent influencer la composition du type des fibres musculaires (Lefaucheur et Gerrard, 2000). De plus, la typologie des fibres musculaires peut expliquer une partie de la variation de la qualité de la viande (Henckel et al., 1997).

La nature des régimes n'a pas d'influence sur la teneur en lipides totaux des adipocytes (tableau 46), ce qui confirme des études antérieures (Romans et al., 1995a et b ; Matthews et al., 2000 ; Kouba et al., 2003 ; Corino et al., 2008). En revanche la proportion de lipides neutres est inférieure pour les animaux issus du lot avec des graines de lin extrudées ($p < 0,01$) par rapport aux lipides neutres du muscle *longissimus dorsi* des porcs nourris au régime palme et tournesol. Le nombre d'adipocytes, estimé par calcul (Di Girolamo et al., 1971), semble influencé par le régime. Il est plus élevé chez les animaux des lots palme et tournesol ($p < 0,06$) par rapport aux animaux nourris au lin. Les AG n-3 semblent s'intégrer de manière préférentielle au sein des lipides polaires tel que suggéré par Hertzman et al. (1988).

3.7.2. Cellularité des tissus adipeux

Il n'y a pas d'effet significatif du régime ou de la durée de sa distribution sur les paramètres de la cellularité des tissus adipeux sous cutané dorsal (TASCD) et de la panne (tableau 47 et 48). Les diamètres des adipocytes présents au sein du TASCD ($73,7 \pm 2,6 \mu\text{m}$) ainsi que ceux de la panne ($76,7 \pm 2,1 \mu\text{m}$) ne sont pas sensiblement différents. Il en est de même pour le nombre d'adipocytes par gramme de tissu qui est de 3684 ± 382 pour le TASCD et de 3468 ± 372 pour la panne. En utilisant les poids de ces deux tissus adipeux mesurés lors de la découpe de l'animal, nous avons pu estimer le nombre total d'adipocytes présents dans l'ensemble du tissu. Il est en moyenne égal à $10,5 \cdot 10^6$ pour le TASCD alors qu'il est de $4,6 \cdot 10^6$ pour la panne. Le TASCD étant un tissu plus lourd que la panne, cela explique cette différence.

Ces résultats ne sont pas en accord avec Wilfart et al (2004b). Les auteurs avaient trouvé que lors de la distribution de régimes riches en AG n-3, le diamètre des adipocytes diminuait alors que le nombre total d'adipocytes pour l'ensemble de la pièce anatomique augmentait. Il y

Tableau 49. Paramètres sanguins (cholestérol, triglycérides, glucose, HDL-cholestérol et LDL-cholestérol) des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en mg/l de plasma.

	Palme		Tournesol		Lin	Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Cholestérol	1099,3 ^b	1256,7 ^a	1100,0 ^b	1232,1 ^a	1125,2 ^b	102,7	NS	***
Triglycérides	399,9	387,1	431,8	417,6	349,1	108,8	NS	NS
Glucose	940,1	997,8	970,1	944,5	1029,0	154,0	NS	NS
HDL-cholestérol	371,6 ^b	430,0 ^{ac}	372,2 ^{bc}	416,5 ^{ab}	336,0 ^b	62,5	NS	**
LDL-cholestérol	647,8 ^b	749,2 ^a	641,4 ^b	732,1 ^a	719,3 ^{ab}	88,3	NS	*

ETR : écart type résiduel ; D : effet durée ; R : effet régime ;

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$;

NS : $p > 0,05$; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$

avait donc plus d'adipocytes mais de plus petite taille. Il avait été émis l'hypothèse d'un recrutement de nouvelles cellules adipeuses au sein des tissus par les porcs nourris par un régime lin. Il existe chez les porcs adultes un potentiel, même faible, d'un recrutement adipocytaire (Anderson et Kauffman, 1973) pour un développement du tissu adipeux par hyperplasie.

Précédemment, lors de la mesure des tissus adipeux sous cutanés des porcs, pour expliquer l'augmentation de l'épaisseur du TASC, il avait été émis l'hypothèse d'un développement supérieur par hypertrophie des adipocytes, dans le cas du régime palme par rapport aux autres régimes expérimentaux. Or, à la lecture des résultats de cellularité présentés dans le tableau 47, nous n'observons pas d'effet de la nature des AG du régime sur le diamètre des cellules. Ainsi, nous pouvons exclure cette hypothèse.

La deuxième hypothèse envisagée était de considérer que le TASC du dos des porcs avait accru son épaisseur par un recrutement de nouveaux adipocytes. Cette hypothèse est aussi infirmée puisque le nombre d'adipocytes par g de tissu n'est pas significativement influencé par la nature des AG alimentaires distribués aux porcs.

3.8. Paramètres sanguins

Les résultats des paramètres sanguins (cholestérol, triglycérides, glucose, HDL-cholestérol et LDL-cholestérol) sont présentés dans le tableau 49.

La nature des AG présents dans l'alimentation n'influence pas de manière significative les différents paramètres sanguins dosés. Ces résultats sont à l'encontre des éléments connus de part la bibliographie. Les AG polyinsaturés sont connus comme pouvant participer à la diminution de paramètres sanguins. Les AG n-3 sont connus pour permettre la diminution du taux de triglycérides sanguins (Jacotot, 1988; Simopoulos, 1991) alors que les AG n-6 sont réputés comme participant à la diminution de l'hypercholestérolémie (Simopoulos, 2008).

Les teneurs en cholestérol total ($p < 0,001$) ainsi qu'en HDL ($p < 0,01$) et en LDL ($p < 0,05$) cholestérol sont significativement influencées par la durée de distribution des régimes aux porcs. Ces teneurs sont plus faibles pour la distribution de 50 à 105 kg quel que soit le régime. Nous n'avons pas d'hypothèse pour expliciter ces variations.

3.9. β -oxydation : mesure de l'activité de la β -hydroxyacyl Coenzyme A dehydrogenase

La β -hydroxyacyl Coenzyme A dehydrogenase (HAD) intervient dans le métabolisme énergétique en permettant, à partir d'AG, de fournir des acetyl CoA qui entreront dans le cycle de Krebs, fournissant ainsi de l'énergie. La HAD est considérée comme étant l'enzyme

Tableau 50. Mesure de l'activité de la β -hydroxyacyl Coenzyme A dehydrogenase des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en μmol de NADH disparue/ min / g de muscle.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	R
<i>Longissimus dorsi</i>	5,14	5,10	5,45	0,96	NS
<i>Semimembranosus</i>	6,88	7,00	7,48	1,52	NS

ETR : écart type résiduel ; E : effet régime ; NS : $p > 0,05$

Tableau 51. Enzymes de la lipogenèse des porcs charcutiers.

	Palme		Tournesol		Lin	Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
Tissu adipeux sous cutané dorsal								
ACC	4,21 ^a	2,56 ^b	2,60 ^b	3,79 ^{ab}	4,30 ^a	1,59	*	NS
FAS	41,55	38,61	40,73	44,41	41,97	10,19	NS	NS
EM	637,05	613,38	619,33	588,42	575,62	138,26	NS	NS
G6PDH	161,64	151,63	159,5	164,14	169,51	32,91	NS	NS
Panne								
FAS	55,94	50,86	53,38	50,73	50,03	16,67	NS	NS
EM	926,71	702,7	829,82	679,8	634,76	369,03	NS	NS
G6PDH	218,87	178,75	224,82	169,26	192,14	69,22	NS	NS
Tissu adipeux intermusculaire								
FAS	15,63 ^b	22,04 ^b	13,47 ^b	39,2 ^a	17,52 ^b	11,33	*	***
EM	248,17 ^b	309,18 ^b	301,89 ^b	497,86 ^a	352,49 ^b	138,07	**	NS
G6PDH	94,78	110,65	104,67	144,36	127,92	46,87	NS	NS
Muscle longissimus dorsi								
ACC	0,19	0,3	0,26	0,25	0,34	0,11	NS	NS
FAS	0,07	0,83	0,61	0,63	0,7	1,31	NS	NS
EM	16	15,98	19,8	16,48	17,74	4,79	NS	NS
G6PDH	ND	ND	ND	ND	ND	-	-	-
Muscle semimembranosus								
FAS	0,03	-	0,08	-	0,02	0,23	NS	-
EM	5,7	-	6,64	-	6,78	1,01	NS	-
G6PDH	ND	-	ND	-	ND	-	-	-
Foie								
FAS	5,32	-	4,85	-	4,25	1,05	NS	-
EM	8,58	-	10,14	-	6,43	3,32	NS	-
G6PDH	11,55	-	11,54	-	9,73	2,42	NS	-

L'activité de Acetyl-CoA-carboxylase est exprimée en $\text{nmol HCO}_3^- \text{incorpé} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg protéines}^{-1}$

L'activité de la Fatty acid synthase est exprimée en $\text{nmol NADPH} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg protéines}^{-1}$

L'activité de la Glucose-6-phosphate dehydrogenase est exprimée en $\text{nmol NADPH} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg protéines}^{-1}$

L'activité de l'enzyme malique est exprimée en $\text{nmol NADPH} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg protéines}^{-1}$

ETR : écart type résiduel ; ND : non détectable ;

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité $P < 0,05$;

NS : $p > 0,05$; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$

limitante de l'hélice de Lynen. L'activité de cette enzyme ne varie pas dans nos conditions expérimentales (tableau 50). Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Jakobsen et al. (1995), Lauridsen et al. (1997) ainsi que par Lauridsen et al. (2000).

3.10. Enzymologie

3.10.1. Enzymes de la lipogenèse

Les activités des l'acetyl-CoA-carboxylase (ACC), synthase des acides gras (FAS), glucose-6-phosphate-déshydrogénase (G6PDH) et de l'enzyme malique (EM) sont mesurées dans 3 tissus adipeux (tissu adipeux sous cutané dorsal, panne et tissu adipeux intermusculaire du jambon), 2 muscles (*longissimus dorsi* et *semimembranosus*) ainsi que dans le foie. Les résultats sont présentés dans le tableau 51.

L'activité de ces enzymes est plus faible au sein des muscles LD et SM comparé aux tissus adipeux et au foie. En effet, chez le porc la lipogenèse est essentiellement située au sein des tissus adipeux puisque 80 % des lipides y sont synthétisés (O'Hea et Leveille, 1969a). Le porc se différencie des autres espèces comme le poulet où le foie participe à plus de 90 % à la synthèse des AG (O'Hea et Leveille, 1969b).

Au sein des tissus adipeux, tous ne semblent pas avoir la même capacité en ce qui concerne les activités des enzymes de la lipogenèse (Anderson et al., 1972). En effet, la lipogenèse varie selon la localisation des tissus adipeux. La mesure de l'activité de la FAS, enzyme terminale de la lipogenèse qui conduit à la synthèse d'un acide palmitique, nous montre que la panne a une activité lipogénique supérieure à celles des tissus adipeux sous cutané du dos et du tissu intermusculaire du jambon. Ces résultats de mesure d'activité de la FAS sont similaires à ceux des enzymes fournisseuses de cofacteurs NADPH indispensables pour le déroulement de la lipogenèse. Ces résultats sont déjà connus (Mourot et al., 1995b). Des auteurs ont même réussi à discriminer les différentes couches constitutives du tissu adipeux sous cutané du dos (de 2 à 3 couches) où la couche interne présente une activité lipogénique plus importante par rapport à la ou les couches externes (Camara et al., 1996).

Les activités des enzymes de la lipogenèse au sein du foie des porcs présentent des niveaux intermédiaires entre les tissus adipeux et les tissus musculaires.

Les tissus musculaires présentent globalement les mêmes niveaux en terme de mesure des activités des enzymes de la lipogenèse à l'exception de l'EM au sein du muscle LD des porcs dont l'activité est environ 3 fois supérieure à l'activité dans le muscle SM.

L'activité de l'ACC est significativement influencée par la nature des AG présents dans les régimes au sein du tissu adipeux sous cutané dorsal ($p=0,012$). L'activité de l'ACC est plus importante dans les TASCDC des porcs nourris au lin en comparaison au régime tournesol. Au sein des autres tissus, aucun effet significatif n'est observé.

Seule l'activité de la FAS au sein du tissu adipeux intermusculaire est significativement influencée par la nature des AG présents dans l'alimentation des porcs ainsi que par la durée de distribution. L'activité de la FAS est plus faible pour une durée de distribution plus importante (50-105 kg) dans le cas de la distribution du régime lin. Les porcs nourris au lin ont aussi une activité de la FAS plus importante que ceux nourris au tournesol ou au régime palme. Au sein des autres tissus, aucun effet significatif n'est observé.

A l'image de la FAS, seul le tissu adipeux intermusculaire du jambon présente une activité de l'EM significativement influencée par la nature des AG. Cette dernière est globalement plus importante dans le cas de la distribution de lin aux porcs.

L'activité de la G6PDH ne varie pas dans nos conditions expérimentales.

La mesure de l'activité de l'ACC, enzyme clé de la lipogénèse (Numa et al., 1970), et particulièrement chez le porc (Mersmann et al., 1973; Scott et al., 1981) nous donne un bon indicateur du potentiel du métabolisme lipogénique de l'animal. Mais, l'augmentation de la lipogénèse ne s'accompagne pas obligatoirement d'une augmentation de la teneur en lipides des tissus. En effet, au niveau du TASCDC, bien que l'activité de la FAS soit augmentée par la distribution du régime lin au porc, il n'y a pas d'augmentation de la teneur en lipides. L'explication viendrait d'un manque de cofacteurs NADPH puisque les activités des enzymes qui les fournissent (EM et G6PDH) ne sont elles pas significativement augmentées. Cependant, il ne faut pas oublier que nous mesurons un potentiel d'activité et non l'activité réelle. La FAS, bien que son potentiel la pousse à avoir une activité plus importante ne le peut à cause de la production limitée en NADPH.

Cette hypothèse n'est par contre plus valable pour le TA intermusculaire du jambon. Il y a une augmentation de l'activité de la FAS ainsi que de l'EM dans le cadre de la distribution du régime lin aux porcs. Mais, la teneur en lipides totaux au sein de ce même tissu conduit à des résultats contradictoires (teneur en lipides totaux élevée pour les porcs ayant reçu un régime lin pendant une durée longue face à une teneur en lipides totaux faibles pour les porcs ayant reçu un régime lin pendant une durée courte). Nous n'avons pas d'hypothèse à proposer quant à ces variations d'activité au sein de ce tissu.

Tableau 52. Activités delta-9 désaturases mesurées sur le foie, le tissu adipeux sous cutané dorsal ainsi que sur le muscle *longissimus dorsi* des porcs nourris aux régimes palme, tournesol et lin. Les résultats sont exprimés en nmol d'acide oléique formé par heure et par mg de protéines.

	Régimes expérimentaux			Statistiques	
	Palme	Tournesol	Lin	ETR	Régime
Tissu adipeux sous cutané dorsal	70,1	76,1	57,8	20,5	NS
Muscle <i>longissimus dorsi</i>	0,4	0,2	0,2	0,4	NS
Foie	22,2	17,4	19,1	9,8	NS

ETR : écart type résiduel ; NS : non significatif $p > 0,05$

3.10.2. Enzymes désaturases

Les désaturases jouent un rôle essentiel dans la synthèse des AG insaturés. L'enzyme désaturase $\Delta 9$ permet la synthèse des AG monoinsaturés à partir des AG saturés. C'est notamment cette enzyme qui à partir de l'acide stéarique (C18:0) permet la synthèse de l'acide oléique (C18:1 n-9). Les enzymes $\Delta 5$ et $\Delta 6$ participent à la synthèse des AG polyinsaturés à longue chaîne. Ces enzymes utilisent en tant que substrat les AG n-6 et n-3 de manière similaire, même si ces derniers sont considérés comme étant le substrat privilégié des enzymes désaturases (Plourde et Cunnane, 2007), elles justifient en partie à ce titre un juste équilibre entre ces deux familles d'AG. Ce sont elles qui sont considérées comme limitantes dans ces étapes de biosynthèse.

Les activités des trois enzymes désaturases ont été dosées. Cependant, les mesures des activités des enzymes $\Delta 5$ et $\Delta 6$ n'ont pas données une activité détectable. Ceci s'explique par la faible activité de ces enzymes chez les mammifères, y compris le porc (Plourde et Cunnane, 2007). De plus, ces derniers étant abattus à un stade avancé, l'âge de l'animal participe à la baisse de l'activité des enzymes (Dinh et al., 1995). Enfin, dans le cadre de notre étude, les animaux étaient mis à jeun à l'abattage, ceci pour répondre aux normes en vigueur dans l'industrie porcine. Or, les enzymes désaturases sont sensibles au statut nutritionnel (Brener et al., 1989).

Néanmoins, nous avons réussi à réaliser la mesure de l'activité de l'enzyme $\Delta 9$ dans le foie des porcs nourris aux régimes palme, tournesol ou lin (tableau 52).

L'activité de l'enzyme désaturase $\Delta 9$ est différente d'un tissu à un autre. Elle est plus importante au sein du tissu adipeux sous cutané dorsal qu'au sein du foie alors qu'au sein du muscle *longissimus dorsi*, elle est au seuil de la détection (entre 0,2 et 0,4 nmol d'acide oléique formée / h / mg de protéines).

La nature des AG présents dans l'alimentation ne fait pas varier de manière significative l'activité de l'enzyme $\Delta 9$ désaturase. Il est néanmoins à noter que les écarts types sont très importantes ce qui masquerait toute signification. Ces résultats entrent en contradiction avec ceux trouvés précédemment par Kouba et Mourot (1998) ainsi que par Kouba et al., (2003) qui avaient montré respectivement une baisse de l'activité de la $\Delta 9$ désaturase par l'introduction de LA ou d'ALA dans la ration alimentaire du porc.

Tableau 53. Effet des régimes sur les tests consommateurs. Les appréciations sont notées de 1 à 7 et les intentions de reconsommation sont exprimées en pourcentage.

Produits de charcuterie	Régimes	Appréciation globale	Intention de reconsommation
Andouilles	Palme	4,8 ± 1,6	62%
	Tournesol	4,8 ± 1,5	62%
	Lin	4,7 ± 1,5	63%
Longe de porc	Palme	5,1 ± 1,3 ^a	65%
	Tournesol	4,3 ± 1,6 ^b	53%
	Lin	4,1 ± 1,6 ^b	47%
Jambon cuit	Palme	4,2 ± 1,6	53%
	Tournesol	4,5 ± 1,3	63%
	Lin	4,0 ± 1,5	53%
Poitrine fume / salée	Palme	3,9 ± 1,6	40%
	Tournesol	3,7 ± 1,6	37%
	Lin	3,7 ± 1,8	35%
Pâté de campagne	Palme	4,5 ± 1,5 ^a	57% ^a
	Tournesol	4,5 ± 1,5 ^a	48% ^a
	Lin	3,1 ± 1,7 ^b	27% ^b

n=60 individus par produit de charcuterie.

Les moyennes affectées d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de probabilité P<0,05

L'enzyme $\Delta 9$ désaturase synthétise les AG monoinsaturés depuis les AG saturés, à savoir, essentiellement le C16:0 en C16:1 et le C18:0 en C18:1 (Bloomfield et Bloch, 1960 ; Marsh et James, 1962). D'après nos résultats au sein des tissus adipeux, nous avons bien une baisse de la proportion en C18:1 n-9 avec les régimes riches en AGPI. Nos résultats de composition en AG des tissus étaient cohérents avec la bibliographie (Romans et al., 1995a et b ; Specht-Overholt et al., 1997 ; Matthews et al., 2000). Ainsi, il s'agirait plus d'un souci méthodologique lors du dosage de l'activité de la $\Delta 9$ désaturase, plutôt qu'un effet non significatif des régimes sur son activité. En effet, le C18:1 n-9, produit de la désaturation de la $\Delta 9$ désaturase est significativement influencé par les régimes, laissant penser à une $\Delta 9$ active.

3.11. Analyses sensorielles des produits de charcuterie

Les analyses sensorielles par un panel de consommateurs et par l'évaluation avec un jury expert ont été réalisées par ADRIA DEVELOPPEMENT. Il nous apparaissait utile de faire figurer ces résultats dans le manuscrit de thèse comme complément d'information.

3.11.1. Etude consommateur

L'appréciation globale des produits de charcuterie ainsi que les intentions de reconsommation ont été évaluées par le panel de consommateurs sélectionnés (tableau 53).

Quel que soit le régime alimentaire attribué aux porcs, les produits de charcuterie comme l'andouille, la poitrine fumée / salée et le jambon cuit ont des notes d'appréciation globale non significativement différentes pour un type de produits donné. La longe de porc du régime palme est significativement plus appréciée que les longes de porcs issues des régimes lin et tournesol. Les pâtés de campagne issus des porcs ayant reçu les régimes palme et tournesol sont significativement plus appréciés que le pâté de campagne issu des porcs ayant reçu le régime lin.

Les intentions de reconsommation des produits de charcuterie tels que l'andouille, la longe de porc, le jambon cuit, la poitrine fumée/salée sont identiques quel que soit le régime des porcs. Ces taux d'intention de reconsommation sont classiquement rencontrés pour des produits de ce genre. Les intentions de reconsommation du pâté de campagne issus de porc ayant ingéré du lin sont plus faibles par rapport aux pâtés de campagne des lots palme et tournesol.

L'appréciation globale des produits ainsi que les intentions de reconsommation peuvent être mise en parallèle avec la composition en AG des tissus. En effet, dans la littérature, la richesse en AG polyinsaturés est généralement inversement corrélée avec la flaveur des produits de charcuterie, ceci au contraire des AG saturés et monoinsaturés (Malmfors et al., 1978b ;

Tableau 54. Analyse par le jury expert des produits de charcuterie. Seuls sont présentés les descripteurs discriminants des produits de charcuterie du lot lin.

Produit de charcuterie		Descripteurs discriminants
Jambon cuit	Aspect	Intensité de la couleur rose Homogénéité de la couleur Contraste de la couleur
	Aspect avant cuisson	Couleur blanche du gras Bordure jaune, marron
Poitrine fumée / salée	Aspect après cuisson	Quantité de gras Grillé
	Odeur après cuisson	Fumée Viande grillée
	Goût	Fumé
	Texture	Gras en bouche
Pâté de campagne en conserve	Aspect	Couleur beige Présence de gelée périphérique
	Odeur	Intensité de l'odeur globale
	Goût	Salé

Hertzman et al., 1988 ; Cameron et Enser, 1991 ; Cameron et al., 2000). L'explication viendrait de la susceptibilité à la peroxydation des AG polyinsaturés. La production de malondialdéhyde est liée à la production de metmyoglobine, pigment brun (Jensen et al., 1997) et donnerait un produit plus sombre et dégageant des odeurs de rance (Romans et al., 1995a) et ainsi le rejet de la part du consommateur.

Cependant, globalement les produits enrichis en AG n-3 ont des intentions de reconsommation équivalentes à ceux du lot palme, à l'exception du pâté de campagne.

3.11.2. Jury expert

Les résultats sont présentés dans le tableau 54.

3.11.2.1. *Jambon*

Le profil sensoriel réalisé sur le jambon nous apprend que 3 descripteurs sur 46 sont discriminants au seuil de 5 % : intensité de la couleur rose ; homogénéité de la couleur ; contraste de la couleur.

Les trois jambons sont très proches d'un point de vue sensoriel, puisque seuls trois descripteurs sont discriminants. Sur ces derniers, l'analyse de variance permet de mettre en avant des caractéristiques propres à chaque produit :

- Le jambon « lin » a une couleur significativement plus contrastée que le jambon tournesol ;
- Le jambon « tournesol » a une couleur significativement plus homogène que les deux autres jambons ;
- Le jambon « palme » a une couleur rose significativement plus intense que les deux autres jambons.

3.11.2.2. *Poitrine fumée/salée*

Le profil sensoriel réalisé sur la poitrine fumée/salée nous apprend que 7 descripteurs sont discriminants, sur les 48 du glossaire, au seuil de 5 % : Aspect avant cuisson (couleur blanche du gras ; bordure jaune, marron) ; Aspect après cuisson (quantité de gras ; grillé) ; Odeur après cuisson (fumée ; viande grillée) ; Goût (fumé) ; Texture (gras en bouche)

L'analyse de variance permet de mettre en avant des caractéristiques propres à chaque produit :

- La poitrine fumée « lin » a une couleur du gras significativement plus blanche (avant cuisson) que les deux autres ;
- la poitrine fumée « tournesol » est significativement plus grillée, a une odeur fumée et de viande grillée (après cuisson) significativement plus intense que les deux autres et un goût significativement plus fumé que la poitrine « lin » ;
- la poitrine « palme » a une bordure jaune significativement plus importante avant cuisson que les deux autres, une quantité de gras significativement supérieure (après cuisson) à la poitrine « lin » et significativement plus de gras en bouche (texture) que les deux autres.

3.11.2.3. *Pâté de campagne*

Pour le pâté de campagne, au risque de 5 %, 8 descripteurs sont discriminants sur les 44 du glossaire, à savoir : Aspect (couleur beige ; présence de gelée périphérique) ; Odeur (intensité de l'odeur globale) ; Goût (salé ; goût d'oignons) ; Texture (ferme ; collante ; fondant).

L'analyse de variance permet de mettre en avant des caractéristiques propres à chaque produit :

- le pâté de campagne « lin » a une odeur globale significativement plus intense que les deux autres pâtés, un goût significativement moins salé que les deux autres pâtés, un goût d'oignons significativement plus intense que le pâté « palme », ainsi qu'une texture significativement plus ferme et moins collante que les deux autres pâtés ;
- le pâté « tournesol » a une texture significativement plus fondante que le pâté « lin » ;
- le pâté « palme » a une couleur beige significativement plus importante que le pâté « lin », il a une présence de gelée périphérique significativement plus importante que le pâté « tournesol ».

3.12. Qualité technologique des produits de charcuterie enrichis en acides gras polyinsaturés

Les paramètres de la qualité technologique des produits de charcuterie confectionnés à partir de porcs nourris aux régimes palme, tournesol et lin ont été réalisés par ADRIA DEVELOPPEMENT. Il nous apparaissait utile de les faire figurer dans le manuscrit de thèse comme complément d'information.

Tableau 55. Propriétés des protéines du foie et des tissus musculaires *semimembranosus* et *longissimus dorsi*.

		effet du remplacement du standard par:			
		lin (oméga 3)		tournesol (oméga 6)	
		% de variation	risque α	% de variation	risque α
muscle semi-membranosus	protéine totale	-		-	
	solubilité des protéines	+ 30%		+ 50%	
	capacité émulsifiante de la viande	+4%	$\alpha=5\%$		
	stabilité de l'émulsion	-		-	
	perte en eau	- 14%	$\alpha=5\%$		
muscle longissimus dorsi	protéine totale	-		-	
	solubilité des protéines	+ 13%		-	
	capacité émulsifiante de la viande	+4%	$\alpha=5\%$	-	
	stabilité de l'émulsion	-		-	
	perte en eau	- 16%	$\alpha=1\%$	-	
foie	protéine totale	-		-	
	solubilité des protéines	-		-	
	capacité émulsifiante de la viande	-		-	
	stabilité de l'émulsion	+5%	$\alpha=1\%$	-	
	perte en eau	-70%	$\alpha=1\%$	-30%	$\alpha=5\%$

Les résultats sont présentés dans les tableaux 55 à 57. Il y figure le *pourcentage de variation* mesuré entre le régime palme et le régime lin ou tournesol. Le risque α correspond au risque d'erreur. Lorsque la différence n'est pas significative au seuil de 5 %, la valeur du risque α n'est pas indiquée. Seuls les résultats significatifs sont représentés.

3.12.1. Propriétés fonctionnelles de la viande de porc : cas du foie et des tissus musculaires semimembranosus et longissimus dorsi.

3.12.1.1. *Propriétés des protéines et émulsions*

L'alimentation des porcs avec un régime à base de lin modifie les propriétés des protéines des muscles et du foie (tableau 55). La solubilité des protéines est augmentée de 30 % et de 13 % au sein des muscles SM et LD, respectivement, sans faire varier de manière significative la teneur en protéines totales de ces derniers. Cette hausse de la solubilité des protéines salino-solubles peut s'expliquer par la présence d'AG n-3 à longue chaîne au sein des membranes des cellules, entraînant ainsi une plus grande fluidité membranaire. Ainsi, il pourrait y avoir une augmentation de l'entrée des acides aminés dans le cytoplasme cellulaire qui expliquerait en partie l'augmentation de la part des protéines salino-solubles. Toutefois, nous pouvons supposer que cela s'accompagnerait également d'une augmentation de la teneur en protéines totales dans le muscle, or la teneur en protéines totales reste constante quel que soit le régime alimentaire. La solubilité des protéines du muscle SM des animaux nourris au régime tournesol est augmentée de 50 % par rapport aux animaux du lot palme sans pour autant augmenter la capacité émulsifiante des protéines et de leur capacité de stabilisation. Or ces dernières sont intimement liées. La capacité émulsifiante des muscles SM et LD des porcs nourris au lin est augmentée de 4 % par rapport aux mêmes muscles de porcs nourris au régime palme. La capacité émulsifiante est en relation directe avec la rétention de la matière grasse par la viande. C'est lors des procédés de confection des matrices (mélange et cuisson) qu'intervient l'importance de la rétention de la matière grasse. Les pertes en eau sont diminuées au sein des muscles SM et LD de 14 % et de 16 %, respectivement, par rapport au même muscle de porcs nourris au régime palme. La diminution des pertes en eau au sein des muscles permet d'avoir un meilleur rendement de production. De plus, une viande avec des pertes en eau diminuées aura une meilleure jutosité et sera plus appréciée par le consommateur.

La composition du foie des porcs est très peu influencée par la nature des régimes. Seuls les foies des animaux nourris au lin ont une légère hausse de la stabilité de l'émulsion (+ 5 %) par rapport aux foies des animaux du lot palme. La capacité de rétention en eau, bien que déjà très

Tableau 56. Propriétés mécaniques et capacités gélifiantes du foie et des tissus musculaires *semimembranosus* et *longissimus dorsi* ainsi que la pénétrométrie au sein du gras de bardière.

		effet du remplacement du standard par:			
		lin (oméga 3)		tournesol (oméga 6)	
		% de variation	risque α	% de variation	risque α
muscle semi-membranosus	force à la rupture	- 17%	$\alpha=1\%$	-	-
	déplacement à la rupture	- 14%	$\alpha=1\%$	-	-
muscle longissimus dorsi	force à la rupture	- 11%	$\alpha=1\%$	- 14%	$\alpha=1\%$
	déplacement à la rupture	- 6%	$\alpha=1\%$	- 9%	$\alpha=1\%$
foie	force à la rupture	-	-	-	-
	déplacement à la rupture	+15%	$\alpha=5\%$	-	-
	couleur (visuel)	+ rouge et - sombre	-	-	-
gras de bardière	force (pénétrométrie)	-50%	$\alpha=5\%$	-50%	$\alpha=5\%$

élevée dans le foie (de l'ordre de 97 à 99 %) est associée à une baisse de 70 % des pertes en eau pour les foies des porcs nourris au régime lin et de 30 % pour les porcs nourris au régime tournesol.

3.12.1.2. Propriétés mécaniques et capacité gélifiante

Les propriétés gélifiantes des muscles LD et SM ainsi que du foie sont évaluées par le test de compression à la rupture d'un gel de viande (tableau 56). Cette mesure de la capacité gélifiante des viandes présente un intérêt dans l'industrie charcutière puisqu'elle permet d'évaluer la capacité des protéines de la viande à se lier entre elles et former un gel résistant. On en imagine tout l'intérêt lors de la confection de saucisses fines de type Knacki (gel continu résistant) et du pâté de campagne (matrice jouant un rôle cohésif entre les différents éléments constitutif du pâté).

Les gels de viande des muscles SM et LD issus de porcs nourris au lin nécessitent une force moindre (SM : -17 % ; LD : -11 %), ainsi qu'un déplacement à la rupture plus faible (SM : -14 % ; LD : -6 %), pour rompre le gel par rapport à celui des animaux du lot palme. Pour les gels des porcs ayant été nourris au tournesol, seul le muscle LD présente une force à la rupture (-14 %) et un déplacement à la rupture (-9 %) plus faible par rapport aux gels des animaux du lot palme. Les AG polyinsaturés, du fait de leur richesse en doubles liaisons, et dans une moindre mesure en carbone, ont un point de fusion plus faible que les AG de type saturés ou monoinsaturés. Ainsi, les matrices riches en AG polyinsaturés sont ainsi plus souples qu'une matrice riche en AG monoinsaturés ou saturés. Ceci est aussi vrai lorsqu'on compare un acide gras n-6 et un acide gras n-3. Ces derniers, à nombre de carbone équivalent, ont une double liaison supplémentaire. Ainsi, nos résultats apparaissent comme cohérents avec la composition en AG des tissus. Ces résultats se retrouvent sur la mesure de la pénétration sur le gras de bardière. Cette dernière est le reflet de l'alimentation de l'animal (Mourot et al., 1994). Ainsi lorsqu'elle est enrichie en AGPI de type n-6 ou n-3, la force à procurer est diminuée de 50 % pour pénétrer le tissu. La bardière a une machinabilité (température de fusion et texture) plus faible, ce qui pourrait provoquer des soucis lors des étapes de confection des produits de charcuterie.

Etonnamment, les foies des porcs nourris aux différents régimes riches en AGPI ne présentent pas une diminution de la force à la rupture, mais une augmentation du déplacement nécessaire pour rompre le gel. Ces résultats peuvent sembler être contradictoires avec l'augmentation de la proportion en AG n-3 des porcs nourris au lin.

Tableau 57. Propriétés fonctionnelles des produits transformés : cas de la mousse de foie et de la saucisse fine

mousse de foie	effet du remplacement du standard par:			
	lin (oméga 3)		tournesol (oméga 6)	
	% de variation	risque α	% de variation	risque α
force à la rupture	- 11%	$\alpha=5\%$	+ 11%	$\alpha=1\%$
déplacement à la rupture	-		-	
force en pénétrométrie	- 22%	$\alpha=1\%$	- 16%	$\alpha=1\%$
couleur	+ sombre et + rouge		-	
rendement technologique	-		-	

saucisses fines	effet du remplacement du standard par:			
	lin (oméga 3)		tournesol (oméga 6)	
	% de variation	risque α	% de variation	risque α
test de tranchage :				
force à la rupture	+ 10%	$\alpha=5\%$	- 10%	$\alpha=5\%$
déplacement à la rupture	-		-	
test de flexion trois points :				
force à la rupture	+ 25%	$\alpha=1\%$	- 20%	$\alpha=1\%$
déplacement à la rupture	-		-	
couleur	- sombre		-	
rendement technologique	-		-	

3.12.2. Propriétés fonctionnelles des produits transformés

3.12.2.1. *Mousse de foie*

La force à la rupture des mousses de foie des porcs nourris au lin est inférieure à celle des mousses de foie des porcs nourris au régime palme (+11 % pour les mousses de foie des porcs nourris au tournesol) (tableau 57). La force à fournir pour le test de pénétrométrie réalisé sur les mousses de foie des porcs nourris au lin est inférieure de 22 % aux mousses du lot palme, contre une baisse de 16 % pour le lot tournesol. Les résultats obtenus lors des tests de pénétrométrie et d'écrasement donnent des résultats allant dans le même sens, et montrent que les mousses de foie de porcs nourris au lin ont des propriétés gélifiantes plus faibles que les mousses de foie préparées avec les porcs des lots palme et tournesol. Les mousses de foie préparées avec du porc ayant reçu du lin sont donc moins fermes et plus facilement tartinables.

Les paramètres de couleur des mousses de foie des porcs nourris au régime lin montrent une matrice plus sombre et plus rouge que celle des lots palme et tournesol. Cette différence de coloration n'est pas due aux foies en eux-mêmes. Des mesures de couleurs de ces derniers ont été réalisées à l'abattoir (non présenté) et ne présentaient pas de différences significatives (même si l'écart type était élevé). Cet aspect sombre pourrait néanmoins être dû à une oxydation accrue des AG n-3 par rapport aux mousses de foie des porcs nourris au tournesol et au régime palme. Un fort degré d'insaturation conduit à une viande plus sombre (Jensen et al., 1997)

3.12.2.2. *Saucisse fine*

Les tests mécaniques montrent une résistance plus importante pour les saucisses fines issues du régime lin (tableau 57). Ces saucisses sont plus résistantes à la flexion (elles résistent plus longtemps à une déformation en flexion), elles nécessitent une énergie de tranchage plus importante. Ces résultats sont en opposition avec ceux trouvés précédemment (les capacités gélifiantes des viandes de porcs issus du régime lin sont plus faibles que celles venant des porcs issus du régime palme). Les propriétés mécaniques des produits de charcuterie ne semblent donc pas directement liées aux capacités gélifiantes des muscles. Les agents texturant pourraient masquer les effets observés sur les matières premières.

L'analyse colorimétrique des saucisses fines des porcs nourris au régime lin met en avant une matrice plus claire que celle des porcs nourris au régime palme et au régime tournesol. Ces résultats ne sont pas en accord avec les mesures effectuées sur la mousse de foie mais sont

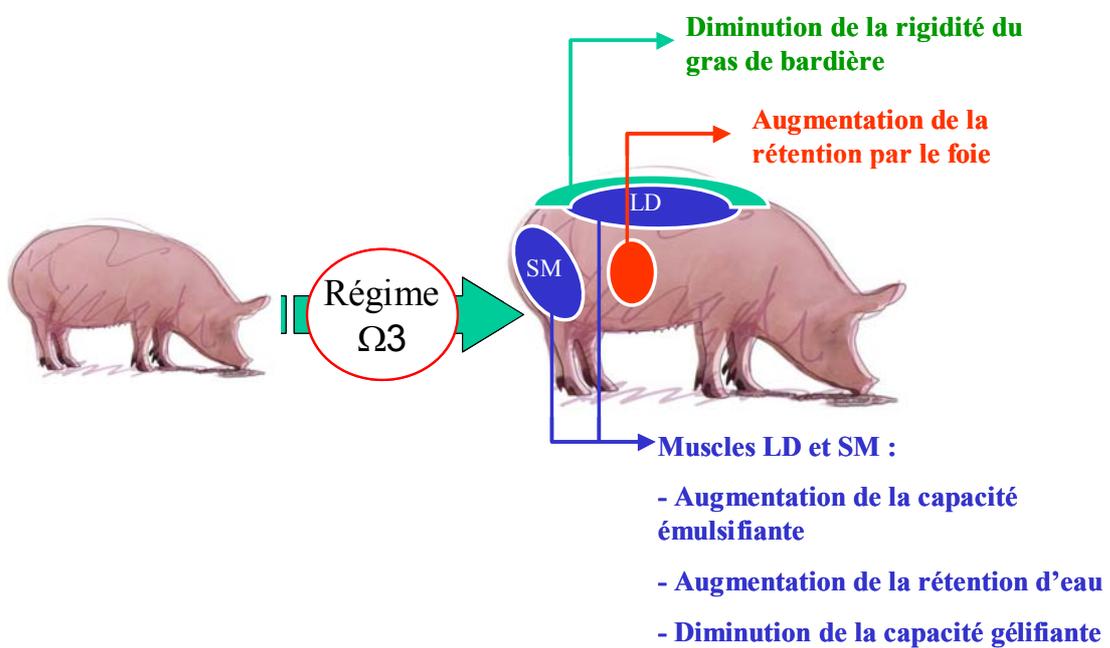


Figure 31. Influence d'une alimentation à base de lin sur les propriétés techno-fonctionnelles de différentes pièces du porc (LD : *longissimus dorsi*, SM : *semi-membranosus*)

néanmoins en accord avec d'autres auteurs qui ont observé une viande plus claire lors d'une supplémentation en lin (Warnants et al., 1995 ; Van Oeckel et al., 1996).

La distribution du régime à base de lin entraîne une modification importante des propriétés fonctionnelles de la viande de porc (figure 31). Nous pouvons remarquer : (i) une augmentation de la solubilité des protéines, de la capacité émulsifiante et de la rétention d'eau des viandes, (ii) une diminution des propriétés gélifiantes des viandes, (iii) une augmentation de la capacité de rétention d'eau par le foie et enfin, (iv) une diminution de la rigidité du gras de bardière.

Ces résultats peuvent avoir un effet bénéfique ou non selon le produit dans lequel la matière première sera utilisée. La diminution des pertes en eau est un point positif pour les produits tels que le jambon, par contre, la diminution des propriétés gélifiantes des viandes peut rendre moins cohésives des matrices complexes (assemblage de nombreux éléments) comme le pâté de campagne. La diminution de la rigidité du gras de bardière peut être un point positif pour l'obtention d'une meilleure stabilisation de la matière mais peut également être un risque de formation de poche de gras.

Ainsi, les AG présents dans l'alimentation influencent les propriétés techno-fonctionnelles de la viande de porc. Mais, contrairement aux idées véhiculées par le passé, l'introduction d'AG polyinsaturés, et notamment d'AG n-3 ne se fait pas en la défaveur de la viande de porc ou des produits de transformation. Avec un apport dans l'alimentation des graines de lin de manière raisonnée et une introduction d'antioxydants, la qualité technologique de la viande de porc n'est pas altérée, permettant ainsi la distribution aux consommateurs de produits au moins équivalents à des produits standards en terme de goût et texture.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au travers de cette étude nous avons pu mettre en évidence divers points.

La durée et le niveau de supplémentation apparaissent comme un élément clé pour déterminer la meilleure stratégie à acquérir quant à l'augmentation de la qualité nutritionnelle de la viande de porc. Nous avons pu, au cours de cette étude, faire varier la durée d'apport de régimes à base de lin sur une période conventionnelle (2 mois) à une période plus courte (1 mois). Si nous nous plaçons à l'échelle de l'animal, il n'y a pas eu d'effets significatifs sur les paramètres zootechniques ainsi que d'effets majeurs sur la qualité technologique de la carcasse de porc. Par contre, la composition en AG est modifiée par l'ajout de graines de lin

extrudées dans les régimes. Ce point confirme les études précédentes menées au sein du laboratoire ainsi que la multitude de références bibliographiques traitant de ce sujet.

Mais il s'agit surtout de l'augmentation de la durée de distribution des régimes qui a permis d'augmenter la qualité nutritionnelle de la viande de porc et ceci sans modifier la teneur en lipides des tissus. En effet, passer d'une période de distribution de un mois du régime lin à une période de deux mois permet, en outre, d'augmenter le dépôt du précurseur ALA au sein des tissus, une hausse de la proportion en AG polyinsaturés n-3 à longue chaîne tels que l'EPA et le DPA et ceci aussi bien dans les tissus adipeux que dans le muscle *longissimus dorsi*. L'augmentation de la proportion en AGPI n-3 à longue chaîne au sein du muscle LD se fait aussi bien dans la fraction des lipides neutres mais surtout dans la fraction des lipides polaires, à savoir la membrane phospholipidique. La localisation des AG d'intérêts au sein de la membrane phospholipidique leur permettra d'être protégés naturellement de la lipoperoxydation si la vitamine E est présente en quantité suffisante. De plus, augmenter la part des AG n-3 dans la membrane permet de participer à la régulation des rôles qu'elle peut jouer d'un point de vue physiologique (les AGPI n-3 rendent plus fluide la membrane et ainsi augmentent les échanges). Cette augmentation des AG n-3 à longue chaîne ne se poursuit peu ou pas jusqu'à l'acide gras terminal DHA. Il subsiste un blocage qui n'est pas expliqué actuellement. Cela reste un point de perspective quant à la compréhension des mécanismes qui limitent ou remobilisent la synthèse de ce dernier.

Les activités des enzymes de la lipogenèse ne sont globalement pas modifiées, à l'exception de l'ACC et de l'EM pour le tissu adipeux intermusculaire, par la nature des régimes ainsi que par leur durée de distribution. Ces données ont été confirmées par les teneurs en lipides des différents tissus qui ne sont pas modifiées. Par contre, les enzymes participant à la biosynthèse des AG insaturés tels que la $\Delta 9$ désaturase pour les AG monoinsaturés et les $\Delta 5$ et $\Delta 6$ désaturases pour les AG polyinsaturés n'ont pas donné de résultats satisfaisant. Bien que la composition en les différents AGPI apparaisse comme modifiée sur les chromatogrammes en sortie de chromatographie en phase gazeuse, soit nous ne voyons pas d'effets significatifs de la nature des AG ($\Delta 9$) soit nous n'arrivons pas à détecter l'activité ($\Delta 5$ et $\Delta 6$). C'est certainement la multiplication de plusieurs facteurs qui ont conduit à ce résultat (faible activité de désaturation chez le porc ; statut à jeûn de l'animal ; mise au point des méthodes ?).

Ces différents paramètres nous conduisent à dire qu'il est plus intéressant, d'un point de vue quantitatif, d'avoir une distribution du régime lin de 2 mois. La proportion en AG n-3,

particulièrement en ALA, est plus importante. Augmenter la part de ce dernier, permettra une fourniture plus importante de substrat aux enzymes désaturases. Les AG à longue chaîne, avec une proportion plus élevée, sont plus intéressants d'un point de vue physiologique.

La consommation de la viande de porc passe pour partie par la confection de produits de charcuterie. Cette étude nous a permis d'en réaliser un grand nombre avec des teneurs en lipides et des compositions en AG différentes. La charcuterie réalisée à partir de matière première carnée issue de porc nourris par des régimes supplémentés en graines de lin permet d'obtenir des produits de transformation avec une teneur en lipides soit équivalente soit légèrement inférieure et avec un apport significativement plus important quant à la proportion en AG n-3. Cette hausse de la teneur en AG d'intérêt, par rapport au régime palme, débute depuis l'ALA jusqu'au DPA voire même, pour 2 des 12 produits de charcuterie, jusqu'au DHA. La consommation de ces produits de charcuterie, sur la base de 100 g, permet de couvrir jusqu'à près des trois quarts des recommandations journalières faites par l'AFSSA dans sa dernière édition des ANC (2 g / jour). Ces différents produits de charcuterie sont globalement bien acceptés par le consommateur et ne présentent pas de problèmes technologiques, qui pourraient être un souci pour les industriels de la salaisonnerie.

Pour conclure, dans nos conditions expérimentales, la durée de distribution la plus longue du régime enrichi en graines de lin aux porcs, conduit à de la viande ainsi que des produits de charcuterie enrichis en AG n-3 d'une manière significative, couvrant jusqu'à des proportions importantes nos apports en AG n-3. L'enrichissement se fait de manière très importante pour l'ALA et d'une manière plus limitée pour l'EPA et le DPA. Le DHA n'est quant à lui pas augmenté, ce qui semble être pour l'instant non réalisable à moins de l'apporter directement dans l'alimentation du porc. Les activités de désaturation chez le porc sont faibles, tout comme chez l'humain. Ainsi, la consommation de produits issus de la filière animale, permet d'avoir un apport important en ALA, mais aussi en AG à longue chaîne d'une manière, certes, plus limitée. Là où l'animal a arrêté la synthèse des AG à longue chaîne, les consommateurs que nous sommes allons la poursuivre lors de leur consommation. Néanmoins, d'après la dernière édition des apports nutritionnels conseillés (2001), c'est l'apport en ALA qui présente un réel déficit (800 mg en moyenne contre les 2 g recommandés) face aux AG à longues chaînes comme le DHA (250 mg en moyenne contre les 120 mg recommandés). La consommation des produits animaux, qui au cours de leur élevage ont eu des aliments à base

de végétaux riches en AG n-3 comme le lin, répondent ainsi parfaitement aux souhaits de l'AFSSA.

Ces produits sont appréciés par les consommateurs de la même manière que les produits standard et ceci sans soucis majeurs de leurs propriétés techno-fonctionnelles. Néanmoins, lors des études menées sur la peroxydation des lipides, la potentialité à la peroxydation était supérieure lors de la distribution du régime lin aux animaux, sans pour autant créer un rejet par le consommateur. Des travaux supplémentaires sur les antioxydants restent à mener pour tenter de réduire cette susceptibilité à la peroxydation.

ÉTUDE II

-

**EFFET DES APPORTS ET DE LA NATURE DES ACIDES
GRAS N-3 SUR LES PERFORMANCES DE CROISSANCE ET
LA QUALITE NUTRITIONNELLE DE LA VIANDE DE PORC
CHARCUTIER**

Tableau 58. Teneurs en précurseurs des familles d'acides gras polyinsaturés n-6 et n-3 de quelques huiles réputées pour leur richesse en ces dernières. (D'après Karleskind, 1992 et Mourot, communication personnelle)

Huiles	C18:2 n-6	C18:3 n-3	C18:2 n-6/ C18:3 n-3
Carthame	78	< 0,5	> 150
Tournesol	60 - 70	< 1	> 60
Pépins de raisins	60 - 70	0,5 - 1,5	> 50
Maïs	50 - 60	< 1	> 50
Soja	50 - 60	5 - 6	10
Germe de blé	50 - 60	6 - 7	8 - 10
Noix	50 - 60	10 - 12	5
Chanvre	55	15	3,5
Cameline	30 - 40	30 - 40	1
Colza	20 - 30	8 - 10	3 - 4
Noisette	10 - 20	< 1	10 - 25

1. INTRODUCTION

Il existe une relation forte entre les acides gras (AG) ingérés et ceux déposés dans la viande ou les produits animaux. Cette corrélation est importante chez les animaux monogastriques (porc, lapin, volaille, ...) et dans une moindre mesure, du fait des réactions de biohydrogénation au sein du rumen, chez les ruminants. Cette relation est très forte pour les AG polyinsaturés (AGPI) et particulièrement les AGPI de la série n-3 (Chilliard et al., 2008). La quantité d'AG n-3 déposée dépendra de la teneur présente dans l'aliment et également de la biodisponibilité de ces AG (Morise et al., 2005).

Il existe différentes sources végétales riches en acide α -linoléique (ALA) qui peuvent être utilisées en alimentation animale ou humaine (tableau 58). Néanmoins, dans le cas de l'alimentation animale, le prix d'incorporation dans l'aliment sera le facteur limitant. L'huile de colza est la plus connue et la plus utilisée pour apporter de l'ALA (de 8 à 10 % des AG totaux). Le rapport entre les deux précurseurs des familles d'AGPI n-6 et n-3, soit C18:2 n-6 / C18:3 n-3 ou LA /ALA, y est inférieur à 5 et c'est également une des huiles les moins coûteuses. L'huile de noix est aussi une source intéressante d'ALA (10 à 12 %) mais elle semble se conserver moins facilement que l'huile de colza (Reeves et Weihrauch, 1979). L'huile de noix a la même quantité de LA que l'huile de maïs, mais elle contient 10 fois plus d'ALA que cette dernière. L'huile de germe de blé est également une source potentielle d'ALA mais elle n'est pas utilisée en alimentation animale en raison de son coût élevé et de sa faible production. Toutes ces huiles contiennent aussi des teneurs différentes en facteurs antioxydants comme la vitamine E qui vont protéger plus ou moins efficacement les AGPI de la peroxydation (la valeur moyenne étant comprise entre 15 et 30 mg de vitamine E pour 100 g d'huile).

Les matières grasses animales apportent d'une manière générale peu d'ALA, mais néanmoins, les poissons peuvent constituer une source intéressante d'AGPI à longue chaîne (LC) de la famille n-3 comme l'acide eicosapentaénoïque (EPA) et l'acide docosahéxaénoïque (DHA). Les huiles de poisson sont peu utilisées en alimentation animale. Ceci s'explique d'une part par leur coût, elles sont onéreuses à produire et d'autre part elles sont peu abondantes du fait de l'épuisement des stocks mondiaux de poissons (Botsford et al., 1997). Elles sont réservées prioritairement à l'alimentation des poissons dans les fermes aquacoles. De plus, dans le cas de l'élevage de porc, il existe des cahiers des charges qui interdisent l'utilisation de telles huiles pour préserver les qualités technologiques des produits issus du porc. Enfin, l'addition

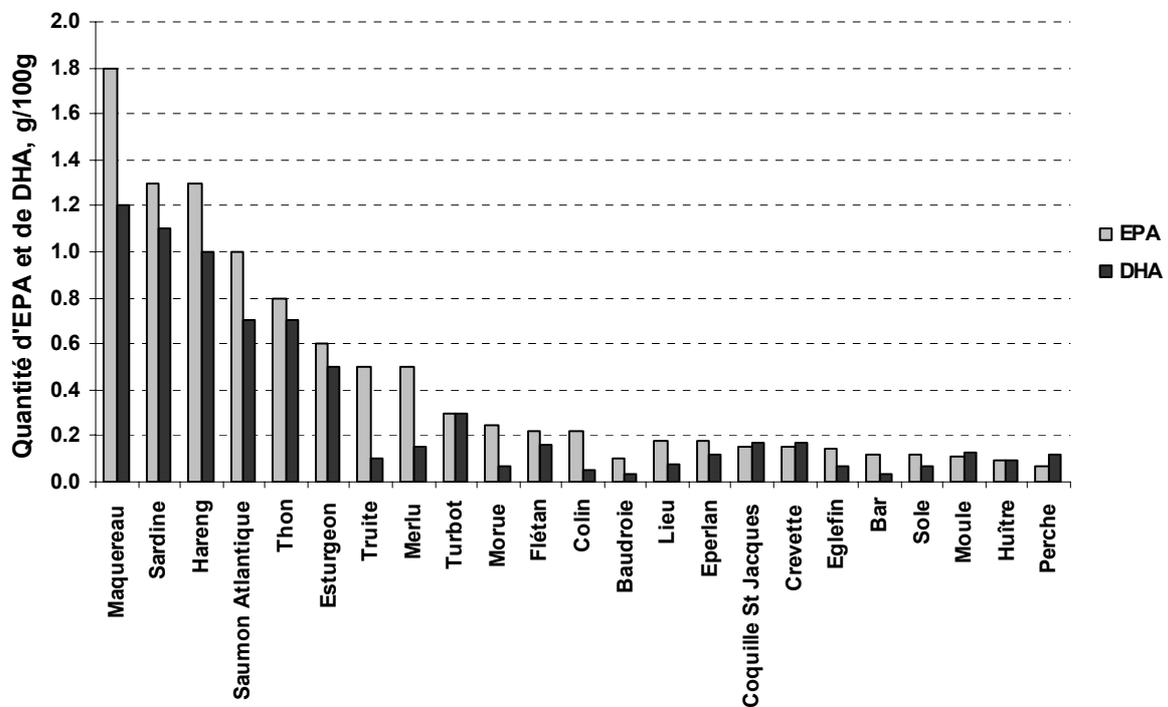


Figure 32. Teneur en acide eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA) de quelques poissons et coquillages (d'après Bourre et al., 2005c ; Bourre et Paquette, 2008 ; Mourot, communication personnelle).

de ces huiles dans la ration alimentaire du porc peut accroître le risque d'odeurs désagréables (Kouba et al., 2006) et de rancidité des produits de transformation (Wood et al., 1999). Dans la figure 32, il est rapporté quelques compositions en AGPI-LC n-3 de poissons et de coquillages. Ces valeurs montrent une grande diversité de leurs teneurs. Les poissons gras vivant en eaux froides sont riches en EPA et DHA. Ce sont principalement le maquereau, la sardine, le hareng, le saumon (surtout sauvage). Ces poissons contiennent environ 7 fois plus d'AG n-3 que d'AG n-6. D'autres poissons gras comme le thon sont assez riches en AG n-3 mais sont susceptibles de contenir de fortes quantités de métaux lourds et de polluants comme les dioxines et les Polychlorobiphényles (PCBs) (Jacobs et al., 1997 ; Bourre et al., 2005c ; Bourre et Paquotte, 2008).

Si la teneur est élevée en AGPI-LC n-3, celle du précurseur ALA est limitée pour la plupart des poissons et fruits de mer. Une étude récente vient de montrer que la dose journalière de 2 g d'ALA apportée par un produit unique nécessiterait la consommation de 90 douzaines d'huitres ou de 650 g de maquereau ou 12 kg de thon rouge (Mourot et al, 2009). Les poissons permettent donc de couvrir efficacement les besoins recommandés en DHA, mais vis-à-vis du précurseur ALA, ils sont à considérer comme l'ensemble des autres produits animaux.

Les algues peuvent aussi être une source d'AG n-3 et principalement de dérivés à longue chaîne (Nettleton, 1991 ; Givens et al., 2000). Les algues océaniques sont riches en DHA. Beaucoup de pays avec une large façade maritime consomment régulièrement plusieurs types d'algues (*Iridaea*, *Porphyra* et *Gymnogongrus* au Chili, *Hypnea musciformis* et *Meristotheca senegalensis* au Sénégal). Dans les pays industrialisés, elles sont consommées essentiellement sous forme de compléments alimentaires. Les algues telles que *Nannochloropsis oculata*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Thalassiosira pseudonana* et *Pavlova lutheri* ont des teneurs élevées en AGPI-LC n-3 (Tonon et al., 2002). En guise d'exemple, *Nannochloropsis oculata* présente une valeur d'EPA de près de 28 % des AG totaux identifiés (Nitsan et al., 1999). D'autres sources de micro-algues sont riches en DHA telles que *Schizochytrium mangrovei* (Jiang, 2004).

1. Parmi les algues non océaniques, il convient de citer la spiruline (*arthrospira*) comme source intéressante d'AG n-3, cette algue présentant aussi un intérêt nutritionnel certain en raison de sa richesse en protéine ayant une composition en acides aminés correspondant aux protéines animales.

Teneur en AGPI- LC n-3

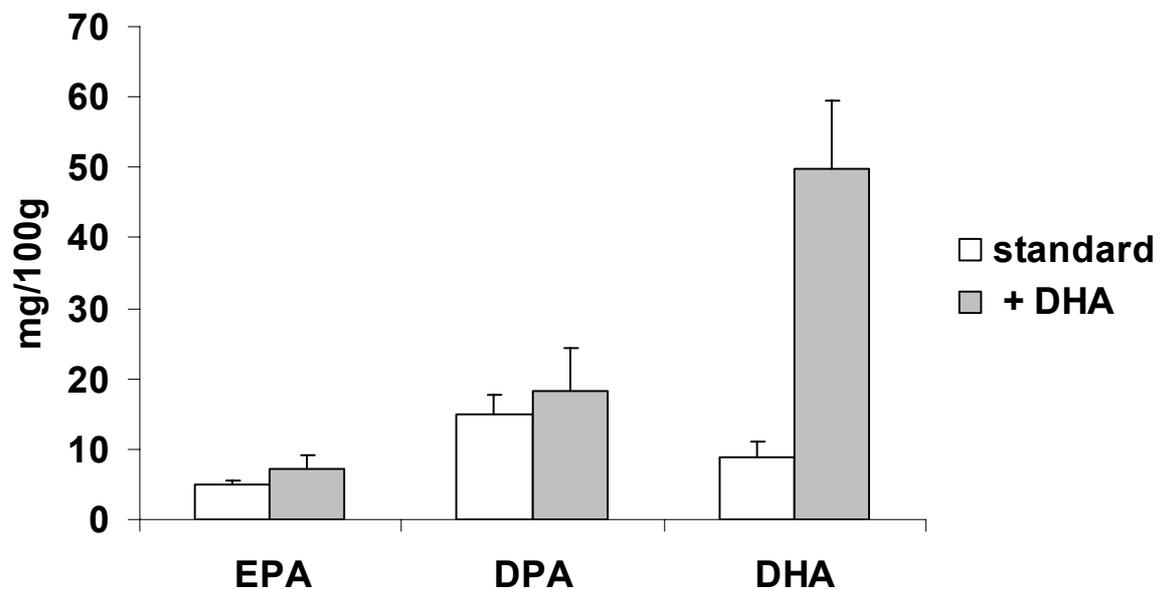


Figure 33. Effets de l'apport en acide docosahexaénoïque par les algues dans l'alimentation du porc sur les dépôts des acides gras polyinsaturés à longue chaîne (AGPI-LC) n-3 [acide éicosapentaénoïque (EPA), acide docosapentaénoïque (DPA), acide docosahexaénoïque (DHA)] dans la côte de porc entière. Le régime témoin apportait 17 mg d'acide éicosapentaénoïque (EPA) par kg aliment et 28 mg de DHA, celui supplémenté en DHA apportait 66 mg d'EPA et 1,2 g de DHA (d'après Mourrot, 2009).

2. Ces algues, en l'état actuel de production et en raison de leur coût, ne sont donc pas destinées à la nutrition animale. Des essais ont été réalisés à titre expérimental en supplémentant le régime de porc avec des algues. Il est possible d'augmenter la teneur en DHA de la viande (Figure 33), mais la teneur en DHA dans l'aliment était multipliée par 40 alors que dans la viande elle est multipliée par 5, ce qui peut laisser supposer une utilisation du DHA dans le métabolisme peroxysomal (Mourot, 2009). L'efficacité d'une telle supplémentation n'est donc pas prouvée même si on arrive à augmenter le DHA dans la viande d'une manière beaucoup plus importante qu'avec un apport du précurseur ALA (Corino et al., 2008).

Outre l'aspect de la richesse en précurseur ALA, il y a aussi la biodisponibilité des AG n-3. Cette biodisponibilité semble différente si l'apport du précurseur est sous forme d'huile ou bien sous forme de graine. Chez le porc, les travaux de Vorin et al. (2003) ont montré que la biodisponibilité était meilleure avec la graine qu'avec l'huile de lin dans des conditions d'apport de précurseur sensiblement équivalentes. L'enrichissement en AGPI n-3 était davantage marqué au niveau du muscle qu'au niveau du tissu adipeux sous-cutané externe. Ceci est contraire aux résultats de Cherian et Sim (1995) concluant que les triglycérides de l'huile de lin sont plus rapidement disponibles que ceux des graines de lin « emprisonnées » dans une structure complexe.

Les graines comportent différents éléments tels que les mucilages et les lignanes apportant des éléments antioxydants protégeant naturellement les AG des phénomènes de peroxydation (Hall III et al., 2006), ce qui n'est pas le cas avec les huiles. Néanmoins, les graines comportent aussi des facteurs antinutritionnels tels que les cyanogènes comme la linamarine, la linustatine, la lotasutraline et la néolinustatine (Hall III et al., 2006 ; Lainé et al., 2007). Ces dernières peuvent être réduites de manière importante par des processus de cuisson-extrusion.

Enfin, la forme d'apport des graines peut également influencer la biodisponibilité des AG. La comparaison entre graines crues aplaties et graines extrudées a permis de montrer que pour un apport équivalent en ALA, le dépôt dans la viande était supérieur avec les graines extrudées (Vorin et al., 2003). Ceci peut s'expliquer d'une part par l'existence des facteurs antinutritionnels dans la graine de lin crue n'ayant pas subi de processus de cuisson-extrusion et d'autre part par la granulométrie des graines de lin extrudées qui est inférieure à celle des graines aplaties. Tout ceci permet d'expliquer une meilleure digestibilité et ainsi, un dépôt préférentiel de l'ALA de la graine de lin cuite face à la graine de lin crue.

Récemment, il a été également démontré chez le porc que différents traitements de cuisson-extrusion avaient un impact positif sur la digestibilité de la graine de lin et plus particulièrement sur celle des matières grasses qu'elle contient (Noblet et al., 2008).

L'environnement des autres AG peut aussi influencer la biodisponibilité des AG n-3 et en particulier le rapport LA/ALA. Chez l'homme, des études montrent que l'ALA alimentaire, apporté à hauteur de 1,8 % de l'apport énergétique total, augmente non significativement la triglycéridémie (Bebelmans et al., 2002). D'autres études (avec une consommation de 4,5 % de l'apport énergétique total) ne montrent aucun effet (Mantzioris et al., 1994 ; Nydahl et al., 1994), ou indiquent une baisse significative de la triglycéridémie (Singer et al., 1990 ; Wilkinson et al., 2005). Les différences observées entre ces études peuvent provenir de l'hétérogénéité des doses utilisées, mais il existe certainement aussi une influence du contexte lipidique dans lequel ALA se trouve : variation des rapports LA/ALA et aussi AGS/AGPI (Mairesse et al., 2008).

Etant donnée la diversité des résultats obtenus selon les formes d'apports ou de l'origine des AG n-3, le but de cette étude est de comparer l'effet de différentes sources végétales riches en ALA sur les performances de croissance de l'animal et sur les qualités technologique et nutritionnelle de la viande de porc.

Nous avons comparé l'apport de graines de lin extrudées et celui d'huile de lin. Nous avons également testé d'autres sources que le lin : nous avons utilisé de l'huile de chanvre ou de colza. Pour étudier des formes variées d'apport de lipides avec des rapports LA/ALA différents, nous avons utilisé des régimes avec de l'huile de palme ou de tournesol. Enfin, des graines extrudées selon des paramètres nouveaux mis au point par la Société Valorex (Combourtillé, France) ont été également incorporées aux régimes.

2. MATERIELS ET METHODES

Ce paragraphe décrit sommairement les méthodes employées. Pour une lecture plus approfondie de la méthodologie, se reporter au chapitre « Matériels et Méthodes ».

2.1. Régimes alimentaires

Les régimes ont été fabriqués au moulin expérimental de l'UMR SENAHA à partir d'une base commune d'aliment sans lipides ajoutés (Annexe 1). C'est la même base que pour l'étude 1. Après ajouts des différentes sources lipidiques, les régimes sont isolipidiques (4,0 %), isoénergétiques (16,3 MJ/kg en énergie brute) et isoprotéiques (19,3 %). Les lipides étaient

Tableau 59. Composition centésimale et composition en acides gras des régimes alimentaires.

Composition centésimale, %	Régimes expérimentaux							
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol
Aliment de base	93,3	93,3	93,3	92,3	92,3	92,3	93,3	93,3
Huile de chanvre	2,0	-	-	-	-	-	-	-
Huile de colza	-	2,0	-	-	-	-	-	-
Huile de lin	-	-	2,0	-	-	-	-	-
Graines de lin, extrusion A*	-	-	-	7,5	-	-	-	-
Graines de lin, extrusion B*	-	-	-	-	7,5	-	-	-
Graines de lin, extrusion C*	-	-	-	-	-	7,5	-	-
Huile de palme	-	-	-	-	-	-	7,5	-
Huile de tournesol	-	-	-	-	-	-	-	2,0
Supplémentation en protéines**	4,5	4,5	4,5	-	-	-	-	4,5
Supplémentation en antioxydant***	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Composition en acides gras****								
C16:0	11,5	10,5	12,3	11,1	10,9	12,9	29,2	11,4
C18:0	2,6	2,0	3,0	2,7	2,9	3,2	3,2	2,8
C18:1 n-9	17,3	40,2	21,0	18,7	20,0	20,4	29,5	24,6
C18:2 n-6	55,0	38,7	35,6	36,8	36,0	35,3	34,6	58,1
C18:3 n-3	10,9	6,2	26,5	29,8	29,4	26,5	2,1	2,0
C18:2 n-6 / C18:3 n-3	5,0	6,3	1,3	1,2	1,2	1,3	16,6	28,6

* 70% grain de lin extrudée Tradi-Lin® + 30 % son de blé extrudé (Valorex, Combourtillé, France)

** 85% de son de blé + 15% de tourteau de tournesol

*** 40 ppm vitamine E + 0,25 ppm sélénium

****Composition en acides gras exprimée en pourcentage des acides gras identifiés

Les traitements A, B et C des graines de lin sont confidentiels et ne sont pas rapportés dans ce document

ajoutés soit sous forme d'huile (2,0 % pour le régime chanvre, colza, lin, palme et tournesol), soit sous forme de graines de lin extrudées selon différents procédés technologiques de cuisson-extrusion (7,5 % du mélange « graines + support » soit 5,2 % de graines de lin extrudées, A, B ou C). Les procédés d'extrusion ne sont pas présentés dans le cadre de cette thèse pour des raisons de confidentialité.

Pour palier au manque de protéines dans les lots où les lipides sont apportés sous forme d'huile, une supplémentation de 0,2 % d'un support riche en protéine a été réalisée. Tous les régimes sont supplémentés en antioxydants pour se prémunir des risques d'oxydation (40 ppm vitamine E + 0,25 ppm sélénium). La composition centésimale ainsi que la composition en AG des régimes alimentaires est présentée dans le tableau 59.

2.2. Animaux

Les porcs mâles castrés [Large-White*Landrace] x Pietrain sont élevés au sein de l'élevage expérimental de l'UMR SENAH. Huit lots expérimentaux (10 porcs par lot) ont été mis en place selon les régimes alimentaires alloués aux animaux entre un poids vif moyen de $51,8 \pm 2,7$ kg jusqu'à l'abattage à un poids vif moyen de $105,2 \pm 4,2$ kg. Les animaux élevés en loge individuelle ont été alimentés *ad libitum* jusqu'à la veille de leur abattage où ils ont été mis à jeun. Au cours de l'expérimentation, les animaux ont été pesés, à jeun, hebdomadairement, les quantités d'aliments distribuées et les refus ont été également enregistrés.

2.3. Prélèvements et dosages de laboratoire

Les animaux ont été abattus à l'abattoir expérimental de l'UMR SENAH selon les normes en vigueur. Immédiatement après l'abattage et la réalisation de la fente de la carcasse, les tissus nécessaires aux dosages biochimiques (muscle *longissimus dorsi*, tissu adipeux sous cutané dorsal et foie) ont été prélevés et conservés à -20°C jusqu'à la réalisation des dosages. Le poids de l'animal, sa Teneur en Viande Maigre (TVM) et l'épaisseur des gras de couverture du jambon, du dos et du cou ont été mesurés avant le stockage pour 24 h de la carcasse à $+4^{\circ}\text{C}$. Après ce délai, le poids de l'animal a été à nouveau mesuré et la demie carcasse gauche a été découpée selon une découpe primaire (pieds, jambon, queue, longe, bardière, poitrine, épaule). Le pH ultime à 24 h, les paramètres de couleur ainsi que les pertes en eau ont été mesurées sur le muscle *longissimus dorsi*.

Les lipides totaux ont été extraits selon la méthode de Folch et al. (1957). La composition en AG a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse (Perkin-Elmer) après une réaction de saponification et de dérivation au trifluorure de bore des AG selon Morrison et Smith

Tableau 60. Performances de croissance des porcs charcutiers.

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol	ETR	Effet
Âge début, j	105,1	105,9	105,2	105,2	105,9	104,8	105,6	104,9	1,1	NS
Âge fin, j	158,8	158,2	154,7	155,4	157,5	156,3	157,2	160,7	4,7	NS
Poids début, kg	51,4	51,4	52,0	52,2	51,8	52,0	51,4	52,0	2,8	NS
Poids fin, kg	106,2	104,4	104,7	107,0	104,7	104,3	104,0	106,1	4,2	NS
Consommation, kg	154,7	154,6	146,8	148,3	150,3	144,5	148,3	158,8	15,0	NS
Ingéré Moyen, kg/j	2,89	2,98	2,87	2,97	2,93	2,73	2,88	2,86	0,3	NS
Gain moyen quotidien, g/j	1025	1027	1024	1098	1035	985	1024	972	111,6	NS
Indice de consommation	2,83	2,92	2,79	2,71	2,84	2,77	2,83	2,95	0,3	NS

ETR : écart type résiduel ; NS : $p > 0,05$

(1964). La teneur en lipides est exprimée en pourcentage, la composition en AG est exprimée en pourcentage des AG identifiés et en quantité (mg) pour 100 g de tissu.

2.4.Statistiques

Les résultats ont été comparés par analyse de la variance avec le régime comme effet principal selon la procédure GLM de SAS (SAS, 1989). La comparaison des moyennes deux à deux a été réalisée à l'aide du test de Bonferroni.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Effets des régimes sur les performances de croissance des porcs charcutiers

Les performances de croissance ne sont pas influencées par les régimes expérimentaux distribués aux animaux (tableau 60). Le poids d'entrée en expérimentation n'est pas statistiquement différent d'un lot à l'autre ($p=0,996$) tout comme le poids ($p=0,676$) et l'âge ($p=0,144$) en fin d'expérimentation. Les valeurs moyennes des âges et des poids en fin d'expérimentation sont égales, respectivement, à $157 \pm 4,9$ j et $105 \pm 4,2$ kg. La quantité d'aliment ingéré quotidiennement ou ingéré moyen, le rapport quantité d'aliment ingéré sur gain de croît ou indice de consommation ainsi que le gain moyen quotidien, ne sont pas différents statistiquement d'un lot à l'autre. Les valeurs moyennes globales trouvées étaient égales pour l'ingéré moyen à $2,9 \pm 0,3$ kg/j, pour l'indice de consommation égal à $2,8 \pm 0,3$ et enfin, le gain moyen quotidien était égal à 1024 ± 112 g/j. Les valeurs retrouvées ici sont rencontrées classiquement dans la littérature pour l'élevage des porcs à ce stade physiologique (porc à l'engraissement).

Ainsi la nature des AG, et notamment les AG polyinsaturés de la série n-3, sont sans effet sur les performances de croissance des animaux dans nos conditions expérimentales. Ces résultats sont en accord avec de nombreux auteurs (Bucharles et al., 1987 ; Leszczynski, 1992 ; Romans et al., 1995a et b ; Mourot et al., 1994 ; Riley et al., 2000 ; Kouba et al., 2003 ; Corino et al., 2008). Cependant, d'autres auteurs ont montré qu'il y avait un impact positif des AG n-3 sur les performances de l'animal en augmentant notamment son GMQ (Mourot et al., 1995a ; Matthews et al., 2000 ; Liu et al., 2003 ; Zhan et al., 2009). Cette différence d'effet entre ces études, pour une même source d'AG, peut être expliquée par l'existence d'un effet seuil aussi bien en terme de durée de distribution que de concentration en AG n-3. Zhan et al. (2009) ont mis en évidence qu'à partir d'une introduction de 5 % de graine de lin dans le régime et ceci

Tableau 61. Composition de la carcasse des porcs charcutiers

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol	ETR	Effet
Carcasse chaude, kg	83,08	82,90	82,79	84,87	82,95	82,71	82,75	85,65	3,4	NS
Carcasse froide, kg	80,91	80,84	81,19	82,77	80,82	80,63	80,21	83,43	3,4	NS
Pertes au ressuage, % ¹	2,61	2,49	2,14	2,48	2,57	2,54	3,06	2,59	0,7	NS
Proportion des pièces de découpe de la carcasse gauche										
Jambon, % ¹	23,65	23,48	24,06	24,47	23,76	24,23	24,16	24,38	0,9	NS
Longe, % ¹	26,62	26,72	26,68	27,83	27,18	26,29	27,23	27,74	1,3	NS
Bardière, % ¹	6,47	7,34	7,28	6,53	6,63	6,61	6,63	6,75	1,3	NS
Epaule, % ¹	23,92	23,36	23,58	23,17	23,90	24,00	23,27	23,25	1,0	NS
Poitrine, % ¹	12,59	12,51	12,19	12,20	12,04	12,36	12,24	11,61	0,8	NS
Qualités technologiques de la carcasse gauche										
Epaisseur du gras du jambon, mm	14,20	15,40	15,67	11,67	13,80	14,70	13,20	14,60	4,1	NS
Epaisseur du gras du dos, mm	15,50	19,60	18,44	17,00	17,20	17,40	16,00	17,50	3,4	NS
Epaisseur du gras du cou, mm	38,10	38,90	38,33	36,11	39,30	38,90	36,20	38,00	3,9	NS
TVM calculé ²	55,77	54,77	55,48	58,01	56,35	55,98	56,88	57,57	3,2	NS
Qualités technologiques du muscle <i>longissimus dorsi</i>										
L*	54,45	55,51	-	54,95	54,77	-	53,42	55,06	2,9	NS
a*	7,36	7,47	-	7,48	6,99	-	7,21	6,94	1,2	NS
b*	4,29	4,62	-	4,00	4,57	-	3,66	3,83	0,9	NS
pHu 24 h	5,56 ^{ab}	5,57 ^{ab}	5,47 ^b	5,48 ^b	5,58 ^{ab}	5,47 ^b	5,55 ^{ab}	5,65 ^a	0,1	**
Perte en eau, %										
48 h ¹	3,83	4,78	-	5,28	3,12	-	4,96	4,64	1,8	NS
Cuisson ³	27,31	27,50	-	28,92	28,65	-	27,2	27,27	3,0	NS

¹ exprimé par rapport au poids de la demi-carcasse.

² TVM calculé = 5,684 + 1,197% jambon + 1,076% longe – 1,059% bardière

³ exprimé par rapport au poids de la pièce de viande fraîche crue

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

NS : p>0,05 ; ** : p<0,01

ETR : écart type résiduel ; pHu LD : pourcentage d'hydrogène ultime

pour une durée de 60 j, il y avait une amélioration visible des performances de croissance sur l'animal.

Dans le cas de notre étude, 7,5 % d'un aliment commercial (70 % de graine de lin + 30 % de son de blé) était apporté représentant un apport de 5,2 % de graine de lin extrudée. La proportion en graines de lin était la même quels que soient les traitements technologiques d'extrusion. La durée de distribution était de $52,5 \pm 4,9$ jours. Ainsi, la durée de distribution des régimes supplémentés en graine de lin pour une supplémentation en graines aux environs de 5 % est en deçà du seuil pour lequel des effets bénéfiques sont visibles sur les performances de croissance des animaux. Ceci semble confirmer la notion de seuil mise en évidence dans ces études.

3.2. Effets des régimes sur la composition de la carcasse des porcs charcutiers

La composition de la carcasse est reportée dans le tableau 61.

Les régimes expérimentaux n'ont pas influencé de manière significative le poids de carcasse à chaud (poids moyen de $83,4 \pm 3,6$ kg ; $p=0,350$) ainsi que le poids de carcasse à froid (poids moyen de $81,4 \pm 3,4$ kg ; $p=0,359$). De ce fait, les pertes en eau occasionnées par le ressuage de la carcasse ne sont pas significativement différentes ($p=0,297$) d'un lot à l'autre avec une perte en eau moyenne de $2,6 \pm 0,7$ % du poids à chaud de la carcasse après 24 h de stockage à $+4^{\circ}\text{C}$.

Les différentes pièces anatomiques des porcs ont été pesées après 24 h de stockage. Elles sont exprimées en proportion par rapport au poids d'une demi-carcasse². Les régimes expérimentaux n'ont pas modifié la proportion des différentes pièces anatomiques par rapport à la demi-carcasse. La proportion moyenne des pièces de découpe dans la demie carcasse est de $24,0 \pm 0,9$ % ($p=0,116$) pour le jambon, de $27,0 \pm 1,4$ % ($p=0,115$) pour la longe, de $6,8 \pm 1,3$ % ($p=0,723$) pour la bardière, de $23,6 \pm 1,0$ % ($p=0,305$) pour l'épaule et enfin pour la poitrine de $12,2 \pm 0,8$ % ($p=0,214$).

L'absence d'effets des régimes expérimentaux sur la composition de la carcasse est en accord avec de nombreux travaux (Mourot et al., 1995a ; Romans et al., 1995a et b ; Fontanillas et al., 1997 ; Kouba et Mourot, 1999 ; Warnants et al., 1999 ; Riley et al., 2000, Bee et al., 2002 ; Corino et al., 2008). L'absence d'effet était attendue puisque d'une part nos régimes expérimentaux étaient peu différents en termes d'apport énergétique et les quantités consommées par les animaux ne différaient pas statistiquement.

² Poids d'une demi carcasse = poids du jambon + épaule + poitrine (sans hampe) + longe (sans hampe) + bardière + demie-tête (avec cervelle et langue)

Tableau 62. Teneur en lipides totaux du tissu adipeux sous cutané dorsal, du muscle *longissimus dorsi* ainsi que du foie de porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en g pour 100 g de tissu.

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol	ETR	Effet
TASCD	65,2 ^{ab}	66,6 ^{ab}	72,6 ^a	64,7 ^{ab}	68,6 ^{ab}	70,4 ^{ab}	63,0 ^b	68,0 ^{ab}	5,9	*
LD	2,0 ^a	1,5 ^{ab}	1,9 ^a	1,6 ^{ab}	1,7 ^{ab}	1,7 ^{ab}	1,3 ^b	1,5 ^{ab}	0,4	**
Foie	4,1	3,8	4,2	3,9	4,6	4,1	3,8	4,2	0,6	NS

ETR : Ecart type résiduel ; LD : muscle *longissimus dorsi* ; TASCD : tissu adipeux sous cutané dorsal

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

NS : $p > 0,05$; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$

Les épaisseurs des tissus adipeux de couverture, ou sous-cutanés, mesurées au niveau du jambon (moyenne de $14,1 \pm 4,1$ cm ; $p=0,439$), du dos (moyenne de $17,3 \pm 3,5$; $p=0,211$) et du cou (moyenne de $38,0 \pm 3,9$ cm ; $p=0,482$) ne sont pas significativement influencées par les régimes expérimentaux. Néanmoins, il est notable de remarquer que pour le gras de couverture, l'adiposité est très largement différente selon la localisation (ici au niveau du dos ou du cou) permettant de distinguer un tissu adipeux de couverture d'un autre.

Cette différence de l'épaisseur du tissu adipeux selon sa localisation s'accompagne de variation du potentiel d'activité des enzymes de la lipogénèse. Le potentiel lipogénique du tissu adipeux sous cutané est plus faible au niveau du cou que du dos, alors que le tissu du cou est plus épais, et donc plus riche en lipides, que celui du dos (Mourot et al. 1995a ; Mourot et al., 1999) : ceci pourrait signifier que les lipides du cou ne sont pas tous synthétisés in situ, mais proviendraient pour partie de tissus adipeux où la synthèse lipidique est très active, comme le tissu adipeux sous cutané du dos.

Les paramètres de qualité de viande ont été également mesurés (tableau 61).

Le pH ultime mesuré après 24 h de stockage de la carcasse est influencé par les régimes expérimentaux ($p=0,004$). La viande de porcs du lot tournesol (pH = 5,65) est moins acide que celle des porcs des lots huile de lin (5,47), lin A (5,48) et lin C (5,47). Les autres lots expérimentaux présentent des valeurs intermédiaires de pH non différentes entre elles ($p>0,05$). Ces résultats vont à l'encontre de ceux trouvés par de nombreux auteurs (Fontanillas et al., 1997 ; Riley et al., 2000 ; Corino et al., 2002) qui n'observaient pas de différence de pH ultime entre leurs lots expérimentaux. La luminance (moyenne de $54,7 \pm 2,8$; $p=0,684$) du muscle long dorsal est équivalente entre les lots. Il en est de même des couleurs mesurées avec la composante a^* (moyenne de $7,2 \pm 2,8$; $p=0,842$) et la composante b^* (moyenne de $4,2 \pm 1,0$; $p=0,137$). Ces résultats sont en accord avec la majorité des auteurs (Romans et al., 1995a et b ; Lebret et al., 1999b ; Warnants et al., 1999 ; Riley et al., 2000 ; Corino et al., 2002 ; Kouba et al., 2003 ; Corino et al., 2008). Cependant, quelques auteurs ont démontré l'effet des AGPI sur les paramètres de couleur de la viande. Ainsi, Jensen et al. (1997) ont montré qu'une augmentation du degré d'insaturation donnait une viande plus sombre. Ces travaux sont confirmés par ceux de Warnants et al. (1995) et de Van Oeckel et al. (1996) qui mettent en relation l'augmentation de la teneur en ALA de la viande et sa luminosité qui diminue.

Tableau 63. Composition en acides gras du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol	ETR	Effet
C12:0	0,09	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,1	0,02	NS
C14:0	1,1	1,13	1,14	1,1	1,14	1,1	1,18	1,13	0,07	NS
C16:0	22,4	23,02	23,26	22,79	22,84	22,83	24,08	23,15	1,25	NS
C18:0	12,99	13,53	14,63	13,19	13,43	14,11	13,4	13,06	1,36	NS
C20:0	0,50 ^a	0,30 ^b	0,29 ^b	0,27 ^b	0,29 ^b	0,29 ^b	0,28 ^b	0,30 ^b	0,05	***
C24:0	0,12 ^{ab}	0,12 ^{ab}	0,04 ^{bc}	0,16 ^a	0,11 ^{abc}	0,03 ^c	0,11 ^{abc}	0,19 ^a	0,06	***
C14:1	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	NS
C16:1	2,01	1,96	1,83	2,32	2,08	1,85	2,2	2,34	0,4	NS
C18:1	38,11 ^b	42,81 ^a	36,65 ^b	38,89 ^b	37,64 ^b	37,34 ^b	42,55 ^a	39,18 ^b	1,76	***
C20:1	0,94 ^{abc}	1,02 ^a	0,79 ^{bc}	0,82 ^{bc}	0,76 ^c	0,79 ^{bc}	0,98 ^{ab}	0,86 ^{abc}	0,14	***
C22:1	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	NS
C24:1	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	NS
C18:2	17,54 ^a	13,11 ^b	13,59 ^b	12,69 ^b	13,53 ^b	13,77 ^b	12,91 ^b	16,93 ^a	1,94	***
C20:4	0,24 ^{ab}	0,21 ^b	0,16 ^b	0,49 ^{ab}	0,19 ^b	0,16 ^b	0,24 ^{ab}	0,67 ^a	0,3	**
Σ AG n-6	17,78 ^a	13,33 ^b	13,74 ^b	13,52 ^b	14,15 ^b	13,90 ^b	13,15 ^b	17,60 ^a	1,79	***
C18:3	2,44 ^b	1,66 ^{bc}	6,34 ^a	5,31 ^a	6,14 ^a	6,43 ^a	0,93 ^c	0,79 ^c	0,9	***
C20:5	0,06 ^b	0,05 ^b	0,10 ^b	0,21 ^a	0,12 ^{ab}	0,10 ^b	0,03 ^b	0,06 ^b	0,07	***
C22:5	0,15 ^{bc}	0,12 ^c	0,24 ^{ab}	0,33 ^a	0,25 ^{ab}	0,25 ^{ab}	0,11 ^c	0,11 ^c	0,07	***
C22:6	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	NS
Σ AG n-3	2,99 ^b	2,00 ^{bc}	6,82 ^a	6,06 ^a	6,69 ^a	6,92 ^a	1,23 ^c	1,16 ^c	0,81	***
Σ AG saturés	37,19	38,18	39,44	37,6	37,89	38,44	39,14	37,92	2,37	NS
Σ AG monoinsaturés	41,15 ^{cb}	45,90 ^a	39,39 ^c	42,16 ^{cb}	40,61 ^{cb}	40,11 ^{cb}	45,83 ^a	42,50 ^b	1,98	***
Σ AG polyinsaturés	21,66 ^a	15,92 ^b	21,16 ^a	20,24 ^a	21,50 ^a	21,45 ^a	15,03 ^b	19,58 ^a	2,5	***
Σ AG n-6 / Σ AG n-3	5,95	6,71	2,02	2,38	2,12	2,01	10,84	15,25	-	-
C18:2 n-6 / C18:3 n-3	7,2	7,92	2,15	2,89	2,2	2,15	14,03	22,57	-	-

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

ETR : écart type résiduel ; NS : p>0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monoinsaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Enfin les pertes en eau post-mortem ($p=0,107$) et après cuisson ($p=0,645$) qui sont en moyenne, respectivement, de 3,1 % à 5,3 % et de 27,2 % à 28,9 %, du poids du muscle long dorsal ne sont pas influencées significativement par les différents lots expérimentaux. Ces résultats sont conformes aux valeurs retrouvées à de mêmes stades de croissance pour ce muscle.

3.3.Effets des régimes sur la qualité nutritionnelle de la viande de porcs charcutiers

3.3.1. Teneur en lipides totaux des tissus de porcs charcutiers

Les régimes expérimentaux ont un effet significatif sur la teneur en lipides totaux du TASC (D) ($p=0,011$) ainsi que du muscle *longissimus dorsi* ($p=0,002$). La teneur hépatique en lipides ne varie pas significativement ($p=0,342$) selon les régimes expérimentaux distribués aux animaux (tableau 62).

La teneur en lipides du tissu adipeux sous cutané dorsal ou du muscle *longissimus dorsi* est plus importante avec les animaux du lot huile de lin comparés aux animaux du lot palme. Les teneurs en lipides totaux des tissus adipeux sous cutanés dorsaux ou du muscle *longissimus dorsi* des autres porcs soumis aux autres régimes sont intermédiaires entre les teneurs des tissus des porcs soumis aux régimes huile de lin ou palme, et ne sont pas différentes entre elles.

Dans le cas du muscle *longissimus dorsi*, les teneurs en lipides totaux des animaux des lots chanvre et huile de lin, respectivement 2,0 et 1,9 % de lipides, sont significativement plus élevées que celles des animaux du lot palme (1,3 %). Dans le tissu adipeux ou musculaire, ce sont les mêmes lots qui présentent des valeurs extrêmes. Le régime huile de lin conduit à la teneur en lipides totaux la plus élevée, par rapport au régime palme dont la consommation entraîne la teneur en lipides la plus faible. Ces résultats s'opposent à ceux de la littérature précédemment citée (Van Oeckel et al., 1996 ; Warnants et al., 1996 ; Kouba et Mourot, 1999). Il n'est noté aucun effet significatif des régimes alimentaires sur la teneur en lipides totaux du foie.

Quelques travaux ont montré que l'huile de lin avait tendance à augmenter la teneur en matière grasse du TASC (D) (Vorin, 2003 ; Fontanillas et al. 1997). L'augmentation de la teneur en lipides de la bardière dans le cas de régimes supplémentés en huile s'explique par une disponibilité de l'énergie différente. Elle est de 85 % pour une huile végétale contre 80 % pour la graine de lin extrudée (Sauvant et al., 2004 ; Noblet et al., 2008). Ainsi, les porcs ayant consommé des aliments contenant de l'huile de lin, malgré une teneur en lipides des

régimes équivalente, auront une disponibilité en énergie supérieure, ce qui pourra se traduire par un dépôt en lipides plus important dans les tissus de stockage de la matière grasse.

3.3.2. Composition en acides gras des tissus du porc charcutier

Dans le texte figure les données de la proportion en AG identifiés ainsi que de les teneurs en mg des principaux AG n-3. En annexe 3 sont présentées les teneurs de l'ensemble des AG.

3.3.2.1. *Tissu adipeux*

La proportion d'AG saturés (AGS) n'est pas modifiée par les régimes expérimentaux ($p=0,423$) pour être à une valeur moyenne de $38,2 \pm 2,4$ % (tableau 63). Par contre, ces régimes modifient la proportion des AG monoinsaturés (AGM ; $p<0,001$) ainsi que celle des AG polyinsaturés (AGPI, $p<0,001$).

La proportion des AGM est présente à des niveaux plus élevés avec les régimes colza et palme, respectivement 45,9 % et 45,8 % comparativement aux autres lots expérimentaux. La teneur la plus faible en AGM est observée pour le lot huile de lin (39,4 %). Les AGPI sont présents en forte proportion dans le TASC des animaux des lots chanvre (21,7 %), huile de lin (21,2 %), lin A (20,2 %), B (21,5 %) et C (21,5 %) ainsi que tournesol (19,6 %). Ils sont en proportions plus faibles dans les tissus des animaux des lots colza (15,9 %) et palme (15,0 %).

L'acide gras majoritaire au sein des AGM est l'acide oléique (C18:1 n-9). Les variations de cette classe d'AG s'expliquent donc principalement par les variations de la proportion de cet acide gras. Cette dernière est statistiquement influencée par les régimes expérimentaux ($p<0,001$) et l'acide oléique est présent en plus grande proportion chez les porcs des lots colza (42,8 %) et palme (42,5 %) que chez les porcs des autres lots expérimentaux avec une moyenne de 38,0 % d'acide oléique dans le tissu adipeux sous cutané. La plus faible proportion de cet acide gras avec ces régimes peut être expliquée par la baisse d'activité de l'enzyme responsable de la synthèse de cet acide gras. L'enzyme $\Delta 9$ désaturase est nécessaire à la synthèse de la double liaison en position 9 par rapport au groupement -COOH pour la constitution du C18:1 n-9 à partir du C18:0. Son activité est influencée par la nature des AG comme le montrent Kouba et Mourot en 1998, dans le cas d'une alimentation des porcs avec un régime riche en acide linoléique mais aussi dans le cas d'une alimentation des porcs par un régime riche en acide α -linoléique (Romans et al., 1995b ; Specht-Overholt et al., 1997 ; Matthews et al., 2000 ; Kouba et al., 2003). La baisse de l'activité de l'enzyme $\Delta 9$ désaturase dans ces études a été estimée jusqu'à 30 à 40 %. Dans la présente étude, bien que l'activité

n'ait pas été mesurée, la proportion en acide oléique peut en être le reflet. Cette dernière baisse jusqu'à 12 % ($p < 0,001$) au sein du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs des lots lin face aux porcs du lot palme, nous permet d'émettre l'hypothèse d'une inhibition possible de la $\Delta 9$ désaturase dans nos conditions expérimentales. Néanmoins, il est à noter que le régime palme qui entraîne une plus forte proportion d'acide oléique dans le tissu adipeux sous-cutané est également plus riche en C18:1 que les lots lin (29,5 % des AG identifiés contre 20,0 %, respectivement). Par conséquent, cette plus forte proportion de C18:1 dans le tissu adipeux sous-cutané de porcs ayant consommé le régime palme peut être dû en partie à la forte proportion de C18:1 du régime.

La classe des AG polyinsaturés est largement influencée par la nature des AG présents dans le régime alimentaire confirmant de nouveau la bonne relation entre les AG ingérés et les AG déposés connue depuis longtemps. Les premiers travaux ont été menés sur l'acide linoléique dès 1926 par Ellis et Isbell avec une teneur de 1,9 % dans un régime pauvre en graisse à plus de 30 % dans un régime à haute teneur en soja. Ces premières données ont été confirmées dans de nombreux travaux par la suite (revue de Mourot et Hermier, 2001 ; revue de Chilliard et al., 2008).

La famille d'AG n-6 est principalement constituée du précurseur acide linoléique (C18:2 n-6) et du dérivé à longue chaîne acide arachidonique (C20:4 n-6). Le C18:2 n-6 est présent en plus forte proportion ($p < 0,0001$) dans le tissu adipeux des animaux des lots tournesol et chanvre à des teneurs respectives de 16,9 % et de 17,5 %. L'acide linoléique est donc présent en plus forte quantité dans le tissu des animaux ayant consommé des régimes riches en AG n-6. Une fois de plus la relation entre la nature des AG ingérés et celle des AG déposés est vérifiée. L'acide arachidonique est présent en plus forte quantité dans les tissus des animaux du lot tournesol par rapport aux tissus des animaux des lots riches en AG n-3 (huile de colza, huile de lin, graine de lin). Les porcs des lots chanvre et palme présentent des valeurs intermédiaires.

Les AG n-3 sont représentés par les AG majeurs allant du précurseur, l'acide α -linoléique (ALA, C18:3 n-3) à ses dérivés : l'acide eicosapentaénoïque (EPA, C20:5 n-3), l'acide docosapentaénoïque (DPA, C22:5 n-3) et l'acide docosahexaénoïque (DHA, C22:6 n-3). La somme des AG n-3 est plus importante dans le cas des régimes riches en ceux-ci. Il n'y a pas de différences significatives pour la somme des AG n-3 entre les 4 lots riches en AG n-3 (huile et graines de lin A, B et C). Comme pour le précurseur de la famille des AG n-6, il

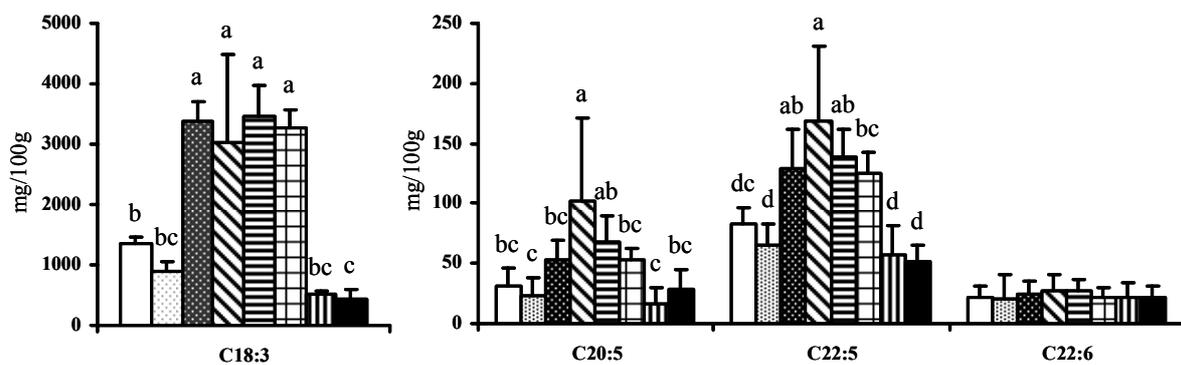


Figure 34. Composition en acides gras n-3 du tissu adipeux sous cutané dorsal des porcs (mg/100g).

□ Huile chanvre ▨ Huile colza ▩ Huile lin ▧ Graine lin A
 ▦ Graine lin B □ Graine lin C ▨ Huile palme ■ Huile tournesol

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

existe une bonne relation entre la quantité d'ALA ingéré et celle de l'ALA déposé aux seins des tissus. Les TASCDS des animaux des lots lin (huile et graine de lin) ont des teneurs en ALA supérieures (6,43 % à 5,31 %) aux tissus adipeux sous-cutanés des animaux des autres lots. Les animaux du lot chanvre présentent des valeurs intermédiaires (2,44 %) et enfin les animaux des lots palme et tournesol présentent des valeurs faibles, respectivement 0,93 % et 0,79 %.

Les dérivés à longue chaîne des AG n-3 sont présents, à l'image du précurseur, en plus grande proportion dans le tissu adipeux des animaux des lots riches en AG n-3 comparativement aux autres lots palme, tournesol et colza. Le tissu adipeux des porcs nourris au chanvre présente des proportions en dérivés des AG n-3 intermédiaires. Globalement, cette augmentation des dérivés à longue chaîne concerne l'EPA et le DPA. La proportion en DHA, acide gras final de la famille des AG n-3 n'est pas augmentée. L'augmentation de la proportion des AG n-3, suite à la distribution des quatre régimes riches en ALA, dans notre étude est en accord avec la bibliographie (Morgan et al., 1992 ; Romans et al., 1995 a et b ; Ahn et al., 1996 ; Matthews et al., 2000 ; Enser et al., 2000 ; Kouba et al., 2003 ; Corino et al., 2008).

Parmi les animaux des différents lots riches en AG n-3, tous n'ont pas la même efficacité de biosynthèse des dérivés à longue chaîne. Les animaux du lot lin A présentent des proportions d'AG n-3 à longue chaîne supérieures ($p < 0,01$) aux autres animaux des lots riches en AG n-3. Cette différence d'incorporation dans le TASCDS des AG n-3 selon les procédés de cuisson – extrusion de la graine de lin s'explique en partie par une augmentation de la digestibilité de la matière grasse dans le cas du lot lin A (90 %) par rapport aux lots lin avec une extrusion moins poussée (80 %) (Noblet et al., 2008) et en partie par la composition du régime alimentaire lin A qui présente une teneur en ALA de 29,5 % des AG identifiés. Cette valeur est équivalente à celle du régime lin B mais est supérieure à celles des régimes lin C et huile de lin. La distribution de régimes expérimentaux riches en AG n-3 permet une diminution significative du rapport LA/ALA bien en deçà des recommandations de l'AFSSA qui préconisent un rapport égal ou inférieur à 5 dans leur dernière édition des ANC (2001).

Les teneurs en AG n-3 du TASCDS, exprimées en mg pour 100 g, sont influencées de manière similaire (figure 34)

Une fois de plus, il est démontré que la distribution aux animaux d'aliments riches en AGPI des séries n-3 (lin, chanvre) et des séries n-6 (tournesol), permettent un dépôt de ces AGPI au sein du tissu adipeux. Cette relation est très bonne chez les animaux monogastriques,

Tableau 64. Composition en acides gras du muscle *longissimus dorsi* de porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentage des acides gras identifiés.

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol	ETR	Effet
C12:0	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,08	0,07	0,01	NS
C14:0	1	1,05	1,13	1,02	1,09	1,07	0,96	1	0,16	NS
C16:0	22,69	22,9	23,29	22,56	22,71	22,87	22,12	23,8	1,68	NS
C18:0	12,07	11,8	12,51	12,41	11,56	12,15	11,28	13,67	1,85	NS
C20:0	0,35 ^a	0,34 ^{ab}	0,21 ^c	0,29 ^{abc}	0,23 ^{bc}	0,25 ^{abc}	0,33 ^{ab}	0,34 ^{ab}	0,08	***
C24:0	0,46 ^{ab}	0,45 ^{ab}	0,29 ^a	0,25 ^a	0,29 ^a	0,29 ^a	0,68 ^{ab}	0,49 ^b	0,19	***
C14:1	0,03	0,05	0,05	0,03	0,05	0,04	0,05	0,04	0,01	*
C16:1	2,90 ^{ab}	2,96 ^{ab}	3,09 ^{ab}	2,48 ^{ab}	3,23 ^a	3,04 ^{ab}	2,91 ^{ab}	2,46 ^b	0,53	*
C18:1	39,07	40,86	39,82	37,85	40,94	40,22	37,51	36,19	4,81	NS
C20:1	0,71	0,76	0,69	0,72	0,69	0,58	0,69	0,75	0,15	NS
C22:1	0,04 ^c	0,05 ^c	0,08 ^a	0,05 ^a	0,05 ^a	0,09 ^a	0,07 ^b	0,04 ^b	0,02	***
C24:1	0,12	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,15	0,1	0,04	NS
C18:2 n-6	14,38	12,94	11,45	13,72	11,75	11,77	14,88	14,94	3,17	NS
C20:4 n-6	3,06 ^{ab}	3,00 ^{ab}	2,26 ^{ab}	1,97 ^b	2,13 ^{ab}	2,33 ^{ab}	3,96 ^a	2,62 ^{ab}	1,37	*
Σ AG n-6	17,90 ^{ab}	16,35 ^{abc}	14,04 ^{bc}	15,99 ^{abc}	14,22 ^b	14,44 ^b	19,76 ^a	19,19 ^a	4,27	*
C18:3 n-3	1,03 ^c	0,86 ^c	2,66 ^b	4,11 ^a	2,71 ^b	2,74 ^b	0,55 ^c	0,49 ^c	0,69	***
C20:5 n-3	0,27 ^b	0,24 ^b	0,60 ^a	0,61 ^a	0,67 ^a	0,64 ^a	0,21 ^b	0,10 ^b	0,21	***
C22:5 n-3	0,61 ^{ab}	0,54 ^{ab}	0,79 ^a	0,76 ^a	0,80 ^a	0,84 ^a	0,53 ^{ab}	0,31 ^b	0,28	***
C22:6 n-3	0,16	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,18	0,09	0,07	NS
Σ AG n-3	2,54 ^c	2,20 ^c	4,53 ^b	5,93 ^a	4,66 ^b	4,69 ^b	2,10 ^c	1,42 ^c	0,82	***
Σ AG saturés	36,65	36,62	37,52	36,62	35,97	36,71	36,08	36,9	1,6	NS
Σ AG monoinsaturés	42,87	44,8	43,86	41,25	45,07	44,08	42,13	42,24	4,29	NS
Σ AG polyinsaturés	20,48	18,58	18,63	22,13	18,97	19,21	21,79	20,86	4,85	NS
Σ AG n-6 / Σ AG n-3	6,92	7,21	3,01	2,70	2,97	3,00	9,27	13,72	-	-
C18:2 n-6 / C18:3 n-3	14,13	15,22	4,31	3,80	4,36	4,29	26,72	32,21	-	-

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

ETR : écart type résiduel ; NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monoinsaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

notamment chez le porc (Ellis et Isbell, 1926 ; Mourot et Hermier, 2001 ; Chilliard, 2008), qui constitue une espèce de choix dans le cadre d'une volonté d'enrichir la viande en AGPI.

3.3.2.2. Tissus musculaires

La composition en AG du muscle *longissimus dorsi* suit globalement les mêmes tendances que celles observées pour le tissu adipeux sous cutané dorsal (tableau 64).

La proportion des familles d'AG saturés, monoinsaturés et polyinsaturés ne varie pas de manière significative ($p > 0,10$).

Dans le cas de la famille des AG n-6, les régimes expérimentaux tendent à avoir un effet significatif ($p = 0,055$) sur le précurseur LA. Ce dernier est présent en de plus fortes proportions dans les muscles des animaux des lots riches en AG n-6 comme les lots tournesol (14,9 %) et chanvre (14,4 %) que dans le muscle des porcs des lots riches en AGPI n-3 comme les lots huile de lin (12,9 %), lin B (11,7 %) et lin C (11,8 %). La proportion du dérivé à longue chaîne ARA varie significativement dans le muscle *longissimus dorsi* ($p = 0,038$). Elle est diminuée ($p < 0,05$) dans les muscles des porcs du lot lin A (2,0 %) comparés aux porcs du lot palme (4,0 %).

Un effet du régime est observé sur la proportion d'AG n-3 totaux ($p < 0,001$). Les animaux du lot lin A ont en proportion plus d'AG n-3 totaux au sein du muscle *longissimus dorsi* (5,9 %) que ceux nourris également avec un régime riche en AGPI n-3 [lots lin B (4,7 %), lin C (4,7 %) et lot huile de lin (4,5 %)]. Les muscles des animaux des autres lots sont moins riches en AG n-3 tels que les animaux des lots chanvre (2,5 %), colza (2,2 %), palme (1,4 %) et tournesol (1,4 %).

Au sein de la famille des AG n-3, ces modifications sont dues aux variations de proportion du précurseur ALA. Le muscle des animaux du lot lin A a une teneur supérieure ($p < 0,05$) en ALA comparée aux autres régimes supplémentés en lin. Elle est de 4,1 % contre environ 2,7 % pour les autres lots lin. Les proportions des autres AG à longue chaîne de la série n-3 ne sont pas significativement différentes pour l'ensemble des régimes supplémentés en lin. Elles restent néanmoins supérieures ($p < 0,05$) à celles des animaux des autres lots non supplémentés en lin. De la même manière que pour le TASCDC, la proportion en DHA reste inchangée quel que soit le régime.

Les animaux du lot lin A présentent une teneur en AG n-3 totaux supérieure aux porcs des autres lots lin et notamment aux autres animaux ayant ingéré des graines de lin extrudées. Ainsi, les matières grasses du lot lin A, avec une digestibilité supérieure à celle des lipides des autres lots lin B et C, ne sont pas seulement dirigées vers les organes de stockage comme le

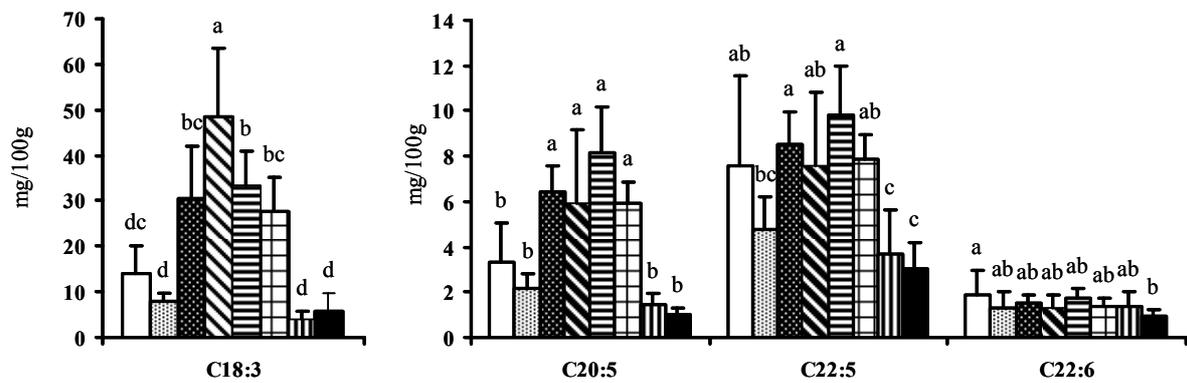


Figure 35. Composition en acides gras n-3 du muscle *longissimus dorsi* des porcs (mg/100g).

□ Huile chanvre ▨ Huile colza ▩ Huile lin ▤ Graine lin A
 ▥ Graine lin B □ Graine lin C ▧ Huile palme ■ Huile tournesol

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

TASCD, mais sont également déposées dans le muscle, permettant d'augmenter de manière significative la proportion en AG n-3 des lipides intramusculaires. Ces AGPI sont plutôt dans les phospholipides du muscle (environ 40 % selon Kouba et al., 2003), ce qui leur permet une meilleure protection vis-à-vis des phénomènes de peroxydation des lipides. Il est donc très intéressant d'un point de vue nutritionnel que les tissus maigres tels que le muscle long dorsal soient enrichis en AG n-3.

La teneur des principaux AG n-3 pour 100 g de muscle LD est influencée de manière similaire à la proportion des AG identifiés, à ceci près que la teneur en DHA est plus importante dans le LD des porcs nourris à l'huile de chanvre, face aux porcs nourris à l'huile de tournesol (figure 35).

Le rapport des précurseurs des familles des AG n-6 et n-3 est compris entre 3,8 et 4,4 pour les animaux des lots lin (huile et graines). Il n'y a pas de différence significative entre ces lots. Les animaux des lots chanvre et colza ont un rapport LA/ALA égal à 14,1 et 15,2, respectivement. Les animaux des lots palme et tournesol présentent les rapports les plus importants avec des valeurs égales à 26,7 et 32,2, respectivement.

3.3.2.3.Foie

Le foie, qui constitue le site privilégié de la désaturation des AG polyinsaturés à longue chaîne, présente une composition complexe en AG (tableau 65 et figure 36). Néanmoins quelques points notables sont observables dans la présente étude.

La proportion des AG saturés est la plus forte dans le foie des animaux du lot lin A et la plus faible chez les animaux du lot lin C. Les foies des animaux ayant reçu les autres régimes ont des proportions d'AG saturés intermédiaires.

La proportion des AG monoinsaturés est la plus importante dans les foies des animaux des lots colza (19,7 %) et palme (19,3 %). C'est avec le régime huile de lin que les porcs présentent la proportion la plus faible (14,5 %). Les teneurs en AG monoinsaturés des foies des autres porcs soumis aux autres régimes sont intermédiaires.

Enfin les proportions d'AG polyinsaturés sont les plus importantes dans le foie des porcs des lots huile de lin et lin C (respectivement 43,9 % et 43,3 %). C'est le foie des animaux ayant reçu le régime palme qui présente le moins d'AG polyinsaturés (35,9 %). Les foies des autres porcs ayant reçu les autres régimes ont des proportions d'AG polyinsaturés intermédiaires.

Tableau 65. Composition en acides gras du foie de porcs charcutiers. Les résultats sont exprimés en pourcentages des acides gras identifiés.

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile chanvre	Huile colza	Huile lin	Graine lin A	Graine lin B	Graine lin C	Huile palme	Huile tournesol	ETR	Effet
C12:0	0,14	0,12	0,01	0,78	0,17	0,01	0,26	0,22	0,48	NS
C14:0	0,56	0,47	0,29	0,70	0,56	0,37	0,41	0,43	0,26	NS
C16:0	15,27	14,41	13,37	13,40	14,41	14,08	15,71	14,32	1,33	*
C18:0	24,90 ^b	26,17 ^{ab}	27,34 ^{ab}	30,94 ^a	25,62 ^{ab}	25,13 ^{ab}	27,10 ^{ab}	28,14 ^{ab}	3,11	*
C20:0	0,43 ^a	0,30 ^{ab}	0,23 ^b	0,26 ^{ab}	0,25 ^{ab}	0,26 ^{ab}	0,37 ^{ab}	0,36 ^{ab}	0,09	**
C24:0	0,66 ^{ab}	0,63 ^{ab}	0,38 ^b	0,33 ^b	0,27 ^b	0,34 ^b	0,98 ^a	1,08 ^a	0,21	***
C14:1	0,08	0,08	0,10	0,10	0,09	0,13	0,13	0,10	0,04	NS
C16:1	1,13	1,11	0,68	0,90	1,21	1,00	1,08	1,04	0,35	NS
C18:1	14,94 ^{abc}	17,85 ^a	12,60 ^c	13,71 ^{bc}	16,14 ^{abc}	14,41 ^{abc}	17,39 ^{ab}	13,63 ^{bc}	2,14	***
C20:1	0,26	0,29	0,25	0,33	0,23	0,23	0,28	0,28	0,03	NS
C22:1	0,22 ^b	0,24 ^b	0,66 ^a	0,65 ^a	0,53 ^a	0,57 ^a	0,06 ^b	0,05 ^b	0,14	***
C24:1	0,20 ^{ab}	0,17 ^b	0,18 ^b	0,19 ^{ab}	0,15 ^b	0,20 ^{ab}	0,35 ^a	0,29 ^{ab}	0,09	**
C18:2	18,29 ^a	15,94 ^{bcd}	17,05 ^{abc}	15,55 ^{cd}	16,46 ^{abcd}	17,03 ^{abc}	14,74 ^d	17,93 ^{ab}	1,04	***
C20:4	14,44 ^{bc}	14,80 ^{abc}	12,11 ^{cd}	9,06 ^e	9,77 ^{ed}	11,28 ^{ed}	15,59 ^{ab}	17,56 ^a	1,45	***
Σ AG n-6	33,45 ^{ab}	31,47 ^{bc}	29,95 ^c	25,37 ^c	26,83 ^e	29,01 ^{cd}	31,10 ^{bc}	36,12 ^a	1,58	***
C18:3	1,80 ^{bc}	1,10 ^c	3,01 ^{ab}	3,32 ^a	4,33 ^a	3,79 ^a	0,56 ^c	0,48 ^c	0,73	***
C20:5	1,49 ^b	1,42 ^b	4,83 ^a	4,52 ^a	4,82 ^a	5,09 ^a	0,59 ^b	0,41 ^b	0,60	***
C22:5	2,89 ^{bc}	2,91 ^{bc}	4,41 ^a	3,25 ^b	3,18 ^b	3,78 ^{ab}	2,11 ^{cd}	1,72 ^d	0,52	***
C22:6	1,05	0,88	1,15	0,79	0,81	1,18	1,13	0,72	0,31	NS
Σ AG n-3	7,95 ^b	7,05 ^{bc}	14,20 ^a	12,62 ^a	13,73 ^a	14,54 ^a	5,16 ^{cd}	3,96 ^d	1,20	***
Σ AG saturés	41,95 ^{bc}	42,10 ^{abc}	41,62 ^{bc}	46,41 ^a	41,28 ^{bc}	40,19 ^c	44,84 ^{ab}	44,56 ^{abc}	2,27	***
Σ AG monoinsaturés	16,82 ^{ab}	19,74 ^a	14,47 ^b	15,86 ^{ab}	18,34 ^{ab}	16,53 ^{ab}	19,30 ^a	15,39 ^{ab}	2,33	**
Σ AG polyinsaturés	41,23 ^{ab}	38,16 ^{bc}	43,91 ^a	37,73 ^{bc}	40,38 ^{ab}	43,28 ^a	35,86 ^c	40,05 ^{ab}	2,16	***
Σ AG n-6 / Σ AG n-3	4,15	4,39	2,07	1,97	1,94	1,96	5,99	9,01	-	-
C18:2 n-6 / C18:3 n-3	10,55	15,05	6,17	4,80	4,15	4,62	28,35	39,44	-	-

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

ETR : écart type résiduel ; NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monoinsaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

AGPI/AGS: AG polyinsaturés / AG saturés

Les AG n-6 sont présents en quantité importante au sein du foie. Les différents régimes expérimentaux ont un effet significatif ($p < 0,001$) sur la teneur en précurseur des AG n-6.

La proportion de LA est à la fois plus forte dans le foie des porcs ayant reçu le régime tournesol (17,9 %) et la plus faible (14,7 %) avec le régime palme. Les teneurs hépatiques des autres porcs nourris avec les autres régimes sont intermédiaires.

Le précurseur LA, dont la proportion est ainsi augmentée, va pouvoir alimenter la voie de la biosynthèse des AG n-6 pour synthétiser l'ARA. Ce sont les foies des animaux du lot tournesol qui présentent une forte proportion en LA (17,9 %) et la proportion en ARA la plus élevée (17,6 %). Néanmoins, les foies des animaux du lot chanvre, bien qu'ayant une forte proportion en LA (18,3 %) n'ont pas une teneur en ARA parmi les plus élevées (14,4 %).

La richesse en précurseur LA des régimes tournesol et chanvre, respectivement 58,1 % et 55, % n'est donc pas la seule responsable d'une désaturation active vers l'acide arachidonique. Il faut prendre en compte le rapport LA/ALA. En effet, le chanvre, bien que riche en LA, l'est aussi en ALA, ce qui rabaisse considérablement le rapport LA/ALA qui est égal à 5,0 (contre 28,6 pour le régime tournesol). On sait que les AG n-6 et n-3 sont en compétition en tant que substrat pour les enzymes delta-6 et delta-5 désaturases et que ce sont les AG n-3 qui sont préférentiellement désaturés face aux AG n-6 (Sprecher, 2002). Les foies des animaux du lot chanvre constituent bien ainsi un lot intermédiaire entre les foies des animaux du lot tournesol (riches en ALA et ARA) et ceux des lots lin (pauvres en LA et ARA).

La proportion en AG n-3 totaux est élevée (12,6 % à 14,5 %) dans le cas des porcs appartenant aux lots lin (huile ou graine). Ces valeurs sont très supérieures ($p < 0,05$) aux valeurs des foies des porcs des lots chanvre (7,9 %) et colza (7,0), et des lots palme (5,2 %) et tournesol (4,0 %). De la même manière que pour le TASC et le LD, l'augmentation de la proportion des AG n-3 au sein du foie se fait pour le précurseur et ses dérivés EPA et DPA mais pas pour le DHA.

La proportion d'ALA est largement augmentée dans le cas des foies des animaux des lots lin face aux lots tournesol et palme ($p < 0,001$). Les foies des animaux des lots chanvre et colza présentent des niveaux intermédiaires par rapport aux lots tournesol et palme. La hausse des dérivés n-3 au sein des foies des porcs des lots lin par rapport aux lots palme ou tournesol est plus importante dans le cas de l'EPA par rapport aux tissus musculaire et adipeux ce qui mettrait en évidence une delta-6 désaturase et une delta-5 désaturase actives au sein du foie.

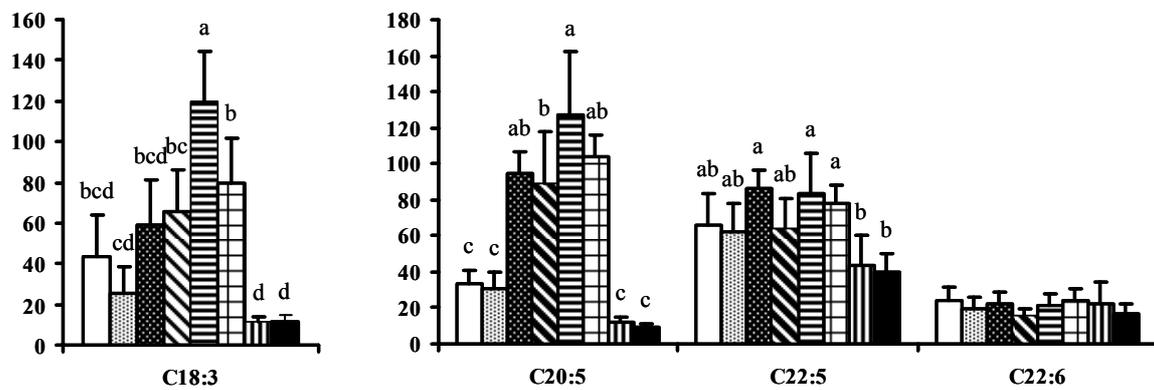


Figure 36. Composition en acides gras n-3 du foie des porcs (mg/100g).

□ Huile chanvre ▨ Huile colza ▩ Huile lin ▧ Graine lin A
 ▦ Graine lin B ▤ Graine lin C ▥ Huile palme ■ Huile tournesol

Les valeurs avec une lettre identique ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %

Dans ce dernier, la proportion d'EPA pour les lots lin (huile ou graine) est 8 à 12 fois plus forte qu'avec les lots palme et tournesol. La proportion de DPA est augmentée de 1,7 fois à 2,1 fois par rapport aux régimes palme et tournesol, respectivement.

Bien que le foie constitue le site privilégié de la désaturation des AGPI-LC, la non-augmentation de la proportion de DHA chez les animaux ayant ingéré des régimes riches en ALA, ne peut s'expliquer que par une activité désaturase limitante. En effet, la proportion d'EPA, produit de la delta-6 et delta-5 désaturase est bien augmentée. La succession élongation – désaturation – β -oxydation qui transforme l'EPA en DHA serait peu ou pas efficace. De plus, il n'est pas à exclure une autre hypothèse : le DHA nouvellement formé pourrait être mobilisé pour aller vers d'autres organes riches en ce dernier tels que le cerveau (Bourre, 2004).

Comme pour le TASCd et le LD, le rapport LA/ALA hépatique évolue de la même manière. Il est le plus faible dans les lots lin (1,9 à 2,1). Les foies des porcs des lots chanvre et colza ont un rapport de 4,1 et 4,4, respectivement. Les foies des animaux du lot palme présentent un rapport de 6,0 contre un rapport de 9,0, statistiquement plus important ($P < 0,05$) pour le lot tournesol.

4. CONCLUSION

Au travers de cette étude il a été démontré, à nouveau, la faisabilité de l'enrichissement de la viande de porc en AG n-3, par la distribution aux porcs de régimes alimentaires riches en ces derniers. L'originalité de cette étude a été de croiser de multiples sources végétales réputées riches en AG n-3 et de les comparer entre elles. De plus, à notre connaissance, il s'agit de la première étude qui mesure l'impact des phénomènes technologiques de cuisson extrusion des graines incorporées dans le régime sur le dépôt des AG n-3 au sein des tissus.

Nos travaux ont permis de montrer que l'utilisation de différentes sources végétales d'AG n-3 et de différents procédés de cuisson-extrusion ne conduisait pas à des différences significatives sur les paramètres de croissance des animaux. L'indice de consommation, le gain moyen quotidien et la quantité d'aliment ingéré quotidiennement sont identiques d'un lot à l'autre.

De plus, nous avons aussi montré qu'il n'y avait pas d'effets sur les paramètres de la qualité de la carcasse mis à part le pH ultime.

Néanmoins, le dépôt des AG n-3 n'est pas similaire d'une source végétale à l'autre. Le lin reste la source privilégiée puisqu'étant la plus riche en précurseur de la famille des AG n-3, et

induisant une augmentation importante des AG n-3 d'environ 5 fois dans la bardière et 3 fois dans le muscle par rapport aux animaux des lots palme et tournesol. D'autres sources végétales se sont avérées intéressantes telles que le chanvre et le colza, qui augmentent la proportion des AG n-3 respectivement de 2,4 fois et de 1,6 fois dans la bardière face aux lots palme et tournesol. Le chanvre constitue ainsi une nouvelle source végétale plus intéressante que le colza d'un point de vue des apports en AG n-3 au sein des tissus. Enfin, les différents procédés de cuisson extrusion réalisés ont permis de mettre en évidence le bénéfice lié à l'extrusion. Le meilleur procédé technologique (graine de lin A) permet un dépôt supérieur de 26 à 30 % au sein du muscle par rapport aux procédés moins avantageux et à l'huile de lin. L'huile et les procédés technologiques B et C ne sont pas différents entre eux quant à l'enrichissement en AGPI n-3 des tissus

ÉTUDE III

-

EFFETS DES ACIDES GRAS N-3 SUR L'ADIPOCONVERSION DES PREADIPOCYTES DE PORC

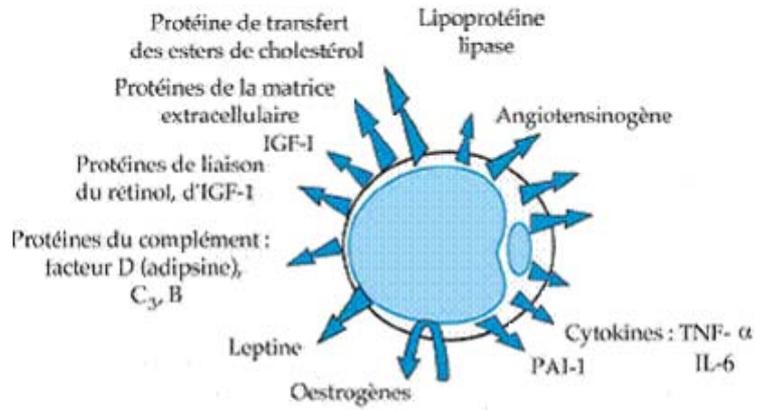


Figure 37. Activités endocrines et paracrines de l'adipocyte (Ailhaud, 1998).

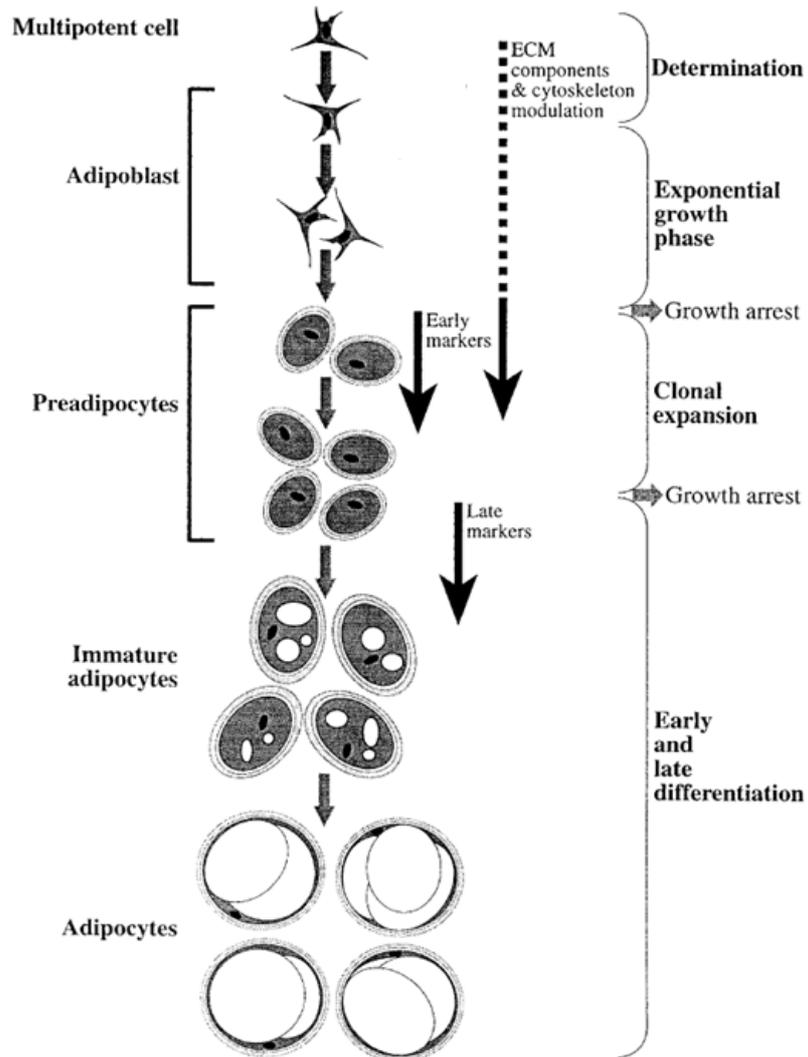


Figure 38. Les différentes étapes de l'adipoconversion (Boone *et al.*, 2000).

1. INTRODUCTION

La mise en place et le développement des tissus adipeux sont sous l'influence des nutriments que vont recevoir le fœtus avant la naissance à travers le placenta puis l'animal nouveau-né par son alimentation lactée.

Le tissu adipeux (TA) se compose majoritairement d'adipocytes présents dans un réseau de tissu conjonctif richement vascularisé et innervé. Par l'intermédiaire de ces cellules, le TA est spécialisé dans le métabolisme des triglycérides et donc dans le stockage énergétique. Longtemps le TA blanc a été considéré comme un simple tissu de stockage des acides gras (AG) sans réelle fonction physiologique, mais il apparaît maintenant que les adipocytes sont également dotés de diverses activités endocrines et paracrines, contrôlant ainsi non seulement leur activité mais également le métabolisme énergétique dans sa globalité (Ailhaud, 1998 ; Boone et al., 2000) (figure 37).

La chronologie de mise en place du TA diffère selon les espèces, le sexe et sa localisation dans l'organisme (Vodovar et al., 1971 ; Desnoyer et Vodovar, 1974 ; Vodovar et al., 1977 ; Poissonnet et al., 1983). La croissance du TA résulte à la fois d'une augmentation du nombre de cellules adipeuses (hyperplasie) et de leur taille individuelle (hypertrophie) (Anderson et Kauffman, 1973).

L'adipoconversion est caractérisée par deux grandes étapes : la prolifération active des cellules précurseurs et la différenciation de ces cellules en adipocytes matures (Gregoire et al., 1998 ; Boone et al., 2000) (figure 38). Lorsque les cellules sont engagées dans la différenciation adipocytaire, elles sont nommées préadipocytes précoces. A ce stade, elles commencent à exprimer des marqueurs précoces de l'adipoconversion comme pref-1 (preadipocyte factor-1), C/EBP β (CCAAT/enhancer binding protein), PPAR γ (peroxysome proliferator activated receptor γ), SREBP1 (Sterol Responsive Element Binding Protein 1) et la lipoprotéine lipase (LPL). Pref-1 est une protéine transmembranaire qui est synthétisée par les préadipocytes (Boney et al., 1996), alors que les des familles C/EBP, PPAR et SREBP sont des familles de facteurs de transcription (Mandrup et Lane, 1997). Les préadipocytes acquièrent ensuite des marqueurs tardifs tels que les enzymes de la lipogenèse : la glucose 6-phosphate deshydrogénase (G6PDH), l'enzyme malique (EM) et la FAS (Fatty Acid Synthase). Ces préadipocytes tardifs sont alors capables d'accumuler des gouttelettes lipidiques. Enfin, ces cellules acquièrent des phénotypes très tardifs qui correspondent, par

exemple, à la sécrétion de leptine (Van Harmelen et al., 1998). Elles deviennent alors des adipocytes entièrement fonctionnels (Ailhaud et al., 1992) qui contiennent de larges gouttelettes lipidiques qui repoussent le noyau vers la périphérie de la cellule.

De nombreux facteurs, extra ou intracellulaires, induisent et modulent l'adipoconversion (Ailhaud et al., 1992 ; Gregoire et al., 1998). L'héritage génétique est responsable d'une part plus ou moins importante de ce développement, mais les conditions nutritionnelles sont aussi connues pour influencer l'adiposité. Parmi les facteurs alimentaires, il apparaît que les AG peuvent réguler le développement du TA. Certaines études leur confèrent même un rôle de « pseudo-hormones », car au niveau nucléaire, ils stimulent la transcription de gènes par l'intermédiaire d'un ou plusieurs récepteurs nucléaires, dont PPAR γ (Ailhaud et al., 1996 ; Sessler et Ntambi, 1998). Cependant, il est à noter que selon la longueur de leur chaîne carbonée, leur degré d'insaturation et leur concentration, les AG ont une implication différente. Par exemple, l'acide palmitique (C16:0) et les AG à longue chaîne favorisent l'accumulation de triglycérides dans les adipocytes (Gaillard et al., 1989 ; Amri et al., 1994 ; Amri et al., 1995 ; Grimaldi et al., 1999), alors que les AGPI peuvent inhiber l'adipoconversion, notamment en agissant comme des répresseurs de la transcription de désaturases (Ntambi et al., 1996). Il a également été montré que l'acide oléique (C18:1) et le LA favoriseraient la différenciation des préadipocytes (Ding et al., 2003).

Les dépôts adipeux influencent les différentes qualités de la viande. Leur mise en place et leur développement sont des processus physiologiques indispensables, car ils possèdent des fonctions majeures au sein de l'organisme. Une meilleure connaissance du processus d'adipoconversion ainsi que des différents facteurs qui l'influencent, de façon positive ou négative, est donc importante dans la perspective d'un meilleur contrôle des dépôts adipeux ce qui influencera la qualité nutritionnelle de la viande.

L'objectif de cette étude vise à déterminer l'influence de la nature des AG sur la prolifération et la différenciation des préadipocytes de porcelets en culture primaire. Les AG utilisés pour cette étude appartiennent à la famille des AG n-3 (ALA, EPA et DHA) et n-6 (LA et ARA). Ils sont ajoutés au milieu de culture à deux concentrations différentes : 10 et 100 μ M. Deux doses sont testées car d'après la littérature, des études ont démontré que selon leur concentration, les AG jouent un rôle de pseudo-hormone (Grimaldi et al., 1999) et/ou possèdent un effet cytotoxique sur les cellules (Gaillard et al., 1989 ; Gerfault, 1999).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1.Culture cellulaire

2.1.1. Prélèvement du tissu adipeux et obtention des préadipocytes

Les animaux utilisés sont des porcelets (LargeWhite – Landrace x Piétrain), âgés de 5 à 8 jours. Ils sont anesthésiés à l'abattoir expérimental par éthernarcose cervicale, puis sacrifiés par saignée à la jugulaire. Dans des conditions stériles, environ 10 g de tissu adipeux sous-cutané dorsal (TASCD) sont prélevés immédiatement après l'abattage de l'animal. Le principe d'obtention des préadipocytes isolés repose sur une digestion enzymatique du tissu frais par la collagénase (De Clercq et al., 1997).

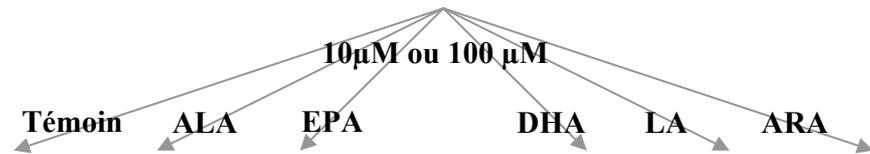
Le TASCD prélevé est fractionné mécaniquement en présence de tampon HEPES Phosphate (Annexe 4). Ensuite, les échantillons sont incubés à 37°C dans une solution de digestion (2 mL/g de tissu adipeux) composée de tampon HEPES Phosphate, additionné de 2% (p/v) d'albumine sérique bovine (BSA) et de 2 mg/mL de collagénases ($\frac{3}{4}$ de type II et $\frac{1}{4}$ de type XI). Au cours de cette digestion enzymatique, la suspension cellulaire subit également une dissociation mécanique toutes les 20 minutes. Après une heure de digestion, cette dernière est stoppée par ajout de 20 mL/tube de tampon HEPES Phosphate. Le digestat est déposé sur un filtre de nylon (pores de 200 μ m) et le filtrat est centrifugé à 400 g pendant 10 minutes à température ambiante, de manière à obtenir un culot (la fraction stroma vasculaire) qui contient, notamment, les préadipocytes. Le surnageant et les adipocytes matures sont éliminés et le culot est remis en suspension dans du tampon HEPES Phosphate, avant d'être filtré successivement à travers des filtres de nylon de 100 et 25 μ m, afin d'éliminer les agrégats cellulaires. Après une nouvelle centrifugation de ce filtrat (10 minutes à 400 g) et l'élimination du surnageant, le culot est mis en suspension dans un volume connu de tampon HEPES Phosphate.

Une fraction aliquote de la suspension (20 μ L) est colorée au bleu de Trypan (20 μ L) et les préadipocytes sont dénombrés à l'aide de l'hémocytomètre de Bürker au microscope photonique. Le nombre moyen de cellules par carré (N_c) est déterminé à partir de 40 carrés (surface d'un carré = 1/16 mm², hauteur = 0,1 mm, volume = 1/160 mm³). Le nombre de cellules par mL de suspension cellulaire (N) est donc calculé en appliquant la formule suivante : $N = N_c \times 160 \times 1000 \times 2$.

Jour 0

Milieu d'inoculation
DMEM + 10 % sérum veau fœtal

Jour 1



Milieu de différenciation
DMEM / F12 (1/1)

Milieu de prolifération
DMEM + 10 % à 2,5 % sérum de porc

Jour 3 Marquage au rouge à huile

Incorporation
³H-thymidine
sur 24h

Jour 6 Marquage au rouge à huile
Activité de l'enzyme malique
Composition en acides gras
Expression de gènes cibles RT-PCR

-

Jour 9 Marquage au rouge à huile
Activité de l'enzyme malique
Composition en acides gras

-

Figure 39. Schéma expérimental des cultures primaires de préadipocytes de porcelet sur 9 jours (37°C ; 5% CO₂).

ALA : acide α-linolénique ; ARA : acide arachidonique ; DHA : acide docosahexaénoïque ; DMEM : milieu de Eagle modifié par Dulbecco ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; LA : acide linoléique

2.1.2. Mise en culture des préadipocytes

Les cellules sont mises en culture immédiatement après le comptage (J0) dans des plaques de 24 puits (1,8 cm²/puits ; 0,5 mL de milieu/puits) aux densités de 60 000 et 100 000 cellules/cm² pour étudier, respectivement, la prolifération et la différenciation adipocytaires. Des plaques de 6 puits (9,6 cm²/puits ; 2,5 mL de milieu/puits) sont également utilisées pour l'analyse de l'expression de différents gènes ; dans ce cas, la densité est de 100 000 cellules/cm². Le schéma expérimental des conditions de culture est détaillé dans la figure 39. Durant les 24 premières heures de culture, les cellules sont incubées dans un milieu d'inoculation (Annexe 5).

A partir de J1 de culture, les cellules sont cultivées dans un milieu sérique pour étudier la prolifération ou dans un milieu défini pour étudier la différenciation ou l'expression génique (Annexe 5). A ces deux milieux de culture est également ajouté l'acide gras d'intérêt (ALA, EPA, DHA, LA ou ARA) complexé à de l'albumine, à une concentration de 10 ou 100 µM ; dix effecteurs différents sont ainsi comparés. Les cellules sont appelées témoin lorsqu'elles n'ont eu aucun contact avec un acide gras ajouté.

Les cellules sont maintenues en culture pendant 10 jours (de J0 à J9) à 37°C sous atmosphère à 5% de CO₂ et les milieux sont renouvelés à J3 et J6.

2.1.3. Préparation des complexes albuminiques d'acides gras

Les AG sont saponifiés par 1 mL de NaOH dans du méthanol à 0,5 M pendant 30 minutes à 70°C. Après évaporation sous flux d'azote du solvant, les sels d'AG sont dissous dans du milieu DMEM contenant 1% (p/v) de BSA. La complexation s'effectue pendant au minimum 12 heures sous agitation, à 4°C (Rioux et al., 2000). Après ajustement du pH à 7,4, le milieu complexé est stérilisé sur une membrane de 0,2 µm.

2.2. Mesure de la prolifération des préadipocytes

La capacité de prolifération des préadipocytes est évaluée en mesurant l'incorporation de thymidine tritiée dans les cellules (Boone et al., 2000) ; chaque mesure est réalisée avec 4 puits. Au jour J3 de culture, la thymidine tritiée (³H-thymidine, 27 Ci/mmol, Amersham) est ajoutée au milieu sérique à raison de 1 µCi/mL (soit 0,5 µCi/puits ou 18,5 kBq/puits) et l'incubation dure 24 heures. A J4, les cellules sont rincées trois fois avec du DMEM contenant de la thymidine froide en excès. Les cellules sont détachées après une incubation de 30 minutes à 37°C en présence d'une solution de trypsine à 0,5% (p/v) dans du tampon Earl (Annexe 4) et sont recueillies dans un tube à scintillation en présence de 5 mL de liquide

scintillant (Packard Ultima Gold). La radioactivité contenue dans les tubes est comptée pendant 2 minutes à l'aide d'un compteur β et est exprimée en coups par minutes (cpm). Pour l'analyse des résultats, l'incorporation du tritium par les cellules est calculée en fonction de celle des cellules témoins, qui est considérée comme une base de 100.

2.3. Mesure de la différenciation des préadipocytes

Pour chaque marqueur de la différenciation, nous disposons de deux puits par effecteur. Ces puits sont ensuite traités individuellement, excepté pour la détermination de la composition en AG des cellules pour laquelle le contenu des deux puits est regroupé.

2.3.1. Histologie

Après élimination du milieu de culture à J3, J6 et J9, les cellules sont fixées par une solution de Bouin pendant 2 heures au minimum. Les cellules sont ensuite rincées 3 fois à l'eau distillée, avant d'être colorées, successivement, par une solution de rouge à huile diluée (3 volumes de solution mère (0,5% (p/v) dans de l'isopropanol) pour 2 volumes d'eau distillée) et d'hémalum de Mayer diluée (3 volumes de solution mère (Annexe 4) pour 1 volume d'eau distillée). Chaque coloration dure 30 minutes et des rinçages à l'eau de ville sont effectués entre chaque. Le rouge à huile colore les lipides cellulaires et l'hémalum de Mayer les noyaux et le reste de la cellule. L'estimation de la proportion de cellules en cours de différenciation s'effectue par comptage des cellules sur des images numériques (4 photographies/puits) par l'intermédiaire du logiciel ImageJ.

2.3.2. Mesure de l'activité d'enzymes de la lipogenèse

2.3.2.1. Mesure de l'activité de l'enzyme malique

Le milieu de culture est éliminé à J6 et J9 et les cellules sont directement récupérées dans 0,5 mL de tampon saccharose à 0,25 M. Après désintégration des membranes cellulaires par ultrasons, les homogénats sont conservés à -80°C jusqu'à analyse.

L'activité de l'EM est déterminée selon méthode décrite par Hsu et Lardy (1969) par le suivi de l'apparition du NADPH à 340 nm. La méthodologie employée est décrite dans le chapitre « matériels et méthodes général ». L'activité spécifique de l'EM est exprimée en nmol de NADPH/min/mg de protéine.

2.3.2.2. Détermination de la quantité de protéines

La quantité de protéines est déterminée par colorimétrie sur microplaque de titration selon la méthode BCA (Bicinchoninic Acid) décrite par Smith et al., (1985).

2.3.3. Détermination de la composition en acides gras

2.3.3.1. *Extraction des lipides*

La méthode de Dole (Dole, 1960) permet d'extraire les lipides, et plus particulièrement les AG à longue chaîne, contenus dans une suspension cellulaire. A un volume de suspension cellulaire sont ajoutés 2,5 volumes de solution de Dole (alcool isopropylique 80%, heptane 20%, acide sulfurique 0,02 N). Après une agitation forte de ce mélange, de l'heptane (1,5 volume) et de l'eau (1 volume) sont ajoutés. Suite à cette extraction, la phase organique est prélevée et évaporée sous flux d'azote. Les lipides sont ensuite saponifiés puis dérivés en esters méthyliques afin d'analyser les AG par Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG).

2.3.3.2. *Saponification et dérivation en esters méthyliques*

La dérivation des AG totaux en esters méthyliques se fait selon la méthode au trifluorure de bore (BF_3 ; Morisson et Smith, 1964). La méthodologie employée est décrite dans le chapitre « matériels et méthodes général ». Simplement, après avoir récupérés les esters méthyliques dans du solvant organique, celui-ci est évaporé sous flux d'azote et les esters méthyliques sont repris par 200 μL de pentane pour être analysés par CPG.

2.3.3.3. *Analyse par chromatographie en phase gazeuse*

Les esters méthyliques d'AG sont analysés par chromatographie en phase gazeuse selon la méthodologie décrite dans le chapitre « matériels et méthodes général ». La composition en acides gras est exprimée en pourcentage des AG identifiés.

2.3.4. Biologie moléculaire

2.3.4.1. *Extraction des ARN totaux et transcription inverse*

Au sixième jour de culture et après élimination du milieu de culture, les cellules sont récupérées dans 1 mL de TRIzol[®] (Gibco Life Technologies) puis congelées à -80°C , en attendant d'en extraire les ARN totaux. Au vu des résultats obtenus avec les différents paramètres, seuls les préadipocytes de 4 porcs, incubés avec un AGPI à 100 μM , sont analysés pour cette étude.

Tableau 66. Amorces utilisées pour la PCR en temps réel.

Gènes	Numéro d'accès	Amorce sens	Amorce anti-sens
EM	X93016	5'-TGGTGACTGATGGAGAACGTATTC-3'	5'-TCCTTGAACCGTCTGTGTTC-3'
LPL	X62984	5'-CCCGACGACGCAGATTTC-3'	5'-GGATGGCTTCCCAATGTTA-3'
FADS1	AK238564	5' CCTGCATGCTCATCACCAGAT 3'	5' GCCCGATGTGCTGGAAGAT 3'
FADS2	AY692366	5' TTAATAGAGCGAAACCCGCCG 3'	5' TTCTTCAGGGCCCGGAA 3'
ELOVL5	DY434342	5' CTACTTCTCCAAGCTCATCGAGTTC 3'	5' CACATGCAGGACGGTGATCT 3'
PPAR- γ	AF103946	5'-ATTCCCGAGAGCTGATCAA-3'	5'-TGGAACCCCGAGGCTTTAT-3'
SREBP-1	AF102873	5'-CGGACGGCTACAATGC-3'	5'-GCAAGACGGCGATTTATTC-3'
TNF- α	M29079	5'-GGTTATCGGCCCCAGAA-3'	5'-TGGGCGACGGGCTTATC-3'

EM : Enzyme malique ; LPL : Lipoprotéine lipase ; FADS1 : Fatty acid desaturase 1 ; FADS2 : Fatty acid desaturase 2 ; ELVOL5 : Elongation of very long chain fatty acids protein 5 ; PPAR γ : Peroxisome proliferator activated receptor gamma ; SREBP1 : Sterol responsive element binding protein 1 ; TNF α : Tumor necrosis factor alpha.

Pour l'extraction, les cellules sont tout d'abord éclatées à l'aide d'un broyeur à bille (Qiagen) pendant deux fois deux minutes à une fréquence de 30 Hz. Ensuite, 200 µL de chloroforme sont ajoutés au broyat et le mélange est homogénéisé 15 secondes au vortex puis centrifugé 15 minutes à 12 000 g à 4°C. Après récupération de la phase aqueuse, les ARN sont précipités par l'addition de 500 µL d'isopropanol et une centrifugation de 10 minutes à 12 000 g à 4°C. Puis le précipité est lavé avec 1 mL d'éthanol à 70% et centrifugé 5 minutes à 7 500 g à 4°C avant d'être séché. Le culot est finalement repris dans 50 µL d'eau stérile exempte de RNase et DNase. La quantité des ARN est déterminée à l'aide du Nanodrop (Thermo Scientific) en réalisant une lecture spectrophotométrique à 260 nm (1 unité d'absorbance correspond à 40 µg/mL d'ARN). Quant à leur qualité, elle est estimée grâce au rapport des absorbances à 260 nm et 280 nm (qui doit être supérieure à 1,8), mais est également vérifiée par électrophorèse sur gel d'agarose à 1,2%, contenant du bromure d'éthidium, dans du tampon MOPS 1X (Annexe 4).

Afin de minimiser une contamination par de l'ADN génomique résiduel, 2 µg d'ARN sont traités à la DNase selon les recommandations du kit « DNA-free » (Applied Biosystems).

Les ADNc des échantillons sont générés par transcription inverse à partir de 1 µg d'ARN à l'aide du kit « High capacity cDNA Archive Kit » (Applied Biosystems). Les échantillons sont ensuite dilués de façon à obtenir une concentration finale d'ADNc de 1 ng/µL pour la réalisation de la PCR quantitative en temps réel (RT-PCRq).

2.3.4.2. PCR quantitative en temps réel

La RT-PCRq permet d'évaluer le niveau d'expression de gènes en quantifiant les ADNc amplifiés grâce au suivi de la fluorescence émise par l'échantillon au cours du temps. L'agent fluorescent intercalant utilisé pour la détection des amplicons des gènes d'intérêt est le SyberGreen® (BioRad), alors que pour le gène 18S, utilisé pour la normalisation des résultats, il s'agit d'une sonde Taqman® (Applied Biosystems).

Les couples d'amorces (sens et anti-sens) spécifiques de nos gènes d'intérêt ont préalablement été définies au sein du laboratoire (tableau 66). Leur efficacité (E) est déterminée sur une gamme de dilution d'ADNc allant de 0,016 à 10 ng. La valeur de la pente de la droite obtenue permet de calculer l'efficacité de PCR selon l'équation : $E = 10^{(1/\text{pente})} - 1$.

Les réactions de PCR en temps réel sont réalisées par l'intermédiaire du système de détection de séquences ABI PRISM® 7000 (Applied Biosystems). Le programme d'amplification est le suivant : un cycle d'activation de 10 minutes à 95°C, suivi de 40 cycles d'amplification (comportant une phase de dénaturation de 15 secondes à 95°C) puis une étape d'hybridation

Tableau 67. Caractéristiques des animaux abattus pour l'analyse de l'adipoconversion des préadipocytes du tissu adipeux sous cutané dorsal.

Porc	Age (j)	Poids (kg)	Sexe	Cellules prélevées ($\cdot 10^6$)/g de TA
1	5	2,36	F	6,97
2	7	3,12	M	7,33
3	8	2,52	F	6,77
4	8	2,86	F	5,78
5	8	4,02	F	6,37
6	7	3,7	F	7,16
7	6	2,52	M	8,69
8	6	2,82	F	8,30

F : femelle ; M : mâle ; TA : tissu adipeux sous cutané dorsal.

Tableau 68. Effet de l'introduction des acides gras dans le milieu de culture sur la prolifération des préadipocytes.

Dose	Témoin	ALA	EPA	DHA	LA	ARA
10	100	108 ± 9	103 ± 12	102 ± 9	103 ± 15	105 ± 13
100	100 a	83 ± 11 ab	84 ± 13 ab	79 ± 10 b	104 ± 10 a	99 ± 10 a

Effet dose

$p < 0,001$

$p < 0,008$

$p < 0,001$

NS

NS

Les résultats sont exprimés en pourcentage par rapport au témoin. Pour chaque culture, la valeur du témoin est considérée comme base 100. Les valeurs des puits expérimentaux de l'ensemble des cultures réalisées (moyenne ± écart-type de 8 porcelets) sont comparées à cette base 100.

Les valeurs en ligne avec des lettres identiques ne sont pas différentes entre elles au seuil de 5%. L'effet dose a également été mesuré. ALA : acide α -linoléique ; ARA : acide arachidonique ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; LA : acide linoléique.

et de polymérisation d'une minute à 60°C. Chaque échantillon, contenant 5 ng d'ADNc, est analysé en triple. Deux contrôles négatifs sont réalisés en parallèle : un de transcription inverse et un autre sans ADNc. De plus, un échantillon calibrateur, constitué d'un pool d'ADNc, est aussi amplifié sur chaque plaque de 96 puits afin de prendre en compte la variabilité inter-plaque.

L'expression relative du gène cible (ratio) est calculée en tenant compte de l'expression de ce gène cible dans le calibrateur et en normalisant l'expression par rapport au gène de référence ARN 18S. Les efficacités de la PCR des gènes cibles et de la PCR du gène 18S étant environ égales à 1, l'expression relative est calculée suivant la formule (Pfaffl, 2001) :

$$\text{Ratio} = 2^{-\Delta\text{CT}(\text{gène} - \text{calibrateur})} / 2^{-\Delta\text{CT}(\text{gène 18S} - \text{calibrateur 18S})}$$

2.4. Analyses statistiques des résultats

Les résultats ont été comparés par analyse de la variance avec le traitement comme effet principal selon la procédure GLM de SAS (SAS, 1989). La comparaison des moyennes deux à deux a été réalisée à l'aide du test de Bonferroni.

3. RESULTATS

Les résultats proviennent de l'analyse des préadipocytes du TASCd de huit porcelets âgés de $6,8 \pm 1,1$ jour pour un poids de $3,0 \pm 0,6$ kg. En moyenne, la quantité de préadipocytes prélevés s'élève à $7,2 \cdot 10^6$ cellules / g de TA. Aucune relation n'a été mise en évidence entre le poids et l'âge du porcelet avec le nombre de cellules obtenues (tableau 67).

3.1. Effets des acides gras sur la prolifération des préadipocytes

Les résultats présentés dans le tableau 68 montrent l'effet de l'introduction des AG, ainsi que leurs doses, sur la prolifération des préadipocytes par l'intermédiaire de la quantité de thymidine tritiée incorporée dans les cellules. Pour chaque culture, la valeur du témoin est considérée comme une base 100. Les valeurs moyennes des puits expérimentaux de l'ensemble des cultures réalisées sont comparées à cette base 100.

A une concentration de 10 µM, les taux d'incorporation de tritium ne diffèrent pas de manière significative en fonction de l'AGPI ajouté dans le milieu. A 100 µM, il existe un effet entre les AG. Ceux de la famille des n-3 diminuent l'incorporation de radioactivité dans les préadipocytes d'environ 20% par rapport au témoin ($p < 0,05$). Le DHA est celui qui favorise

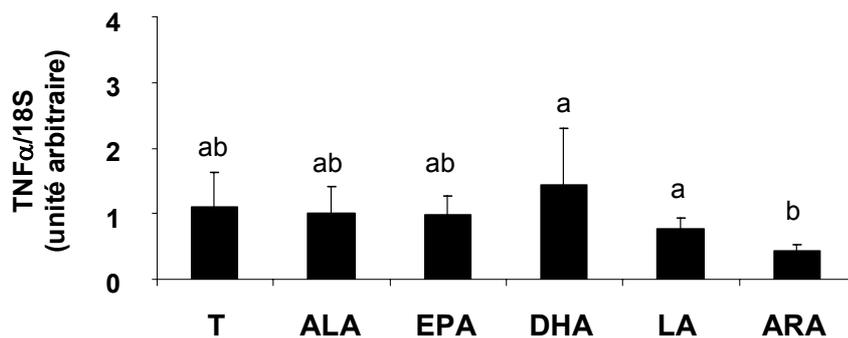


Figure 40. Effet de l'ajout des AGPI n-3 et n-6 à 100 μ M dans le milieu de culture sur la quantité d'ARN transcrits du gène TNF α (tumor necrosis factor α), exprimés en unité arbitraire (ratio gène/18S), des préadipocytes à J6 de culture (moyenne \pm écart type de 4 porcelets). Les lettres identiques indiquent que les valeurs ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 5%. ALA : acide α -linoléique ; ARA : acide arachidonique ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; LA : acide linoléique ; T : milieu témoin.

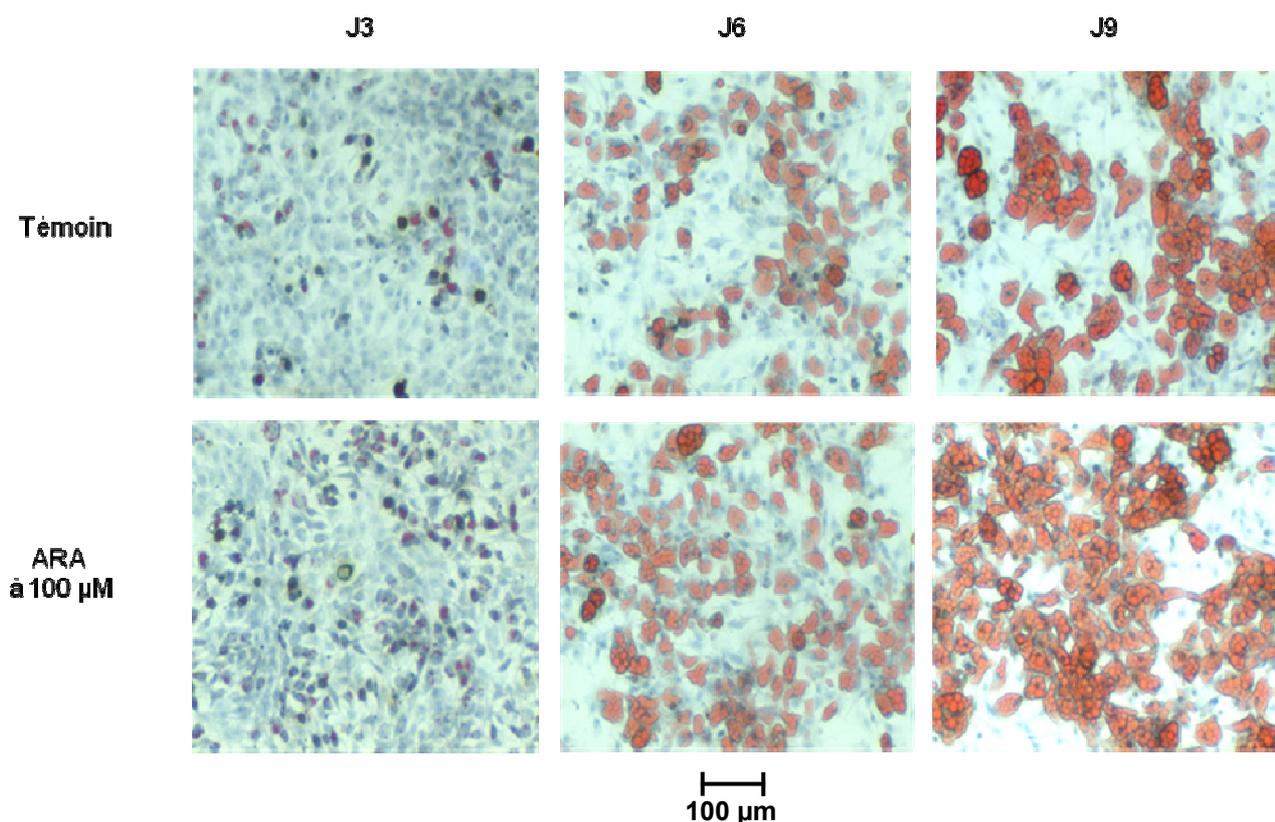


Figure 41. Photographies de champs microscopiques montrant l'évolution d'une culture de préadipocytes témoin ou avec de l'ARA à 100 μ M, à J3, J6 et J9 de culture, suite à une coloration au rouge à huile et à l'hémalum de Mayer. Les gouttelettes lipidiques colorées en rouge, au sein des cellules, correspondent à des préadipocytes en cours de maturation.

ARA : acide arachidonique

le plus cette baisse d'incorporation. A l'inverse la prolifération des cellules recevant les AGPI n-6 n'est pas significativement modifiée par rapport au témoin.

Ainsi, l'effet dose est tout particulièrement marqué pour la famille des n-3. En effet, en présence d'une concentration en ALA, EPA ou DHA de 100 μ M, l'incorporation de radioactivité par les préadipocytes diminue de manière significative (respectivement $p < 0,001$, $p < 0,008$ et $p < 0,001$) par rapport à celle avec une concentration de 10 μ M.

Le niveau d'expression du gène du TNF α , marqueur de la prolifération adipocytaire, est influencé par les AGPI à 100 μ M (figure 40). L'augmentation de son niveau d'expression est marqueur d'une baisse du nombre d'adipocytes. Ceci conforte les observations concernant l'incorporation de thymidine tritiée. L'ajout d'ARA diminue significativement les quantités d'ARN transcrits comparé aux cellules en milieu avec du DHA. L'introduction des AGPI n-3 dans le milieu de culture ne modifie pas l'expression du TNF α par rapport à la culture témoin sans acide gras ajouté.

3.2.Effets des acides gras sur la différenciation des préadipocytes

3.2.1. Analyse histologique des préadipocytes

Une première approche visuelle des photographies prises aux trois différents jours de culture nous permet d'observer l'évolution des préadipocytes en culture (figure 41). En examinant les clichés avec les cellules témoin, nous constatons une augmentation croissante du nombre de cellules en cours de différenciation (cellules colorées en rouge) par rapport au nombre de préadipocytes non différenciés (cellules bleues), en fonction du jour de culture. De plus, ce constat se confirme en calculant cette proportion après le dénombrement de l'ensemble des cellules présentes sur chaque cliché. Il s'avère que pour les cellules témoin, cette proportion s'élève à 25% à J3 de culture, 43% à J6 et 56% à J9.

L'observation des photographies met également en évidence le fait que lorsque les cellules évoluent dans le temps, leur taille augmente quasiment de moitié. L'augmentation du volume cellulaire est liée aux processus de différenciation cellulaire, l'accumulation de lipides en étant le processus final. Ces premiers résultats confirment les cultures témoins réalisées précédemment au sein du laboratoire (Gerfault, 1999).

Qu'ils soient introduits à 10 ou 100 μ M dans les milieux, les AGPI n-3 ne modifient pas de manière significative la proportion de cellules en cours de maturation par rapport aux cellules témoins. Seuls les AGPI n-6 à une concentration de 100 μ M agissent sur ce paramètre. En

effet, l'ajout d'ARA à 100 μ M augmente de 13, 14 et 17%, respectivement à J3, J6 et J9, la proportion de cellules en cours de différenciation par rapport aux cellules témoin. Cette différence est également visible lorsque nous comparons les photographies de cellules témoin et celles ayant été en contact avec l'ARA.

3.2.2. Effets des acides gras sur l'activité d'enzyme de la lipogénèse

L'activité de l'EM a été mesurée pour tous les effecteurs à J6 de culture. Pour chaque culture, la valeur du témoin est considérée comme une base 100, puis les valeurs moyennes des puits expérimentaux de l'ensemble des cultures réalisées sont comparées à cette base 100.

Les activités enzymatiques varient faiblement selon l'acide gras ajouté quelle que soit sa concentration (tableau 69). Aucune différence significative n'a été relevée entre et au sein des deux familles d'AG, ni par rapport au témoin, lorsqu'ils sont ajoutés à 10 μ M. Pour une concentration de 100 μ M, seul un acide gras se distingue significativement des autres : le LA, qui augmente l'activité de l'EM de 37% ($p < 0,05$) par rapport au témoin. Pour la famille des AGPI n-3, nous observons que l'activité de l'EM a tendance à diminuer : - 8% pour l'ALA (NS) ; -11% pour l'EPA (NS) et -23% pour le DHA. ($p < 0,07$).

L'analyse de l'expression du gène codant pour l'EM montre également l'effet du LA à 100 μ M, car ce dernier augmente de façon significative la quantité d'ARN transcrits dans les préadipocytes par rapport au témoin ($p < 0,02$) (figure 42A). Cette analyse d'expression génique dévoile aussi que l'ALA accroît significativement ($p < 0,04$) les ARN de l'EM comparé au témoin.

L'introduction d'AGPI n-3 ou n-6 ne semble pas influencer les quantités d'ARN codant pour la lipoprotéine lipase (LPL ; figure 42B).

3.2.3. Effets des acides gras sur les facteurs de transcription

Deux facteurs de transcription ont été analysés par RT-PCRq : PPAR γ et SREBP1. L'ajout d'AGPI n-3 ou n-6 dans les milieux ne modifie pas significativement les quantités d'ARN transcrits par ces gènes (tableau 70).

3.2.4. Effets des acides gras sur la composition lipidique des cellules

Les profils lipidiques des préadipocytes ont été identifiés au stade J6.

La composition en AG des cellules varie en fonction des AGPI n-3 ou n-6 ajoutés (figure 43). En effet, plus leur concentration est élevée dans les milieux d'incubation, plus l'incorporation

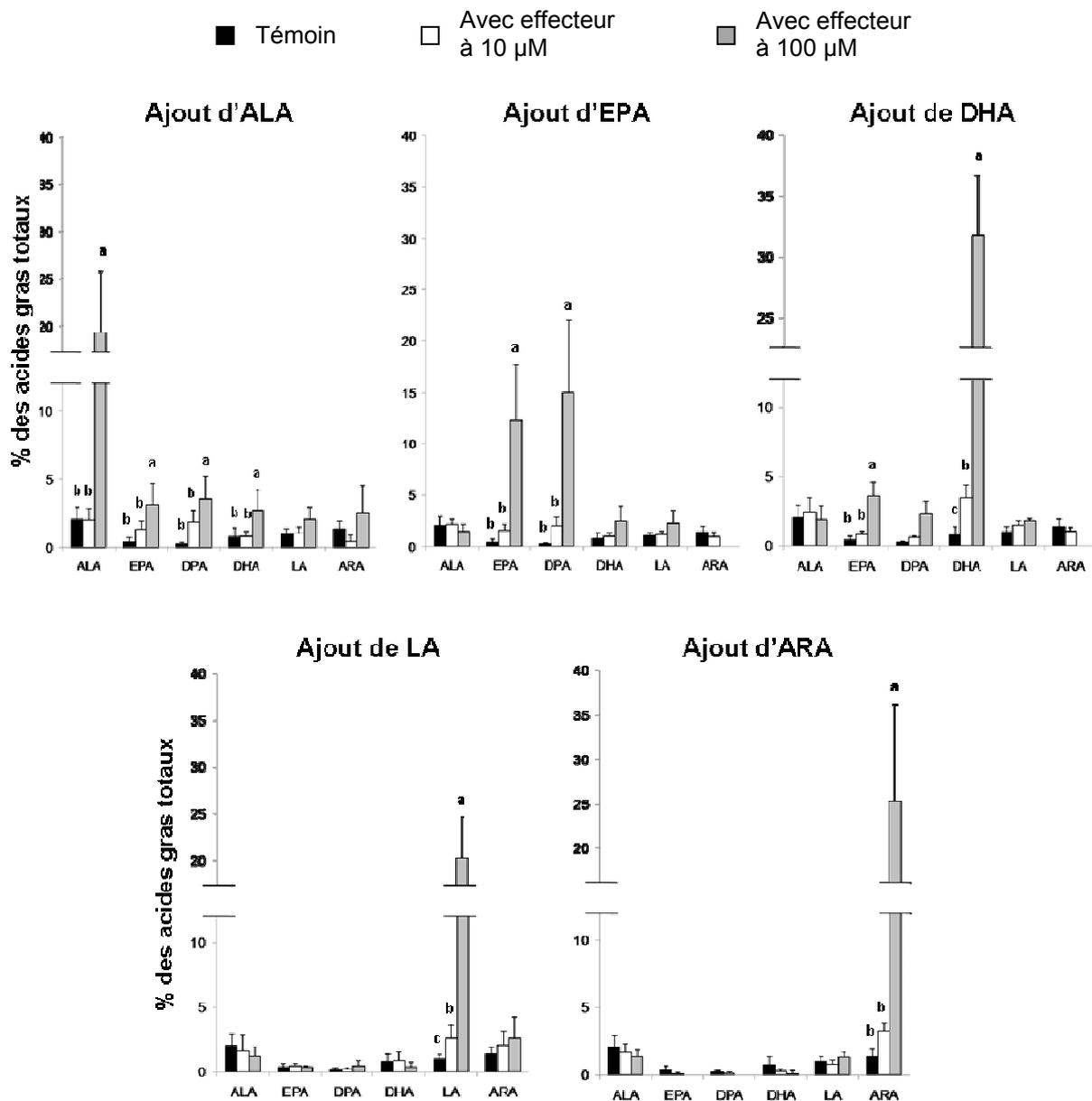


Figure 43. Comparaison des teneurs des principaux AGPI n-3 et n-6 (en pourcentage des acides gras identifiés) des préadipocytes témoïn (■) avec ceux incubés avec de l'ALA, EPA, DHA, LA ou ARA à 10 (□) ou 100 µM (▒) jusqu'à J6 de culture (moyenne ± écart-type de 8 porcelets).

Les lettres identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes, pour un acide gras donné, au seuil de 5%. ALA : acide α -linoléinique ; ARA : acide arachidonique ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; LA : acide linoléique.

de ces AG dans les cellules est importante. Pour simplifier l'analyse des résultats, nous avons choisi de sélectionner certains AG : le C16:0, produit terminal de la synthèse des AG, le C18:0 et le C18:1 qui sont des AG majoritaires chez le porc, le C18:1 étant aussi un reflet de l'activité de la $\Delta 9$ -désaturase. Nous présenterons également les AG choisis dans les milieux de culture (ALA, EPA, DHA, LA et ARA) ainsi que le DPA, acide gras de la famille n-3.

L'analyse des profils lipidiques montre que les différents AG substrats ont été incorporés dans les préadipocytes. La dose 10 μM semble avoir des effets très limités, mais leur quantité augmente significativement lorsqu'ils sont ajoutés au milieu à la dose 100 μM . Les proportions d'ALA, EPA, DHA, LA et ARA atteignent alors respectivement 19, 12, 32, 20 et 25% des AG identifiés, soit environ dix fois plus que dans les cellules témoin.

Pour une concentration de 100 μM , la proportion de dérivés n-3 ou n-6 s'accroît en fonction de l'acide gras ajouté. En effet, l'ajout d'ALA augmente, de manière significative par rapport au témoin, les proportions d'EPA (de 0,4% à 3,2%), de DPA (de 0,2% à 3,6%), de DHA (de 0,8% à 2,8%), et d'ARA (de 1,4% à 2,5%), tandis que l'ajout d'EPA accroît les teneurs de DPA (de 0,2% à 15%), ces quantités sont d'ailleurs supérieures à la teneur en EPA présente (12,3%). Le DHA croît lorsqu'il est substrat et également sous l'influence de l'introduction de ALA. Lorsque les cellules sont incubées en présence de DHA, nous observons une augmentation des quantités de DPA (0,2% à 2,3%) et d'EPA (de 0,4% à 3,6%).

En ce qui concerne les AG n-6, l'ajout de LA diminue fortement les teneurs en EPA, DPA et DHA et augmente les proportions d'ARA (de 1,4% à 2,7%), mais également le C20:3 n-6 (résultats non présentés) qui est le produit du LA faisant suite à une $\Delta 6$ -désaturation puis une élongation. L'ajout d'ARA diminue également fortement les teneurs en EPA, DPA et DHA par rapport à ce qui est observé avec les autres effecteurs.

Concernant les AG à 16 et 18 carbones, l'ajout d'AGPI à 100 μM diminue significativement leur quantité par rapport au témoin, excepté pour le C18:0 pour lequel cet effet est moins marqué (tableau 71). La dose à 10 μM ne semble pas avoir d'effet sur la concentration de ces AG. La somme des AG saturés, monoinsaturés et polyinsaturés va dans le même sens.

L'expression des gènes codant pour les enzymes intervenant dans la biosynthèse des AGPI à longue chaîne a également été étudiée ; le gène FADS1 qui code pour la $\Delta 5$ -désaturase, FADS2 pour la $\Delta 6$ -désaturase et ELOVL5 pour l'élongase 5 (figure 44).

Tableau 71. Teneurs en C16:0, C18:0 et C18:1 n-9 (en pourcentage des acides gras identifiés) des préadipocytes témoins et ceux incubés avec de l'ALA, EPA, DHA, LA ou ARA à 10 ou 100 μM , à J6 de culture (moyenne \pm écart-type de 8 porcelets).

Doses	<i>T</i>	<i>ALA</i>		<i>EPA</i>		<i>DHA</i>		<i>LA</i>		<i>ARA</i>	
	-	10 μM	100 μM								
C16:0	23,7 ^a $\pm 1,2$	22,1 ^a ± 1	18,4 ^b $\pm 2,6$	21,7 ^a $\pm 2,2$	20,7 ^b $\pm 4,5$	20,6 ^b $\pm 0,9$	17,5 ^b $\pm 1,9$	22,1 ^a $\pm 0,8$	18,8 ^b $\pm 1,2$	23,7 ^a $\pm 2,3$	20,1 ^b ± 2
C18:0	9,8 ^a $\pm 1,2$	10,9 ^a $\pm 1,4$	10,9 ^a $\pm 0,5$	9,3 ^a $\pm 1,4$	11,4 ^b $\pm 1,5$	10,1 ^a $\pm 0,9$	10,8 ^a $\pm 1,1$	10,5 ^a $\pm 0,9$	8,3 ^b $\pm 1,4$	10,9 ^a $\pm 1,6$	10,4 ^a $\pm 1,6$
C18:1	45,3 ^a $\pm 3,2$	48,5 ^a $\pm 3,8$	22,6 ^b $\pm 3,3$	48,2 ^a $\pm 6,5$	22,3 ^b $\pm 2,4$	44,3 ^a $\pm 4,8$	20,2 ^b $\pm 2,3$	46,3 ^a $\pm 6,3$	34,5 ^b $\pm 2,4$	46,1 ^a $\pm 6,2$	24,1 ^b $\pm 9,6$

Les lettres identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes par rapport au témoin pour un acide gras ajouté donné, au seuil de 5%. ALA : acide α -linoléique ; ARA : acide arachidonique ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; LA : acide linoléique ; T : milieu témoin.

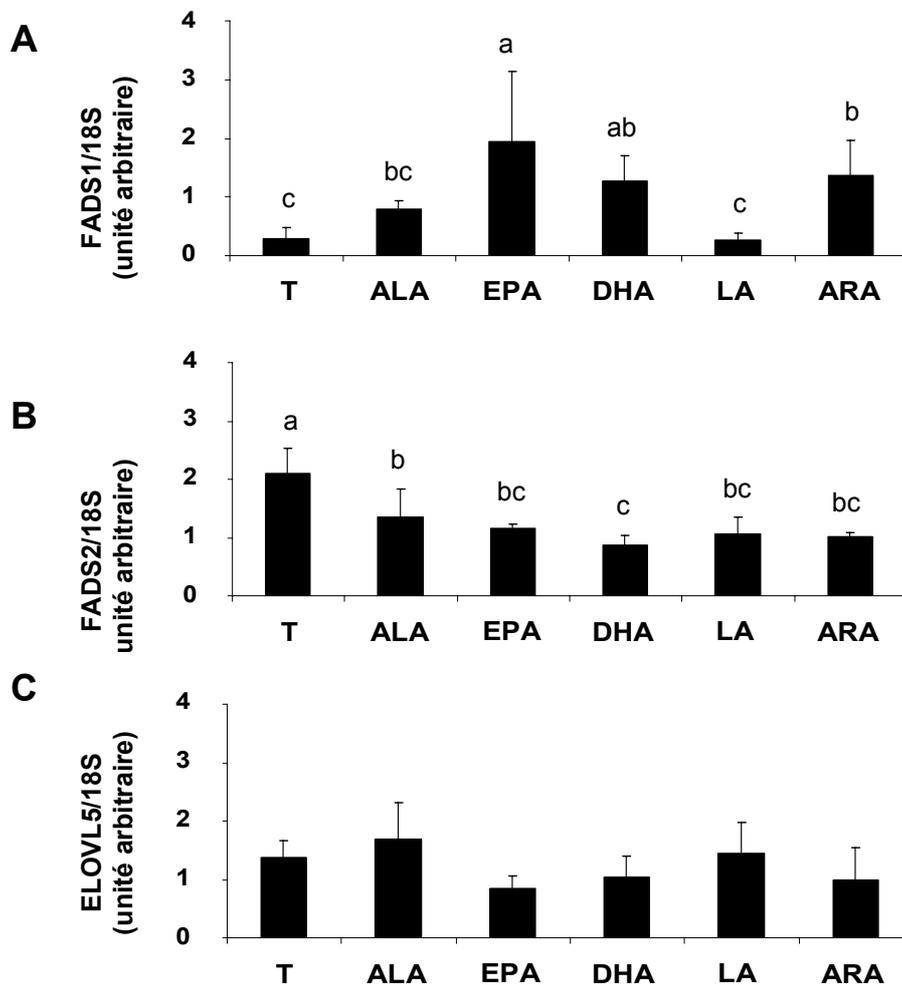


Figure 44 : Effet de l'ajout des AGPI n-3 et n-6 à 100 μM dans le milieu de culture sur la quantité d'ARN transcrits du gène FADS1 (fatty acid desaturase 1 ; A), FADS2 (fatty acid desaturase 2 ; B) et ELOVL5 (elongation of very long chain fatty acids ; C), exprimés en unité arbitraire (ratio gène/18S), des préadipocytes à J6 de culture (moyenne \pm écart type de 4 porcelets).

Les lettres identiques indiquent que les valeurs ne sont pas significativement différentes entre elles au seuil de 5%. ALA : acide α -linoléique ; ARA : acide arachidonique ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; LA : acide linoléique ; T : milieu témoin.

La quantité de transcrits de FADS1 est augmentée significativement avec l'introduction des AGPI dans le milieu de culture à l'exception de l'apport de LA qui ne modifie pas cette expression. A l'inverse, l'expression de FADS2 est diminuée significativement par l'introduction de tous les AGPI, le DHA diminuant le plus cette expression génique. Concernant le gène ELOVL5, les AGPI ne modifient pas significativement son expression par rapport à la culture témoin. En revanche, il existe une différence significative entre l'ALA qui augmente cette expression génique et l'EPA et l'ARA qui la diminuent ($p < 0,05$).

4. DISCUSSION

4.1. Effets de la concentration en AGPI sur l'adipoconversion des préadipocytes

Un des objectifs de cette étude consistait à déterminer la concentration en AGPI ayant un effet sur l'adipoconversion des préadipocytes. Il s'avère que pour l'ensemble des marqueurs étudiés (prolifération, histologie, activité de l'EM), il n'y ait que la dose de 100 μ M d'acide gras qui fasse varier significativement les différents paramètres par rapport aux cellules témoin. De plus, cette quantité correspond à la dose d'un acide gras dans des conditions physiologiques. Elle reflète ainsi les conditions naturelles d'exposition des cellules à ces molécules. Cependant, nos résultats sont différents de ceux trouvés dans la littérature (Gaillard et al., 1989 ; Gerfault, 1999) qui mentionnent l'effet cytotoxique des AG (LA et ARA) à 100 μ M pour les préadipocytes.

La discussion des résultats suivants concerneront uniquement les effets des AGPI ajoutés à une concentration de 100 μ M dans les milieux de culture.

4.2. Effets des AGPI sur l'adipoconversion des préadipocytes

4.2.1. Les AGPI n-3 ralentissent la prolifération cellulaire

Les AGPI n-3 et plus particulièrement le DHA ralentissent la prolifération cellulaire, car ils diminuent le taux d'incorporation de thymidine tritiée dans les cellules (tableau 68) et augmentent l'expression génique du TNF α (figure 40).

Ce dernier est reconnu comme étant un puissant inhibiteur du processus de l'adipoconversion (Boone et al., 2000). De plus, lorsque les quantités de TNF α diminuent, le nombre de préadipocytes augmente (Hausman et al., 2001). Ainsi, plus les quantités de TNF α sont importantes, plus la prolifération ralentit. Nos résultats permettent de confirmer ce phénomène. Cependant, afin de confirmer réellement ces données, d'autres analyses devront

être effectuées, notamment pour quantifier les quantités de TNF α , car lors de nos expériences seules les quantités d'ARN codant pour cette cytokine sont évaluées.

Il s'avère que l'acide gras qui diminue le plus la prolifération cellulaire est le DHA. L'implication de cet AGPI n-3 dans ce phénomène n'est pas encore expliquée, mais il se pourrait qu'il influence une lyse cellulaire. En effet, son incorporation dans les préadipocytes modifie la structure des phospholipides des membranes de par sa configuration spatiale, les rendant vraisemblablement plus fragiles.

Il est à noter également que les différences entre les effecteurs (témoin et acides gras) ne sont pas très marquées. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'au moment du prélèvement, les préadipocytes sont en phase secondaire de prolifération, c'est-à-dire celle d'expansion clonale (figure 38). Or la phase de prolifération la plus active se situe pendant la phase exponentielle de croissance au moment où les adipoblastes se convertissent en préadipocytes (Boone et al., 2000). Les cellules ne sont donc pas dans les conditions les plus optimales pour exprimer ce marqueur.

4.2.2. Les AGPI n-6 augmentent la différenciation cellulaire

Globalement, les résultats montrent que les AGPI n-6 augmentent l'expression génique et l'activité de l'EM (tableau 69 et figure 42A) ainsi que les proportions des cellules en cours de maturation. Cet effet confirme les études réalisées auparavant (Ailhaud et al., 1996 ; Ding et al., 2003 ; Ailhaud et al., 2006).

Au cours de la différenciation cellulaire, les préadipocytes présentent une capacité métabolique importante de par l'induction d'enzymes spécifiques, comme la LPL et l'EM. La LPL, marqueur précoce de la différenciation, a pour rôle de capter les triglycérides circulants, provenant soit des chylomicrons, soit des VLDL, pour ensuite libérer les AG libres dans la cellule (Taskinen et Kuusi, 1987). L'EM, quant à elle, est un marqueur tardif de la différenciation et permet de fournir du NADPH₂ (donneur d'hydrogène nécessaire à la biosynthèse des AG) en transformant l'acide malique en pyruvate. Les actions de ces enzymes se traduisent par une accumulation progressive de vacuoles lipidiques dans le cytoplasme des préadipocytes, ce qui augmente leur volume.

L'ajout d'AGPI n-3 ou n-6 ne semble pas influencer l'expression génique de la LPL (figure 42B). L'activité de cette enzyme devra donc être mesurée ultérieurement afin de confirmer ce résultat. Il faut noter également que les analyses de gènes sont effectuées sur des

cellules cultivées pendant 6 jours. Ainsi, l'expression génique de la LPL, enzyme surtout active en début de l'adipoconversion, n'y est probablement plus à son maximum.

Les résultats obtenus suite à l'ajout de LA ou d'ARA confirment la relation qui existe entre l'activité de l'EM et la proportion de cellules différenciées. Les AGPI n-6 augmentent donc la différenciation cellulaire. L'augmentation du nombre des transcrits EM suite à l'ajout d'ALA à 100 μ M reste cependant inexpliquée.

L'effet adipogénique de l'ARA passe notamment par la formation de prostacycline (Massiera et al., 2003 ; Ailhaud et al., 2006), qui sont des ligands et de puissants inducteurs de certains facteurs de transcription impliqués dans la différenciation adipocytaire. C'est le cas de PPAR γ , sous-type de récepteur nucléaire de la famille PPAR le plus exprimé dans le tissu adipeux, qui est induit au cours de la différenciation. Mais, tout comme dans l'étude de Ding (Ding et al., 2003), nos résultats n'ont pas permis de montrer d'effet spécifique des AGPI sur l'expression de ce gène (tableau 70).

SREBP1 appartient également à une famille de facteurs de transcription impliquée dans la différenciation cellulaire. Son expression, induite très tôt, est dépendante du processus de différenciation (Kim et Spiegelman, 1996). En effet, sa protéine induit l'expression de la LPL et donc par ce biais, contribuerait à la différenciation dans la mesure où les AG ainsi engendrés seraient des ligands activateurs de PPAR γ . L'analyse de l'expression génique de SREBP n'a révélé aucun effet des AGPI n-3 et n-6, mais comme il s'agit d'un facteur très précoce, son expression génique après six jours de culture est probablement très diminuée. De plus, ceci expliquerait le « non effet » des AGPI sur l'expression des ARN de la LPL et de PPAR γ .

4.2.3. Evolution des profils lipidiques en fonction des AGPI ajoutés

L'analyse du profil en AG (figure 43) a permis de mettre en évidence que la biosynthèse des AGPI n-3 et n-6 existe dans les préadipocytes des cultures témoin car la majorité des AG sont retrouvés dans les cellules.

L'ajout des précurseurs à 100 μ M dans le milieu augmente les quantités de leurs dérivés respectifs. En revanche, à 10 μ M, peu d'effets des AGPI ajoutés ont été observés. Ainsi à faible concentration, ces AGPI sont probablement utilisés essentiellement pour le métabolisme énergétique, alors qu'à forte dose, ils seraient en plus stockés dans les préadipocytes et/ou incorporés au niveau des membranes. Cette incorporation au sein des membranes cellulaires peut se faire au détriment des autres AG. Cela explique que l'ajout

d'AGPI diminue les quantités d'AG saturés (C16:0 et C18:0) et monoinsaturés (C18:1) (tableau 71), initialement majoritaires dans les cellules témoins. La diminution des quantités de C16:0, produit final de la biosynthèse des AG, peut également signifier que les AGPI réduisent la synthèse de novo d'AG. Cependant, il faut faire attention lors de l'interprétation de ces résultats car les valeurs d'AG sont exprimées en pourcentage des AG identifiés. Ainsi, lorsque d'un côté la proportion d'un acide gras augmente fortement, la proportion des autres AG diminue.

La biosynthèse des AGPI n-3 est particulièrement active dans les préadipocytes car l'ajout d'ALA augmente les quantités de DHA (figure 43). Ceci s'oppose aux résultats des études précédentes menées chez de nombreuses espèces, notamment l'Homme (Brenna, 2002) et le porc (Kouba et al., 2003), qui démontrent que la conversion de l'ALA en DHA est très faible dans des cellules matures ou chez l'animal adulte. La biosynthèse des AGPI n-3 serait donc préférentiellement active dans des cellules en cours de différenciation provenant d'individu jeune, comme ceci a été montré *in vivo* par des travaux très récents au sein du laboratoire (De Quelen, 2007 ; Douard et Mourot, soumis à publication). D'après ces résultats, la teneur en DHA est très élevée dans les tissus et le sang des porcelets à la naissance (plus de 10% des AG totaux), mais dès le 3^{ème} jour de vie de l'animal puis au moment du sevrage (à 28 jours) elle diminue pour atteindre une teneur identique à celle observée chez l'adulte, soit moins de 1 % des AG tissulaires. L'analyse de l'expression du gène codant pour la Δ 6-désaturase (FADS2) ne permet pas de confirmer cet effet, car l'ajout d'ALA diminue la quantité de transcrits de ce gène dans les cellules (figure 44B). L'ALA diminuerait ainsi les quantités de Δ 6-désaturase alors qu'il s'agit d'une enzyme clé pour la biosynthèse des AGPI n-3 car elle y intervient à deux niveaux. Nos résultats sont donc contradictoires entre l'expression du gène et la teneur en AG. Ce type de résultats a également été observé sur des cellules hépatocytaires humaines (Portolesi et al., 2008), de souris (Cho et al., 1999a) et de rat (Cho et al., 1999b).

L'ajout d'EPA ne permet pas d'augmenter les quantités de DHA. Une étude montre que cet effet serait dû à une faible conversion de l'EPA en DPA par l'intermédiaire de l'élongase ELOVL-2 (Goyens et al., 2005). Or, d'après nos résultats (figure 43), l'ajout d'EPA dans les milieux augmente significativement les quantités de DPA cellulaire. L'allongement de l'EPA en son produit direct ne serait donc pas une étape limitante à la biosynthèse du DHA.

L'ajout de DHA dans le milieu augmente de manière significative les quantités de DHA mais aussi d'EPA. Pour cet acide gras, ceci peut être la conséquence d'un phénomène de

rétroconversion, processus peroxysomal dans lequel le DHA subit une β -oxydation partielle suivit d'une ényl-réduction pour former de l'EPA (Schlenk et al., 1969). La rétroconversion est essentielle pour assurer un niveau d'EPA suffisant pour la production des eicosanoïdes, surtout en cas de déficit en EPA (Conquer et Holub, 1997).

La biosynthèse des AGPI n-3 est active dans les préadipocytes, mais celle des n-6 l'est beaucoup moins car l'ajout de LA ne permet pas d'augmenter significativement les quantités d'ARA. Dans la bibliographie, il a été montré que la conversion du LA en ARA peut être ralentie lorsque le rapport LA/ALA diminue (Hussein et al., 2005). Or, dans notre cas de figure, nous augmentons ce rapport car le LA est ajouté à 100 μ M contre 0 μ M d'ALA. Nous n'avons pas d'hypothèse expliquant ce phénomène.

La présence d'ARA dans le milieu diminue très fortement les teneurs en EPA, DPA et DHA cellulaire à des quantités inférieures à celles décelées dans les cellules témoin. L'ARA à 100 μ M jouerait alors un rôle d'inhibiteur vis-à-vis des dérivés n-3. Il existe certaines compétitions entre les familles n-3 et n-6 car leurs voies de biosynthèse partagent les mêmes enzymes : la $\Delta 6$ et la $\Delta 5$ -désaturase, les élongases, mais aussi les cyclooxygénases qui permettent la production d'eicosanoïdes à partir d'ARA ou d'EPA. Ainsi, l'introduction d'AGPI n-6 sature ces enzymes, ce qui provoque une baisse considérable de la biosynthèse des AGPI n-3 à partir des précurseurs présents initialement dans les préadipocytes. De plus, il s'avère que l'ARA est une molécule qui ressemble à l'EPA de par sa formule chimique. L'ARA pourrait donc se substituer plus rapidement à l'EPA au niveau des membranes, par exemple. Or si les quantités d'EPA sont plus faibles, il y a également une diminution des quantités de ses dérivés, notamment le DPA.

L'analyse de l'expression du gène de la $\Delta 5$ -désaturase montre une augmentation de la quantité de transcrits principalement suite à l'ajout d'EPA et d'ARA dans le milieu (figure 44A). Ces résultats sont en contradiction avec ceux obtenus précédemment (Cho et al., 1999b). Sachant que ces deux AG sont les produits de cette désaturation, ils auraient pu diminuer les quantités d'ARN codant pour la $\Delta 5$ -désaturase, en assurant alors un rétrocontrôle négatif sur l'enzyme lorsque les taux d'EPA ou d'ARA sont suffisants dans la cellule.

Dans notre étude, les AGPI n-3 et n-6 ne modifient pas significativement la quantité de transcrits de l'élongase 5 dans les préadipocytes par rapport à la culture témoin (figure 44C). Néanmoins, une très forte variabilité individuelle est observée par d'importants écarts-types. L'augmentation du nombre d'individus pourrait peut être diminuer cette variabilité et être

ainsi en accord avec l'étude de Wang (Wang et al., 2005) qui montre que l'addition d'AG à 20 carbones diminue l'expression génique de l'élongase 5.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude des préadipocytes de porcelets en culture primaire a mis en évidence que les AG influencent, directement ou non, le processus de l'adipoconversion en intervenant sur des marqueurs spécifiques de la prolifération et de la différenciation cellulaire, confirmant ainsi leur rôle de « pseudo-hormone ». De plus, leur nature et la concentration à laquelle ils sont apportés aux cellules modulent les résultats. En effet, bien que les AG testés soient tous essentiels, appartenant soit à la famille des AGPI n-3 (ALA, EPA et DHA) soit à celle des n-6 (LA et ARA), ils ne possèdent pas pour autant les mêmes fonctions au sein des préadipocytes. Parmi les concentrations testées, seule celle à 100 µM permet d'observer des résultats significatifs. Globalement, nous avons montré que les AGPI n-3 ralentissent la prolifération des préadipocytes et que les AGPI n-6 augmentent leur différenciation. Ces résultats obtenus *in vitro* se retrouvent dans les nombreuses études menées *in vivo* chez le porc ou chez l'homme. (Sessler et al., 1998 ; Grimaldi et al., 1999 ; Wilfart et al., 2004b ; Douard et Mourot, soumis)

En augmentant la différenciation cellulaire, les AGPI n-6 favorisent une accumulation plus rapide des lipides au sein des adipocytes et donc à terme un stockage plus important des graisses. Ces résultats confirment les nombreuses études réalisées *in vivo* chez de nombreuses espèces qui démontrent le rôle primordial des AGPI n-6 dans le développement du tissu adipeux et par conséquent sur la prévalence au surpoids et à l'obésité. Afin d'abaisser la prévalence de cette maladie, il est donc nécessaire de diminuer la consommation de ces AG comme le préconisent les apports nutritionnels conseillés. De plus, cela permettrait d'abaisser le rapport n-6/n-3 à une valeur conseillée de 5 et de revaloriser les effets des AGPI n-3 qui ont tendance, à l'heure actuelle, à être inhibés par un excès des apports en AGPI n-6. Les études *in vitro* et *in vivo* concernant les AGPI n-3 semblent montrer qu'ils diminuent la masse adipeuse des individus, en ralentissant notamment la prolifération des préadipocytes. Ils sont donc indispensables à la prévention de l'obésité, surtout dès le plus jeune âge.

Une meilleure compréhension de la mise en place et du développement du tissu adipeux est donc essentielle. Tout d'abord d'un point de vue zootechnique, afin de déterminer la nature et

la dose des AG à intégrer dans les régimes de la truie qui augmenteraient ou diminueraient la production de tissus adipeux du porcelet et du futur porc adulte, et permettraient d'améliorer la qualité nutritionnelle de la viande et également pour extrapoler ces résultats à la femme enceinte afin de maîtriser au mieux la tendance au développement d'une obésité future chez le jeune.

DISCUSSION GENERALE

Tableau 72. Quantités de muscles et de tissus adipeux (en g) dans la carcasse des porcs des études expérimentales menées dans le cadre de la thèse.

Régimes expérimentaux	Muscles		Tissus adipeux	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
Palme ^I	38 600	1 750	15 596	1 397
Tournesol ^I 80-105 kg	41 075	1 510	15 784	1 565
Tournesol ^I 50-105 kg	38 957	1 776	13 636	2 029
Lin ^I 80-105 kg,	39 776	1 461	15 679	1 629
Lin ^I 50-105 kg	37 896	1 968	14 252	1 782
Palme ^{II}	37 186	1 996	13 289	1 626
Tournesol ^{II}	39 886	4 172	13 848	2 269
Lin A ^{II}	38 999	2 044	12 645	3 521
Colza ^{II}	36 328	1 576	14 688	2 319
Chanvre ^{II}	36 446	2 938	13 496	2 187
Lin B ^{II}	37 229	3 106	13 309	2 424
Huile lin ^{II}	36 825	1 157	14 563	2 863
Lin C ^{II}	36 427	2 963	13 629	2 698

^I : Etude expérimentale 1 ; ^{II} : Etude expérimentale 2

Ce travail de thèse a permis de montrer de nouveau toute l'importance des facteurs d'élevage, et notamment de l'alimentation, sur la qualité des produits animaux et en particulier sur la qualité nutritionnelle de la viande de porc (pour revue : Mourot et Hermier, 2001 ; Wood et al., 2008). Certaines informations comme l'effet de l'introduction de graines de lin dans l'alimentation des porcs sur le dépôt en acide gras (AG) n-3 au sein de la viande étaient déjà connues (Romans et al., 1995 a et b ; Riley et al., 2000). Cependant, ce travail a apporté des éléments de réponses originaux notamment en terme de quantité d'AG n-3 dans la viande selon les apports en ces acides gras. Ces derniers étaient modulés selon leur source (lin, chanvre, colza, tournesol, palme), selon leur forme d'apport (huile, graine), leur durée de distribution (50-105 kg, 80-105 kg) et enfin, selon les procédés de cuisson extrusion de la graine de lin (A, B, C).

Par la collecte de résultats sur la composition en AG des principaux muscles (*longissimus dorsi*, *semimembranosus*) et des tissus adipeux (tissu adipeux sous cutané dorsal, panne, tissu adipeux intermusculaire) des porcs ayant été nourris par les différents régimes expérimentaux, nous avons pu construire une base de données. Cette base de données réalisée à partir de nos valeurs expérimentales va nous servir pour mettre en lien la consommation en acide α -linoléique (ALA), son dépôt et la synthèse des AG à longue chaîne. Ainsi, nous avons essayé de faire un bilan de la proportion en ALA déposé au sein des muscles par rapport à ce qui est consommé. De plus, nous avons tenté de prédire le dépôt en AG n-3 par le calcul de régressions linéaires.

Lors de l'introduction de matières première végétales riches en AG n-3 dans l'alimentation des porcs, il apparaît clairement que l'élévation des AG n-3 au sein de la viande se fait essentiellement sous forme d'ALA. La biosynthèse en AG n-3 à longue chaîne à partir du précurseur est limitée. Elle est estimée à moins de 0,5 % chez l'homme (Plourde et Cunnane, 2007).

Bilan du dépôt des acides gras n-3 au sein de la viande de porc.

Par l'abattage des porcs utilisés durant nos études expérimentales au sein de l'UMR SENAH, et par l'utilisation du poids des pièces de découpe primaire, il nous est possible d'estimer la composition tissulaire des carcasses de porc. Ces estimations du poids de muscles et de tissus adipeux de l'ensemble de la carcasse s'effectuent grâce aux équations proposées par Desmoulin et al., (1988). Les valeurs de ces estimations sont rapportées dans le tableau 72.

Tableau 73. Teneur globale en acides gras n-3 dans l'ensemble des tissus adipeux et estimation du pourcentage d'ALA déposé par rapport à l'ALA ingéré.

Régimes expérimentaux	Consommation		Dépôt total dans les tissus adipeux, g								Dépôt en	
	en ALA, g		ALA		EPA		DPA		DHA		ALA, %	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET
Palme ^{II}	91	9	68	13	2	2	8	3	3	2	75	18
Palme ^I	101	6	72	10	2	0	7	1	3	1	71	10
Tournesol ^{II}	106	5	57	22	4	2	7	3	3	2	53	21
Tournesol ^I 50-105 kg	107	11	54	14	2	0	5	1	2	1	50	12
Tournesol ^I 80-105 kg	111	40	79	22	3	1	8	1	3	1	64	19
Colza ^{II}	312	34	131	32	3	2	10	4	3	4	43	14
Chanvre ^{II}	530	63	181	34	4	2	11	3	3	1	34	7
Lin ^I 80-105 kg	724	59	383	73	6	2	16	4	3	1	53	11
Lin C ^{II}	892	105	442	82	7	2	17	3	3	2	50	9
Lin ^I 50-105 kg	1022	97	408	53	6	1	17	3	4	1	40	5
Lin A ^{II}	1263	92	383	212	13	10	21	10	3	2	31	17
Huile lin ^{II}	1281	166	490	105	8	3	19	6	4	2	39	9
Lin B ^{II}	1341	139	454	79	9	3	19	5	4	2	34	8

Tableau 74. Teneur globale en acides gras n-3 dans l'ensemble des tissus musculaires et estimation du pourcentage de l'ALA déposé par rapport à l'ALA ingéré.

Régime expérimentaux	Consommation en		Dépôt total dans les tissus musculaires, g								Dépôt en	
	ALA, g		ALA		EPA		DPA		DHA		ALA, %	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET	Moy.	ET
Palme ^{II}	91	9	3	2	1	0	3	1	1	0	3.6	1.7
Palme ^I	101	6	5	1	2	1	4	1	2	1	4.6	1.3
Tournesol ^{II}	106	5	4	3	1	0	2	1	1	1	4.0	2.9
Tournesol ^I 50-105 kg	107	11	5	3	2	0	4	1	2	1	4.9	2.7
Tournesol ^I 80-105 kg	111	40	7	3	2	1	4	1	1	1	5.7	2.6
Colza ^{II}	312	34	6	1	2	0	3	1	1	1	1.9	0.5
Chanvre ^{II}	530	63	10	5	2	1	5	3	1	1	1.9	0.8
Lin ^I 80-105 kg	724	59	23	9	5	1	6	1	2	0	3.2	1.4
Lin C ^{II}	892	105	20	6	4	1	6	1	1	0	2.3	0.9
Lin ^I 50-105 kg	1022	97	28	12	6	1	8	2	2	1	2.7	1.0
Lin A ^{II}	1263	92	38	27	5	3	6	3	1	0	3.0	2.4
Huile lin ^{II}	1281	166	23	9	5	1	6	1	1	0	1.8	0.9
Lin B ^{II}	1341	139	25	6	6	2	7	2	1	0	1.9	0.4

^I : Etude expérimentale 1 ; ^{II} : Etude expérimentale 2

ALA : acide α -linoléique ; DPA : acide docosapentaénoïque ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque ; ET : écart-type ; Moy : moyenne

De plus, de part la conduite d'élevage qui a été mise en place au sein de l'UMR SENAH, nous avons à notre disposition la consommation réelle des porcs en régimes expérimentaux. Par la connaissance de la composition en acides gras de ces régimes expérimentaux, et en couplant ces différentes données, nous avons la possibilité de déterminer la quantité totale consommée par acide gras. Nous avons aussi connaissance de la teneur en acides gras au sein des différents tissus musculaires et adipeux de l'animal.

La connaissance de toutes ces données nous permet d'estimer la quantité totale d'acides gras déposés dans les différents tissus adipeux et musculaires le jour de l'abattage des animaux.

Les données de la quantité totale du dépôt des AG n-3 ainsi que de l'estimation du dépôt d'ALA dans les tissus par rapport à l'ALA présent dans l'estimation sont rapportées dans le tableau 73 et 74 pour les tissus adipeux et musculaires, respectivement.

La lecture de ces tableaux récapitulatifs nous apporte des informations quant aux dépôts des AG n-3 par rapport à la consommation en ALA. Cela nous permet notamment de confirmer que l'augmentation de la consommation en ALA permet d'augmenter le dépôt de celui-ci dans les tissus adipeux et musculaires. Un autre point mis en évidence est la synthèse d'acide docosapentaénoïque (DPA) à partir d'ALA alimentaire. Le dépôt total en DPA est plus important au sein des tissus adipeux et musculaires que celui de l'acide eicosapentaénoïque (EPA). Les étapes limitantes de la biosynthèse des AG à longue chaîne sont les étapes de désaturation et non pas les étapes d'élongation. L'EPA est le fruit de deux désaturations et d'une élongation de l'ALA, alors que le DPA est le fruit d'une élongation à partir de l'EPA. L'augmentation de la consommation en ALA conduit à une augmentation du dépôt d'ALA, d'EPA et de DPA.

De plus, nous pouvons mettre en évidence que les quantités de l'acide docosahexaénoïque (DHA) contenues dans les tissus adipeux ou bien musculaires sont sensiblement équivalentes quels que soient les régimes expérimentaux distribués aux animaux. Ceci alors même que la quantité totale de l'ALA ingéré a un différentiel de l'ordre de 150 entre les régimes les plus riches (lin) par rapport aux plus pauvres (palme).

Nos données mettent ainsi en évidence que la conversion de ALA en DHA est donc très faible voire nulle.

Cependant, bien qu'un apport massif en ALA par l'alimentation conduit à une élévation du dépôt de ce dernier au sein des tissus, l'efficacité du dépôt ne semble pas se faire de manière linéaire. En effet, le couple absorption en ALA – dépôt en ALA semble plus efficace quand la

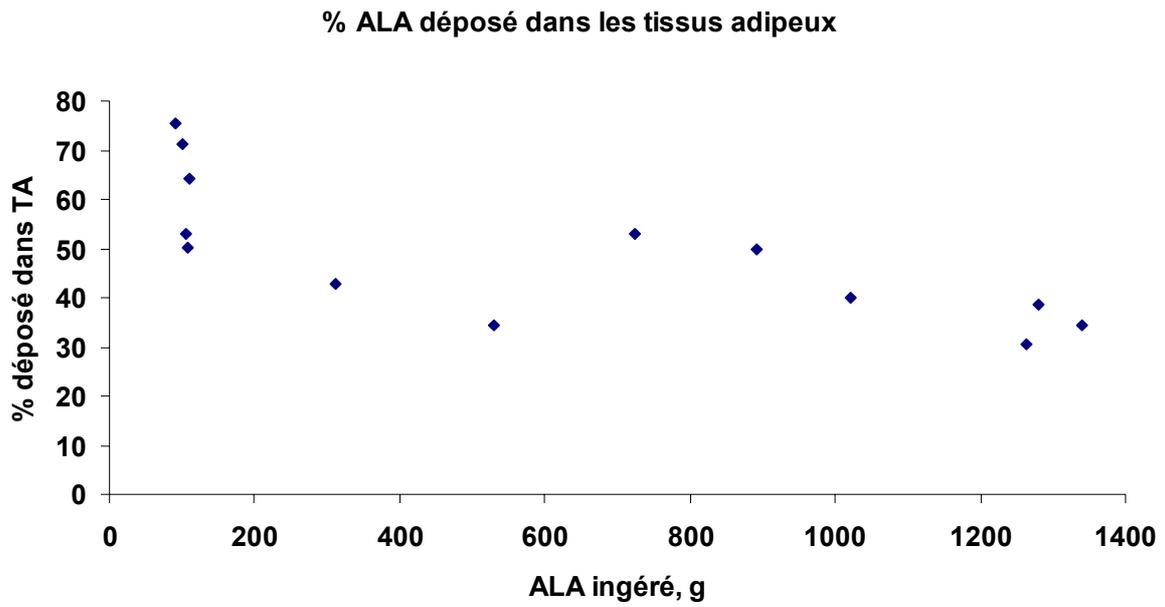


Figure 45. Représentation du pourcentage du C18:3 n-3 (ALA) déposé dans les tissus adipeux (TA) par rapport à la quantité ingérée.

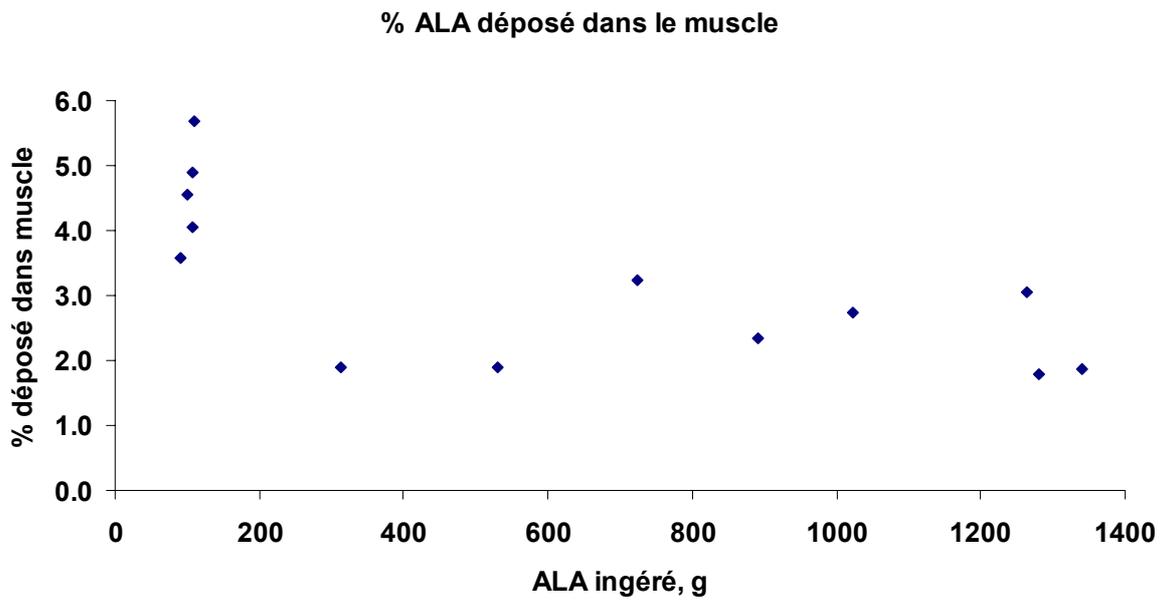


Figure 46. Représentation du pourcentage C18:3 n-3 (ALA) déposé dans les muscles par rapport à la quantité ingérée.

quantité d'ALA ingérée est faible. L'efficacité du dépôt est de l'ordre de 70 à 75 % pour les faibles consommations (palme) contre 30 à 40 pour les fortes consommations (lin).

Les figures 45 et 46 nous montrent le pourcentage d'ALA déposé dans les tissus par rapport à la quantité ingérée pour les tissus adipeux et musculaires, respectivement.

Dans les tissus musculaires, le pourcentage d'ALA déposé est plus faible que dans les tissus adipeux, ce qui est tout à fait logique étant donné que la teneur en lipides est plus faible dans le muscle par rapport aux tissus adipeux.

Ces figures nous permettent de mettre en évidence deux éléments. Le premier est que l'augmentation de la consommation en ALA laisse à penser que le dépôt reste stable au sein des tissus musculaires et adipeux. Le deuxième est que pour les faibles doses de consommation en ALA, il existe une forte variation de l'efficacité du dépôt en ALA allant de 50 à 75 %. Cette différence peut s'expliquer par l'environnement en acides gras dans lequel l'ALA se situe. Nous pouvons notamment penser que la présence d'AG n-6 pourrait en être la cause.

L'efficacité du dépôt d'ALA au sein des tissus adipeux, pour une consommation sensiblement équivalente en acide linoléique (environ 100 g) est de 71 à 75 % pour les animaux des lots palme alors qu'elle est de 50 à 64 % pour les animaux des lots tournesol. Les consommations moyennes en acide linoléique des animaux des lots palme et tournesol sont respectivement égales à 1 330 g et à 2 280 g. Ainsi, il existerait une compétition entre le dépôt des deux précurseurs respectifs des familles des AG n-6 et n-3 au sein des tissus.

Prédiction du dépôt des AG n-3 au sein de la viande de porc

A partir des teneurs en acides gras n-3 déposées dans les tissus musculaires et adipeux et des quantités d'ALA ingérées au cours des expérimentations, des droites de corrélation ont été calculées. Les équations des droites de régression sont rapportées dans le tableau 75 pour les compartiments des tissus adipeux musculaires.

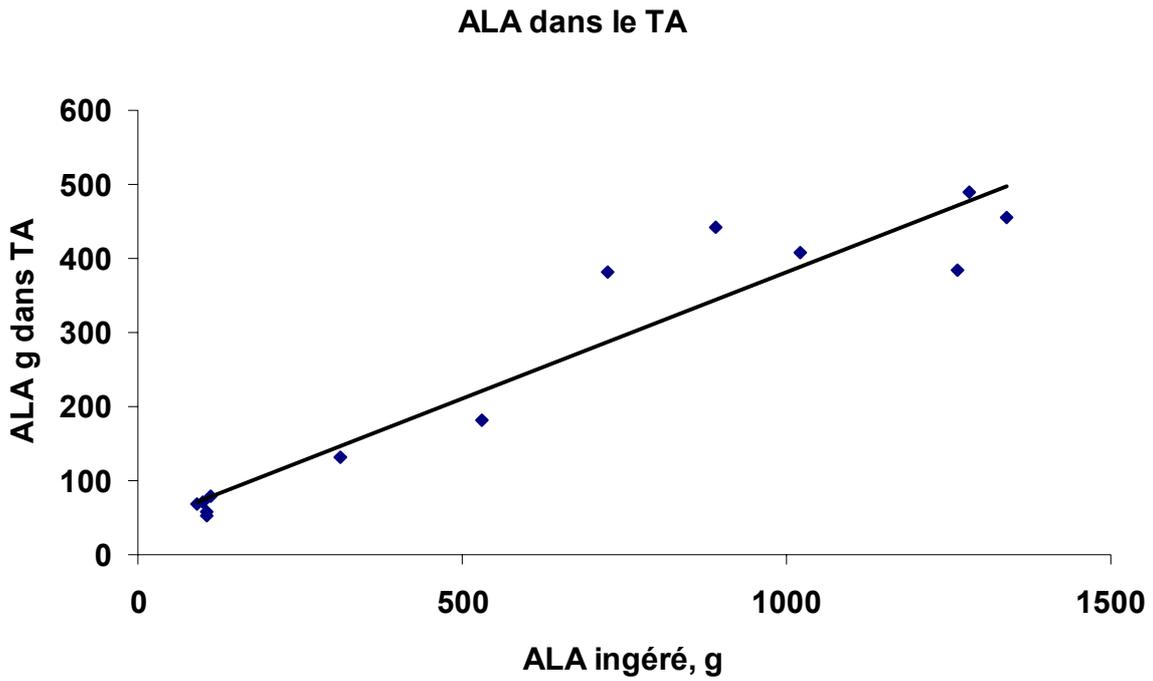


Figure 47. Droite de régression linéaire entre la quantité de C18:3 n-3 (ALA) ingéré et celle déposée dans les tissus adipeux.

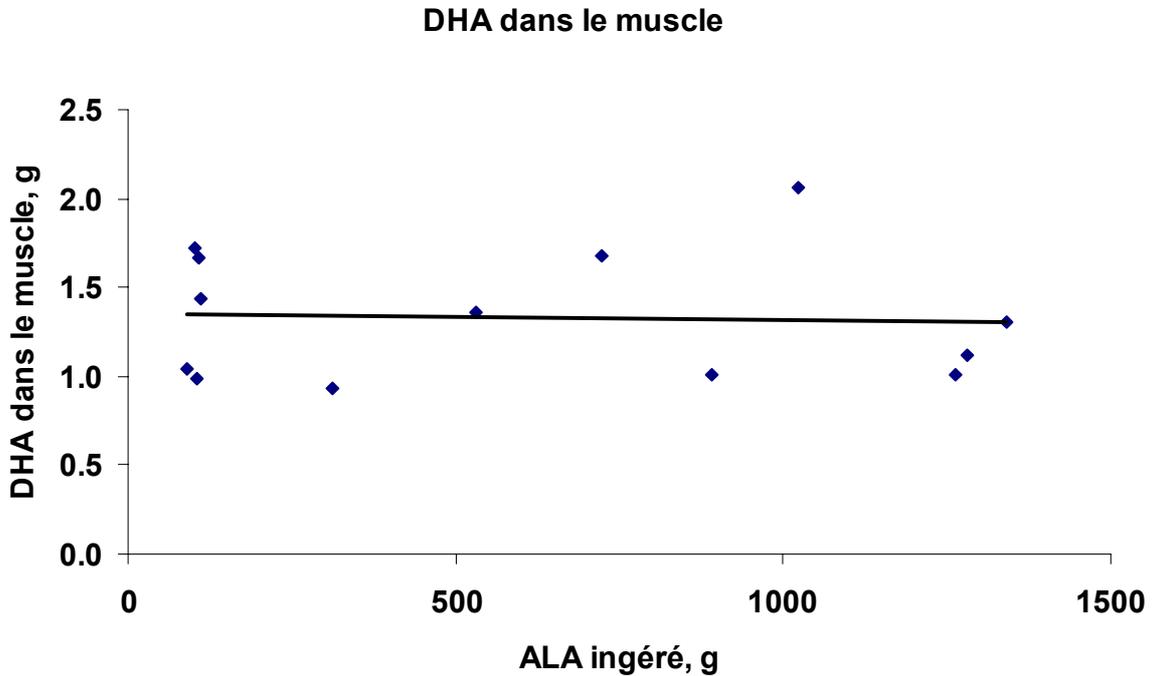


Figure 48. Droite de régression linéaire entre la quantité de C18:3 n-3 (ALA) et celle de DHA déposée dans les tissus musculaires.

Tableau 75. Equation des droites de régression et des coefficients de corrélation en fonction des acides gras n-3 et des tissus.

Acides gras	Equation	R ²	Effet
Tissus adipeux			
ALA	Y = 0,3406 x + 39,751	0,9181	***
EPA	Y = 0,0060 x + 1,7269	0,8288	***
DPA	Y = 0,0108 x + 6,0417	0,9467	***
DHA	Y = 0,0008 x + 2,6670	0,5048	**
Tissus musculaires			
ALA	Y = 0,0210 x + 2,463	0,8525	***
EPA	Y = 0,0035 x + 1,149	0,8218	***
DPA	Y = 0,0031 x + 3,0647	0,7921	***
DHA	Y = -0,0005 x + 1,353	0,0025	NS

NS : p>0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

ALA : acide α -linoléique ; DPA : acide docosapentaénoïque ; DHA : acide docosahexaénoïque ; EPA : acide eicosapentaénoïque

D'après nos données expérimentales, nous n'avons pas mis en évidence de plateau pour le dépôt des acides gras n-3 par rapport à la consommation en ALA. Nous pourrions donc envisager de donner encore plus d'acides gras n-3 pour espérer en obtenir davantage dans la viande.

Dans les figures 47 et 48 sont rapportés deux cas extrêmes en terme d'efficacité de dépôt en ALA.

La figure 47 nous montre une relation linéaire et croissante entre la consommation en ALA par l'animal et le dépôt de celui-ci au sein des tissus adipeux alors que la figure 48 nous montre la droite de régression entre l'ALA ingéré et le DHA déposé sans être significativement influencé.

Il apparaît donc que plus on donnera à l'animal un régime riche en acide linoléique, plus la viande contiendra de C18:3 n-3 et d'acides gras à longue chaîne de cette même famille avec toutefois un effet bien plus limité pour le DHA.

Cependant, il faut garder à l'esprit que la teneur en acides gras n-3 est aussi liée à la teneur en lipides totaux du produit considéré. Or, d'un point de vue nutritionnel, l'apport en lipides totaux doit être limité. Il est recommandé d'avoir un apport quotidien en lipide de 81 g pour un homme adulte. Il faut donc faire une juste part entre les produits riches en lipides et éventuellement en acides gras n-3 si les animaux sont issus de cette filière et les produits pauvres en lipides, qui de toute façon n'apporteraient qu'une quantité limitée en acides gras n-3.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'ensemble de ce travail de thèse nous a permis d'appréhender la construction de la qualité nutritionnelle de la viande de porc. Par ces termes, nous entendons la mise en place et le développement des tissus adipeux en relation avec le métabolisme des lipides, ainsi que les dépôts des AG n-3 au sein de la viande.

Tout d'abord, lors des étapes de mise en place des tissus adipeux chez le porcelet, nous avons mis en évidence que les AG n-3 ralentissaient la prolifération des préadipocytes, au contraire des AG n-6 qui augmentaient leur différenciation. Ceci nous amène à considérer toute l'importance du juste équilibre entre les AG n-6 et n-3 au cours des étapes de prolifération des précurseurs des adipocytes chez le fœtus et le porcelet aussi bien pendant la phase de gestation que de lactation. Chez l'adulte, alors qu'il peut se créer de nouvelles cellules adipeuses, dans des proportions certes moindre que chez le jeune, il serait intéressant de voir si par l'apport des acides gras n-3 on peut maîtriser voire réduire le développement de la masse adipeuse et envisager de contrôler l'obésité.

Le métabolisme des lipides, estimé par les enzymes de la lipogenèse, n'est globalement pas modifié par les régimes expérimentaux. L'accroissement du potentiel de synthèse de l'acétyl-CoA-carboxylase ou de la fatty acid synthase est bloqué du fait du manque de fourniture en co-facteur nécessaire à leur bon fonctionnement. De plus, les teneurs en lipides des tissus ne sont pas modifiées.

Enfin, du point de vue de l'apport en AG n-3 au sein de la viande, nous avons confirmé la faisabilité de la démarche. Leur distribution n'altérerait en rien les performances de croissance de l'animal ainsi que la qualité technologique de la viande.

Nous avons pu mettre en évidence la supériorité des graines de lin face aux autres sources végétales apportant des AG n-3 avec un dépôt en C18:3 n-3 ainsi qu'en C20:5 n-3 et C22:5 n-3 plus important. La proportion de l'acide gras terminal C22:6 n-3 n'est quant à elle pas ou peu augmentée. L'augmentation de durée de la distribution des graines de lin permet une hausse de la proportion des différents AG n-3, y compris du DHA, cet acide gras restant toutefois en très faible quantité. Le chanvre apparaît également comme une source en AG n-3 à considérer.

La hausse de la teneur en AG n-3 au sein de la viande et des produits de transformation répond aux souhaits émis par l'AFSSA dans la dernière édition des Apports Nutritionnels Conseillés. Ces produits sont globalement bien acceptés par le consommateur malgré une susceptibilité à la peroxydation des lipides supérieure pour certains d'entre eux.

Suite à ces résultats, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Tout un axe de recherche peut être basé sur l'efficacité du dépôt de l'ALA au sein des tissus ainsi que sur la biosynthèse de ses dérivés, notamment sur le DHA. Enfin, un deuxième axe pourra être proposé quant à la protection de ces AG d'intérêt au sein de la viande et des produits transformés pour les préserver et rendre ces produits encore plus efficaces pour la santé du consommateur.

Le dépôt d'ALA au sein des tissus du porc, dans nos conditions expérimentales, se fait de manière linéaire par rapport à l'ingestion de celui-ci dans les régimes expérimentaux. Avec les doses utilisées nous n'avons pas observé de plateau ce qui peut signifier que nous pouvons apporter davantage d'AG n-3 dans l'aliment des animaux. Ainsi pour nous permettre d'avoir un apport supérieur en ALA dans notre alimentation, il serait possible d'incorporer des doses plus élevées en ALA au sein des régimes distribués aux animaux. Cependant, une augmentation massive en AG n-3, sans apport en antioxydant adéquat, peut apporter plus d'inconvénients que les avantages pour lesquels ils sont connus. Les AG n-3 sont les AG les plus susceptibles à la lipoperoxydation. Celle-ci par la production de substances toxiques comme les dérivés réactifs de l'oxygène, peut altérer la physiologie de l'animal diminuant ainsi notamment ses performances de croissance et de reproduction. En outre, les qualités technologique et organoleptique des produits de transformation peuvent aussi être diminuées. L'apport en antioxydants dans l'alimentation limite les processus de lipoperoxydation préservant la physiologie de l'animal et la qualité des produits. Dans nos études, la vitamine E était utilisée comme antioxydant. Mais, elle était apportée de manière assez faible (80 ppm) et n'a pas protégé certains produits de transformation des processus de lipoperoxydation, en particulier les produits secs. Plutôt que d'augmenter l'apport en vitamine E qui pourrait être inefficace, voire même désavantageux (pro-oxydant à forte concentration), de nouvelles sources d'antioxydants pourraient être considérées. Les polyphénols ont de multiples propriétés antioxydantes et sont largement répandus dans le monde végétal. On les retrouve dans de nombreuses herbes et épices. Ces extraits de plantes riches en polyphénols pourraient être utilisés dans des études de nutrition chez le porc de manière conjointe, ou non, à la vitamine E, pour étudier leurs effets sur la prévention de la lipoperoxydation.

Enfin, comme nous avons pu le voir, l'apport en ALA dans l'alimentation du porc ne permet pas une hausse de la proportion en DHA au sein de la viande. Les mécanismes de désaturation et d'élongation mis en jeu pour la synthèse du DHA sont connus, mais les facteurs qui

limitent cette action sont encore méconnus actuellement dans la viande. Chez l'homme, le passage de l'ALA en DHA est très limité et est estimé à 1 %. Plusieurs hypothèses peuvent être cependant proposées quant à la compréhension des différents mécanismes. Le passage du DPA au DHA nécessite l'action de trois opérations successives (élongation, désaturation, β -oxydation partielle). L'élongation ne semble pas être limitante, contrairement aux désaturations et à l'étape peroxysomale. Une étude *in vitro* spécifique sur ces enzymes pourrait être menée sur un modèle de cellules isolées avec l'incorporation de DPA marqué pour étudier les mécanismes mis en jeu. Des études *in vivo* peuvent être aussi menées en incorporant massivement le DHA dans l'alimentation des porcs. Les huiles de poisson peuvent être envisagées, mais, du fait de leur raréfaction, de leur coût et de la possibilité de leur contamination par différents polluants comme les métaux lourds, les dioxines et les PCBs, d'autres sources en DHA doivent être considérées. Une alternative aux huiles de poisson pourrait être l'utilisation de micro-algues qui en contiennent jusqu'à près de 45 % au sein de l'huile extraite. Leur incorporation dans l'alimentation des porcs, nous permettrait d'une part d'observer le dépôt de ce dernier dans la viande, et le cas échéant de mettre en évidence une éventuelle remobilisation du DHA vers d'autres organes fortement consommateurs comme le cerveau. La mobilisation du DHA dans le métabolisme de l'oxydation peroxysomale est aussi à considérer par son suivi. Toutefois l'utilisation de ces algues en alimentation porcine, visant à une production de masse, ne peut pas être envisagée actuellement du fait du coût élevé de ces algues.

Les perspectives évoquées précédemment sont proposées dans un esprit purement fondamental, ceci pour la compréhension des mécanismes de la construction de la qualité nutritionnelle chez le porc. Or, dans la réalisation d'une science dite appliquée, il est nécessaire de prendre en considération l'aspect financier. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on effectue ses travaux de recherche à l'INRA dont une des missions est de réaliser de la science à finalité agronomique. Ainsi, les interactions avec les industriels sont nombreuses et riches d'enseignements. Il convient donc de trouver un juste équilibre entre les apports en AG n-3 et en facteurs protecteurs et le coût pour y arriver. Tout nouvel intrant dans une formule à un coût. En guise d'illustration, des études économiques, sur l'enrichissement de la viande de porc en AG n-3 par l'introduction de graines de lin dans leur alimentation, ont estimé une hausse de 1 € du coût de revient par carcasse (Chesneau, communication orale). Remplacer la source de lipides que sont les graines de lin par des micro-algues, multiplie considérablement le prix de revient de la carcasse limitant ceci, pour l'heure, aux seuls essais expérimentaux.

Pour les antioxydants, il s'agit d'entamer la même réflexion, bien que la vitamine E soit relativement peu chère face aux nouvelles sources que sont les extraits de plantes riches en polyphénols.

Toute cette démarche qui consiste à améliorer la qualité nutritionnelle des produits animaux par un enrichissement naturel en acides gras n-3 vise une amélioration de la santé humaine au niveau des maladies cardio-vasculaires et des paramètres lipidiques sanguins. Cette démarche s'appuie sur des résultats concrets montrés par des études d'intervention nutritionnelles réalisées chez l'homme. Elle doit donc être encouragée. Le dialogue doit se renforcer entre les acteurs de la santé, ceux de l'industrie agro-alimentaire et de la transformation et les producteurs. La notion d'agriculture à vocation santé est partie intégrante de cette démarche et nos résultats de recherche peuvent contribuer à apporter des informations utiles à tous ces acteurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agarwal R., Chase S.D., 2002. Rapid, fluorimetric-liquid chromatographic determination of malondialdehyde in biological samples. *Journal of Chromatography B* 775, 121-126.
- Ahn D.U., Lutz S., Sim J.S., 1996. Effects of dietary α -linolenic acid on the fatty acid composition, storage stability and sensory characteristics of pork loin. *Meat Science* 43, 291-299.
- Ailhaud G., 1998. L'adipocyte, cellule sécrétrice et endocrine. *Médical Science* 14, 858-864.
- Ailhaud G., Amri E.Z., Grimaldi P.A., 1996. Fatty acids and expression of lipid-related genes in adipose cells. *The Proceedings of the Nutrition Society* 55, 151-154.
- Ailhaud G., Grimaldi P., Negrel R., 1992. Cellular and molecular aspects of adipose tissue development. *Annual Review of Nutrition* 12, 207-233.
- Ailhaud G., Massiera F., Weill P., Legrand P., Alessandri J.M., Guesnet P., 2006. Temporal changes in dietary fats: role of n-6 polyunsaturated fatty acids in excessive adipose tissue development and relationship to obesity. *Progress in Lipid Research* 45, 203-236.
- Alfonso L, Mourot J., Insausti K., Mendizabal J.A., 2004. Comparaison des tissus adipeux sous-cutanés et intramusculaires chez les porcs basques et Large White. 10^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologies des Viandes. Rennes, 25 et 26 octobre 2004.
- Allee G.L., Baker D.H., Leveille G.A., 1971. Influence of level of dietary fat on adipose tissue lipogenesis and enzymatic activity in the pig. *Journal of Animal Science* 33, 1248-1254.
- Allee G.L., Romsos D.R., Leveille G.A., Baker D.H., 1972. Lipogenesis and enzymatic activity in pig adipose tissue as influenced by source of dietary fat. *Journal of Animal Science* 35, 41-47.
- Allen E., Bray R.W., Cassens R.G., 1967. Changes in fatty acid composition of porcine muscle lipid associated with sex and weight. *Journal of Food Science* 32, 26-29.
- Amri E.Z., Ailhaud G., Grimaldi P., 1994. Fatty acids as signal transducing molecules : involvement in the differentiation of preadipose to adipose cell. *Journal of Lipid Research* 35, 930-937.
- Amri E.Z., Bonino F., Ailhaud G., Abumrad N.A., Grimaldi P., 1995. Cloning of protein that mediates transcriptional effects of fatty acids in preadipocytes. Homology to peroxisome proliferator-activated receptors. *Journal of Biology Chemistry* 270, 2367-2371.
- ANC, 2001. In A. Martin (Ed.), *Apports nutritionnels conseillés pour la population française* (650p, Tec & Doc ed.). Paris.
- Anderson D.B., Kauffman R.G., Kastenschmidt L.L., 1972. Lipogenic enzyme activities and cellularity of porcine adipose tissue from various anatomical locations. *Journal of Lipid Research* 13, 593-599.

Anderson D.B., Kaufmann R.G., 1973. Cellular and enzymatic changes in porcine adipose tissue during growth. *Journal of Lipid Research* 14, 160-168.

AOAC. 1990. Official methods of analysis. 15th edition Journal – Association of Official Analytical Chemist, Arlington, VA.

Ariel A., Serhan C.N., 2007. Resolvins and protectins in the termination program of acute inflammation. *TRENDS In Immunology* 28, 176-183.

Astorg P., Arnault N., Czernichow S., Noisette N., Galan P., Hercberg S., 2004. Dietary intakes and food sources of n-6 and n-3 PUFA in French adult men and women. *Lipids* 39, 527-535.

Augustsson K., Michaud D.S., Rimm, E.B., Leitzmann, M.F., Stampfer M.J., Willett W.C., Giovannucci E., 2003. A prospective study of intake of fish and marine fatty acids and prostate cancer. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention* 12, 64-67.

Bass A., Brdiczka D., Eyer P., Hofer S., Pette D., 1969. Metabolic differentiation of distinct muscle types at the level of enzymatic organisation, *The European Journal of Biochemistry* 10, 198-206.

Bazin R., Ferré P., 2001. Assays of lipogenic enzymes. *Methods in Molecular Biology* 155, 121-127.

Beare-Rogers J., Dieffenbacher A., Holm J.V., 2001. Lexicon of lipid nutrition (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry* 73, 685-744.

Bee G., Gebert S., Messikommer R., 2002. Effect of dietary energy supply and fat source on the fatty acid pattern of adipose and lean tissues and lipogenesis in the pig. *Journal of Animal Science* 80, 1564-1574.

Bee G., Guex G., Herzog W., 2004. Free-rang 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, 1206-1218.

Bee G., Jacot S., Guex G. Biolley C., 2008. Effects of two supplementation levels of linseed combined with CLA or tallow on meat quality traits and fatty acid profile of adipose and different muscle tissues in slaughter pigs. *Animal* 2, 800-811.

Bemelmans W.J., Broer J., Feskens E.J., Smit A.J., Muskiet F.A., Lefrandt J.D., Bom V.J., May J.F., Meyboom-de Jong B., 2002. Effect of an increased intake of alpha-linolenic acid and group nutritional education on cardiovascular risk factors: the Mediterranean Alpha-linolenic Enriched Groningen Dietary Intervention (MARGARIN) study. *The American Journal of Clinical Nutrition* 75, 221-227.

Berquin I.M., Edwards I.J., Chen Y.Q., 2008. Multi-targeted therapy of cancer by omega-3 fatty acids. *Cancer letters* 269, 363-377.

Birch E., Birch D., Hoffman D., Uauy R., 1992. Dietary essential fatty acid supply and visual acuity development. *Investigative ophthalmology & visual science* 33, 3242-3253.

- Bloomfield D.K., Bloch K., 1960. The formation of delta9-unsaturated fatty acids. *The Journal of Biological Chemistry* 235, 337-345.
- Boney C.M., Fiedorek F.T., Paul S.R., Gruppuso P.A., 1996. Regulation of Preadipocyte Factor-1 Gene Expression during 3T3-L1 Cell Differentiation. *Endocrinology* 137, 2923-2928.
- Boone C., Mourot J., Gregoire F., Remacle C., 2000. The adipose conversion process: regulation by extracellular and intracellular factors. *Reproduction Nutrition Development* 40, 325-358.
- Botsford L.W., Castilla J.C., Peterson C.H., 1997. The management of fisheries and marine ecosystems. *Science* 277, 509-515.
- Bourre J.M., 2004. Roles of unsaturated fatty acids (especially omega-3 fatty acids) in the brain at various ages and during ageing. *The Journal of Nutrition, Health & Aging* 3, 163-174.
- Bourre J.M., 2005a. Where to find omega-3 fatty acids and how feeding animals with diet enriched in omega-3 fatty acids to increase nutritional value of derived products for human: What is actually useful ? *The Journal of Nutrition, Health & Aging* 9, 232-242.
- Bourre J.M., 2005b. Dietary omega-3 fatty acids and psychiatry: mood, behaviour, stress, depression, dementia and aging. *The Journal of Nutrition, Health & Aging* 9, 31-38.
- Bourre J.M., 2005c. Enrichissement de l'alimentation des animaux avec les acides gras ω -3. Impact sur la valeur nutritionnelle de leurs produits pour l'homme. *Médecine/Sciences* 21, 773-779.
- Bourre J.M., Paquette M., 2008. Contribution (in 2005) of marine and fresh water products (finfish and shellfish, seafood, wild and farmed) to the French dietary intakes of vitamins E and B12, selenium, iodine and docosahexaenoic acid: impact on public health. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 59, 491-501.
- Boutten B., 2004. Composition chimique de la cuisse de porc et du jambon cuit : influence du type de muscle. *Bulletin de liaison du CTSCCV*, vol. 14, n°3, 13-20.
- Brenna J.T., 2002. Efficiency of conversion of α -linolenic acid to long chain n-3 fatty acids in man. *Current opinion in clinical nutrition and metabolic care* 5, 127-132.
- Brenner R.R., 1989. Factors influencing fatty acid chain elongation and desaturation. In *The Role of Fats in Human Nutrition*, ed. Vergroesen AJ. Academic Press Limited, London, pp45-79.
- Breslow J.L., 2006. n-3 fatty acids and cardiovascular disease. *The American Journal of Clinical Nutrition* 83, 1477S-1482S.
- Brewer M.S., Zhu L.G., McKeith F.K., 2001. Marbling effects on quality characteristics of pork loin chops: consumer purchase intent, visual and sensory characteristics. *Meat Science* 59, 153-163.

- British Nutrition Foundation, 1992. Unsaturated fatty acids: Nutritional and physiological significance. Task Force Report. London: Chapman and Hall.
- Brooks C.C., 1971. Fatty acid composition of pork lipids as affected by basal diet, fat source and fat level. *Journal of Animal Science* 33, 1224-1231.
- Brouwer I.A., 2008. Omega-3 PUFA: good or bad for prostate cancer? *Prostaglandins Leukotrien, and Essential Fatty Acids* 79, 97-99.
- Bucharles C., Girard J.P., Desmoulin B., Yuan C.W., Bonnet M., 1987. Influence de la nature des lipides ingérés et du type sexuel sur la composition et les propriétés fonctionnelles des tissus adipeux sous-cutanés du porc. *Revue française Corps Gras* 34, 68-75.
- Bucher H.C., Hengstler P., Schindler C., Meier G., 2002. n-3 polyunsaturated fatty acids in coronary heart disease: a meta-analysis of randomized controlled trials. *The American Journal of Medicine* 112, 298-304.
- Buckley J., Connolly J.F., 1980. Influence of alpha-tocopherol (vitamin-E) on storage stability of raw pork and bacon. *Journal of Food Protection* 43, 265-267.
- Burr G.O., Burr M.M., 1929. A new deficiency disease produced by the rigid exclusion of fat from the diet. *The Journal of biological chemistry* 82, 345-367.
- Burr M.L., Fehily A.M., Gilbert J.F., Rogers S., Holliday R.M., Sweetnam P.M., Elwood P.C., Deadman N.M., 1989. Effect of changes in fat, fish and fibre intakes on death and myocardial reinfarction: diet and reinfarction trial (DART). *Lancet* 2, 757-761.
- Burr M.L., Sweetham P.M., Fehily A.M., 1994. Diet and reinfarction. *European Heart Journal* 15, 1152-1153.
- Caggiula A.W., Mustad V.A., 1997. Effects of dietary fatty acids on coronary artery disease risk and total lipoprotein cholesterol concentrations: epidemiologic studies. *American Clinical Nutrition* 65, 1597S-1610S.
- Calder P.C., 2006. n-3 Polyunsaturated fatty acids, inflammation, and inflammatory diseases. *The American Journal of Clinical Nutrition* 83, 1505S-1519S.
- Camara M., Mourot J., Fevrier C., 1996. Influence of two dairy fats on lipid synthesis in the pig: Comparative study of liver, muscle and the two backfat layers. *Annals Of Nutrition And Metabolism* 40, 287-295.
- Cameron N.D., Enser M., 1991. Fatty acid composition of lipid in longissimus dorsi muscle of Duroc and British Landrace pigs and its relationship with eating quality. *Meat Science* 29, 295-307.
- Cameron N.D., Enser M., Nute G.R., Whittington F.M., Penman J.C., Fisker A.C., Perry A.M., Wood J.D., 2000. Genotype with nutrition interaction on fatty acid composition of intramuscular fat and the relationship with flavour of pig meat. *Meat Science* 55, 187-195.

Cannon J.E., Morhan J.B., Schmidt G.R., Tatum J.D., Sofos J.N., Smith G.C., Delmore R.J., Williams S.N., 1996. Growth and fresh meat quality characteristics of pigs supplemented with vitamin E. *Journal of Animal Science* 74, 98-105.

Caygill C.P., Hill M.J., 1995. Fish, n-3 fatty acids and human colorectal and breast cancer mortality. *European Journal of Cancer Prevention* 4, 329-332.

Chakrabarty K., Leveille G.A., 1969. Acetyl CoA carboxylase and fatty acid synthetase activities in liver and adipose tissue of meal-fed rats. *The Proceeding of the Society for Experimental Biology and Medicine* 131, 1051-1054.

Chalon S., Vancassel S., Zimmer L., Guilloteau D., Durand G., 2001. Polyunsaturated fatty acids and cerebral function : focus on monoaminergic neurotransmission. *Lipids* 36, 937-944.

Chang H.C., Seidman I., Teebor G., Lane M.D., 1967. Liver acetyl CoA carboxylase and fatty acid synthetase: relative activities in the normal state and in hereditary obesity. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 28, 682-686.

Cheatham C.L., Colombo J., Carlson S.E., 2006. n-3 fatty acids and cognitive and visual acuity development: methodologic and conceptual considerations. *The American Journal of Clinical Nutrition* 83, 1458S-1466S.

Chen I.S., Le T., Subramanian S., Cassidy M.M., Sheppard A.J., Vahouny G.V., 1987. Comparison of the clearance of serum chylomicron triglycerides enriched with eicosapentaenoic acid or oleic acid. *Lipids* 22, 318-321.

Chen J., Power K.A., Mann J., Cheng A., Thompson L.U., 2007. Flaxseed alone or in combination with tamoxifen inhibits MCF-7 breast tumor growth in ovariectomized athymic mice with high circulating levels of oestrogen. *Experimental Biology and Medecine* 232, 1071-1080.

Cherian G., Sim J.S., 1995. Dietary α -linolenic acid alters the fatty acid composition of lipid classes in swine tissues. *Journal of Agricultural Food and Chemistry* 43 2911-2916.

Chilliard Y., Bauchart D., Lessire M., Schmidely P., Mourot J., 2008. Qualité des produits : modulations par l'alimentation des animaux de la composition en acides gras du lait et de la viande. *INRA Productions Animales* 21, 95-106.

Cho H.P., Nakamura M.T., Clarke S.D., 1999a. Cloning, expression, and nutritional regulation of the mammalian Δ -6 desaturase. *The Journal of Biology Chemistry* 274, 471-477.

Cho H.P., Nakamura M.T., Clarke S.D., 1999b. Cloning, expression, and fatty acid regulation of the human Δ -5 desaturase. *The Journal of Biology Chemistry* 274, 37335-37339.

Chow C.K., 1992. *Fatty Acids in Foods and Their Health Implications*. pp 238-239. Marcel Dekker, New York.

Christensen J.H., Gustenhoff P., Ejlersen E., Jessen T., Korup E., Rasmussen K., Dyerberg J., Schmidt E.B., 1995. n-3 fatty acids and ventricular extrasystoles in patients with ventricular tachyarrhythmias. *Nutrition Research* 15, 1-8.

Christensen J.H., Gustenhoff P., Korup E., Aarøe J., Toft E., Møller T., Rasmussen K., Dyerberg J., Schmidt E.B., 1996. Effect of fish oil on heart rate variability in survivors of myocardial infarction: a double blind randomised controlled trial. *British Medical Journal* 312, 677-678.

Christie W.W., Moore J.H., 1970. A comparison of the structure of triglycerides from various pig tissues. *Biochimica et Biophysica Acta* 210, 46-56.

CIV, 2008. <http://www.civ-viande.org/11-74-porc-gastronomie.html>. Site consulté le 14 novembre 2008.

Clandinin M.T., Chappell J.E., Leong S., Heim T., Swyer P.R., Chance G.W., 1980. Intrauterine fatty acid accretion rates in human brain: implications for fatty acid requirements. *Early Human Development* 4, 121-129.

Codex alimentarius, 2005. Code d'usages en matière d'hygiène pour la viande. FAO, 55 pp.

Combe N., Boué C., 2001. Apports alimentaires en acides linoléique et α -linoléique d'une population d'Aquitaine. *Oléagineux Corps gras Lipides* 8, 118-121.

Conquer J.A., Holub B.J., 1997. Dietary docosahexaenoic acid as a source of eicosapentaenoic acid in vegetarians and omnivores. *Lipids* 32, 341-345.

Conquer J.A., Holub B.J., 1998. Effect of supplementation with different doses of DHA on the levels of circulating DHA as non-esterified fatty acid in subjects of Asian Indian background, *Journal of Lipid Research* 39, 286-292.

Contreras J., 2008. L'alimentation carnée à travers les âges et les cultures. 12èmes Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, pp3-8.

Cook H.W., Spence M.W., 1987. Interaction of (n-3) and (n-6) fatty acids in desaturation and chain elongation of essential fatty acids in cultured glioma cells. *Lipids* 22, 613-619.

Corino C., Magni S., Pagliarini E., Rossi R., Pastorelli G., Chiesa L.M., 2002. Effects of dietary fats on meat quality and sensory characteristics of heavy pig loins. *Meat Science* 60, 1-8.

Corino C., Musella M., Mourot J., 2008. Influences of extruded linseed on growth, carcass composition and meat quality of pigs slaughtered at 110 and 160 kg liveweight. *Journal of Animal Science* 81, 2219-2229.

Coronado S.A., Trout G.R., Dunshea F.R., Shah N.P., 2002. Effect of dietary vitamin E, fishmeal and wood and liquid smoke on the oxidative stability of bacon during 16 weeks' frozen storage. *Meat Science* 62, 51-60.

Culioli J., Berri C., Mourot J., 2003. Muscle foods: consumption, composition and quality. *Sciences des Aliments* 23, 13-34.

Cunnane S.C., Stitt P.A., Ganguli S., Armstrong J.K., 1990. Raised omega-3 fatty acid levels in pigs fed flax. *Canadian Journal of Animal Science* 70, 251-254.

- D'Andrea S., Guillou H., Jan S., Catheline D., Thibault J.N., Bouriel M., Rioux V., Legrand P., 2002. The same rat delta 6 desaturase not only acts on 18- but also on 24-carbon fatty acids in very-long-chain polyunsaturated fatty acid biosynthesis. *The Biochemical Journal* 364, 49-55
- D'Arrigo M., Hoz L., Cambero I., Lopez-Bote C.J., Pin C., Ordonez J.A., 2004. Production of n-3 fatty acid enriched pork liver pâté. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie* 37, 585-591.
- Daumas G., Causeur D., Dhorne T., Schollhammer E., 1998. Les méthodes de classement des carcasses de porc autorisées en France en 1997. *Journées de la Recherche Porcine* 30, 1-6.
- De Clercq L., Mourot J., Genart C., Davidts V., Boone C., Remacle C., 1997. An anti-adipocyte monoclonal antibody is cytotoxic to porcine preadipocytes in vitro and depresses the development of pig adipose tissue. *Journal of Animal Science* 75, 1791-1797
- De Deckere E.A., 1999. Possible beneficial effect of fish and fish n-3 polyunsaturated fatty acids in breast and colorectal cancer. *European Journal of Cancer Prevention* 8, 213-221.
- De Quelen F., 2007. La barrière intestinale chez le nouveau né : quel est son rôle, comment fonctionne-t-elle et comment l'alimentation peut-elle la soutenir ? Mémoire de Master 2. Université Rennes 1. 23 p
- De Smet S., Raes K., Demeyer D., 2004. Meat fatty acid composition as affected by fatness and genetic factors : a review. *Animal Research* 53, 81-98.
- DeCaterina R., Basta G., 2001. n-3 fatty acids and the inflammatory response – biological background. *European Heart Journal Supplements* 3D, D42–D49.
- Deckelbaum R.J., Worgall T.S., Seo T., 2006. n-3 fatty acids and gene expression. *The American Journal of Clinical Nutrition* 83, 1520S-1525S.
- Deng X., Cagen L.M., Wilcox H.G., Park E.A., Raghov R., Elam M.B., 2002. Regulation of the rat SREBP-1c promoter in primary rat hepatocytes. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 11, 256-262.
- Denoyelle C., 2008. Les viandes, une question de définition.... *Cahier de Nutrition et de Diététique* 43, S7-S10.
- Desmoulin B., Ecolan P., Bonneau M., 1988. Estimation de la composition tissulaire des carcasses de porcs : récapitulatif de diverses méthodes utilisables en expérimentation. *INRA Productions Animales* 1, 59-74.
- Desnoyer F., Vodovar N., 1974. Apparition, origine et évolution des tissus adipeux épидидymaire et péricardique du fœtus de porc. *Annales de biologie animale, biochimie, biophysique* 14, 769-780.
- Di Girolamo M., Mendlinger S., Fertig J.W., 1971. A simple method to determine fat cell size and number in four mammalian species. *American Journal of Physiology* 221, 197-210.

Dictionnaire de l'académie française, 8ème édition. 1932-1935

Diersen-Shade D.A., Richard M.J., Beitz D.C., Jacobson N.L., 1986. Plasma, tissue and fecal cholesterol of young pigs fed restricted or liberal amounts of beef, soy or conventional diets. *The Journal of Nutrition* 116, 2086-2095.

Ding S.T., Wang J.C., Mersmann H.J., 2003. Effect of unsaturated fatty acids on porcine adipocyte differentiation. *Nutrition Research* 23, 1059-1069.

Dinh L., Bourre J.M., Dumont O., Durand G., 1995. Comparison of recovery of previously depressed hepatic delta-6 desaturase activity in adult and old rats. *Annals of Nutrition and Metabolism* 39, 117-123.

Dirinck P., de Winne A., 1995. Effet des taux élevés de supplémentation en vitamine E sur la qualité sensorielle des viandes de porc. *Journées de la Recherche Porcine en France* 27, 323-328.

Dole V.P., Meinertz H., 1960. Microdetermination of long-chain fatty acids in plasma and tissues. *The Journal of Biological Chemistry* 235, 2595-2599.

Douard V., Mourot J., xxx. Long-term effects of an early nutrition rich in conjugated isomers of linoleic acid and α -linolenic acids on the fat tissues development in adult. (Soumis à *Journal of Nutrition*)

Dubowitz V. In: *Muscle biopsy. A practical approach.* WB Saunders Company LTD. 1985, 707-715

Eikelenboom G., Hoving-Bolink A.H., Van der Wal P.G., 1996. The eating quality of pork. 1. Influence of ultimate pH. *Fleischwirtsch.* 76, 392-393.

Ellis N.R., Isbell H.S., 1926. Soft pork studies. 3. The effect of food fat upon body fat, as shown by the separation of the individual fatty acids of the body fat. *Journal of Biological Chemistry* 69, 239-248.

Emken E.A., Adlof R.O., Rakoff H., Rohwedder W.K., Gulley R.M., 1990. Metabolism in vivo of deuterium-labelled linolenic and linoleic acids in human. *Biochemical Society Transactions* 18, 766-769.

Enser M., Richardson R.I., Wood J.D., Gill B.P., Sheard P.R., 2000. Feeding linseed to increase the n-3 PUFA of pork: Fatty acid composition of muscle, adipose tissue, liver and sausages. *Meat Science* 55, 201-212.

Estevez M., Morcuende D., Cava-Lopez R., 2003. Physico-chemical characteristics of longissimus dorsi from three lines of free-rang reared iberian pigs slaughtered at 90 kg live-weight and commercial pigs. *Meat Science* 64, 499-506.

FAOSTAT, <http://faostat.fao.org>. Site consulté le 14 janvier 2009.

- Fenton J.P., Roehrig K.L., Mahan D.C., Corley J.R., 1985. Effect of swine weaning and age on body fat and lipogenic activity in liver and adipose tissue. *Journal of Animal Science* 60, 190-199.
- Fernandez X., Monin G., Talmant A., Mourot J., Lebret B., 1999a. Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat. 1. Composition of the lipidic fraction and sensory characteristics muscle longissimus lumborum. *Meat Science* 53, 59-65.
- Fernandez X., Monin G., Talmant A., Mourot J., Lebret B., 1999b. Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat. 2. Consumer acceptability of muscle longissimus lumborum. *Meat Science* 53, 67-72.
- Field F.J., Born E., Murthy S., Mathur S.N., 2002. Polyunsaturated fatty acids decrease the expression of sterol regulatory element-binding protein-1 in CaCo-2 cells: effect on fatty acid synthesis and triacylglycerol transport. *The Biochemical Journal* 368, 855-864.
- Fitch W.M., Hill R., Chaikoff I.L., 1959. The effect of fructose feeding on glycolytic enzyme activities of the normal rat liver. *Journal of Biological Chemistry* 234, 1048-1051.
- Fogerty A.C., Whitfield F.B., Svoronos D., 1990. Changes in the composition of the fatty acids and aldehydes of meat lipids after heating. *International Journal of Food Science and Technology* 25, 304-312.
- Folch J., Lees M, Sloane Stanley G.H., 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues. *The Journal of Biological Chemistry* 226, 497-509.
- Fontanillas R., Barroeata A., Baucells M.D., Codony R., 1997. Effect of feeding highly cis-monounsaturated, trans, or n-3 fats on lipid composition of muscle and adipose tissue of pigs. *Journal of agricultural Food Chemistry* 45, 3070-3075.
- Fortin A., Robertson W.M., Tong A.K.W., 2005. The eating quality of Canadian pork and its relationship with intramuscular fat. *Meat Science* 69, 297-305.
- Fortin, P.R., Lew R.A., Liang M.H., Wright E.A., Beckett L.A., Chalmers T.C., Sperling R.I., 1995. Validation of a meta-analysis: The effects of fish oil in rheumatoid arthritis. *Journal of Clinical Epidemiology* 48, 1379-1390.
- Frankel E.N., 1984. Lipid oxidation: Mechanism, products and biological significance. *Journal of American Oil Chemistry Society* 61, 1908-1917.
- Funk C.D., 2001. Prostaglandins and Leukotrienes: Advances in Eicosanoid Biology. *Science* 294, 1871-1875.
- Gaillard D., Negrel R., Lagardes M., Ailhaud G., 1989. Requirements and role of arachidonic acid in the differentiation of pre-adipose cells. *Biochemistry Journal* 257, 389-397.
- Gandemer G., Pascal G., Durand G., 1983. Lipogenic capacity and relative contribution of the different tissues and organs to lipid synthesis in male rat. *Reproduction Nutrition Development* 23, 575-586.

Geelen A., Schouten J.M., Kamphuis C., Stam B.E., Burema J., Renkema J.M., Bakker E.J., van't Veer P., Kampman E., 2007. Fish consumption, n-3 fatty acids, and colorectal cancer: a meta-analysis of prospective cohort studies. *American Journal of Epidemiology* 166, 1116-1125.

Gerfault V., 1999. Influence de l'axe somatotrope et de l'alimentation sur le développement du tissu adipeux chez le porc: étude des préadipocytes en culture primaire. Thèse de l'Université de Rennes I Novembre 1999, 138 p

Gerfault V., Louveau I., Mourot J., Le Dividich J., 2000. Lipid deposition and lipogenesis in subcutaneous adipose tissue and skeletal muscle from neonatal pigs consuming maternal or formula milk. *Reproduction Nutrition Development* 30, 103-112.

Girard J.P., Bout J., Salort D., 1988. Lipides et qualités du tissu adipeux, facteurs de variation. I. Lipides et qualités du tissu adipeux. II. Lipides et qualité du tissu musculaire. *Journées de la Recherche Porcine en France* 20, 255-278.

Givens D.I., Cottrill B.R., Davies M., Lee P.A., Mansbridge R.J., Moss A.R., 2000. Sources of n-3 polyunsaturated fatty acids additional to fish oil for livestock diets—a review. *Nutrition Abstracts and Reviews. Series B. Livestock Feeds and Feeding* 70, 1-19.

Gladine C., Morand C., Rock E., Gruffat D., Bauchart D., Durand D., 2007. The antioxidative effect of plant extracts rich in polyphenols differs between liver and muscle tissues in rats fed n-3 PUFA rich diets. *Animal Feed Science and Technology* 139, 257-272.

Goyens P.L., Spilker M.E., Zock P.L., Katan M.B., Mensink R.P., 2005. Compartmental modeling to quantify alpha-linolenic acid conversion after long term intake of multiple tracer boluses. *Journal of Lipid Research* 46, 1474-1483

Gray J.I., Pearson A.M., 1987. Rancidity and warmed-over flavor. In *Advances in Meat Research*. Vol. 3. A.M. Pearson & T.R. Dutson, ed. Van Nostrand Reinhold Co., New York. pp221-269.

Gregoire F.M., Smas C.M., Sul H.S., 1998. Understanding adipocyte differentiation. *Physiological reviews* 78, 783-809

Grimaldi P.A., Teboul L., Gaillard D., Armengod A.V., Amri E.Z., 1999. Long chain fatty acids as modulators of gene transcription in preadipose cells. *Molecular and cellular biochemistry* 192, 63-68

Guesnet P., Alessandri J.M., Astorg P., Pifferi F., Laviolle M., 2005. Les rôles physiologiques majeurs exercés par les acides gras polyinsaturés (AGPI). *Oléagineux Corps gras Liquide* 12, 333-343.

Gurr M.I., Harwood J.L., 1996. *Lipid Biochemistry: An Introduction*. Chapman and Hall, London.

Haak L, De Smet S., Fremaut D., Van Walleghem K., Raes K., 2008. Fatty acid profile and oxidative stability of pork as influenced by duration and time of dietary linseed or fish oil supplementation. *Journal of animal science* 86, 1418-1425.

- Hall III C., Tulbek M.C., Xu Y., 2006. Flaxseed. *Advances in food and nutrition research* 51, 1-97.
- Hansen A.E., Haggard M.E., Boelsche A.N., Adam D.J., Wiese H.F., 1958. Essential fatty acids in infant nutrition. III. Clinical manifestations of linoleic acid deficiency. *The journal of nutrition* 66, 565-576.
- Hansen E., Juncher D., Henckel P., 2004. Oxidative stability of chilled pork chops following long term freeze storage. *Meat Science* 68, 479-484.
- Harbige L.S., 2003. Fatty acids, the immune response, and autoimmunity: a question of n-6 essentiality and the balance between n-6 and n-3. *Lipids* 38, 323-341.
- Hausman D.B., Digirolamo M., BArtness T.J., Hausman G.J., Martin R.J., 2001. The biology of white adipocyte proliferation. *Obesity Reviews* 2, 239-254
- Henckel P., Oksberg N., Erlandsen E., Barton-Gade P., Bejerrholm C., 1997. Histo- and biochemical characteristics of the Longissimus dorsi muscle in pigs and their relationships to performance and meat quality. *Meat Science* 47, 311-321.
- Henry Y., 1977. Développement morphologique et métabolique du tissu adipeux chez le porc : influence de la sélection, de l'alimentation et du mode d'élevage. *Annales de Biologie Animale, Biochimie et Biophysique* 17, 923-952.
- Herpin P., 1989. Bases métaboliques et physiologiques de l'acclimatation du porcelet au froid. *INRA Productions Animales* 2, 255-265.
- Hertzman C., Göransson L., Rudéus H., 1988. Influence of fish meal, rapeseed and rapeseed meal in feed on the fatty acid composition and storage stability of porcine body fat. *Meat Science* 23, 37-53.
- Hirsch J., Gallian E., 1968. Methods for the determination of adipose cell size in man and animals. *Journal of Lipid Research* 9, 110-119.
- Holloway C.T., Holloway P.W., 1975. Stearyl coenzyme A desaturase activity in mouse liver microsomes of varying lipid composition. *Archives of biochemistry and biophysics* 167, 496-504.
- Holman R.T., Johnson S.B., Hatch F., 1982. A case of human linolenic acid deficiency involving neurological abnormalities. *The American journal of clinical nutrition* 35, 617-623.
- Honikel K.O., 1998. Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat Science* 49, 447-457.
- Hooper L., Thompson R.L., Harrison R.A., Summerbell C.D., Ness A.R., Moore H.J., Worthington H.V., Durrington P.N., Higgins J.P.T., Capps N.E., Riemersma R.A., Ebrahim S.B.J., Smith G.D., 2006. Risks and benefits of omega 3 fats for mortality, cardiovascular disease, and cancer: systematic review. *British Medical Journal* 332, 752-760.

- Houben J. H., Krol B., 1980. Acceptability and storage stability of pork products with increased levels of polyunsaturated fatty acids. *Meat Science* 52, 39-45.
- Hoz L., Cambero I., Santos C., Herranz B., Ordóñez J.A., 2007. Fatty acids and sensory characteristics of Spanish dry-cured loin enriched in acid α -linolenic and α -tocopherol. *Food chemistry* 101, 1701-1706.
- Hoz L., D'Arrigo M., Cambero I., Ordoñez J.A., 2004. Development of an n-3 fatty acid and α -tocopherol enriched dry fermented sausage. *Meat Science* 67, 485-495.
- Hsu R.Y., Lardy H.A., 1969. Malic enzyme. *Methods in enzymology*. Lowenstein J.M. Ed., New-York, London, Vol. XVII, 230-235.
- Huang F.R., Zhan Z.P., Luo J., Liu Z.X., Peng J., 2008. Duration of dietary linseed feeding affects the intramuscular fat, muscle mass and fatty acid composition in pig muscle, *Livestock Science*, doi:10.1016/j.livsci.2008.01.002
- Hughes T.A., Heimberg M., Wang X., Wilcox H., Hughes S.M., Tolley E.A., Desiderio D.M., Dalton J.J., 1996. Comparative lipoprotein metabolism of myristate, palmitate and stearate in normolipidemic men. *Metabolism* 45, 1108-1118.
- Hussein N., Ah-Sing E., Wilkinson P., Leach C., Griffin B.A., Millward D.J., 2005. Long-chain conversion of [^{13}C]linoléic acid and alpha-linolenic acid in response to marked changes in their dietary intake in men. *Journal of Lipid. Research* 46, 269-280
- Hyun S.A., Vahouny G.V., Treadwell C.R., 1967. Portal absorption of fatty acid in lymph- and portal vein- cannulated rats. *Biochimica Biophysica Acta* 137 296-305.
- Innis S.M., 1991. Essential fatty acids in growth and development. *Progress in Lipid Research* 30, 39-103.
- Innoboost.com, 2008. http://www.innoboost.com/french/wears/colorimetrie_lab.html. Site consulté le 11 aout 2008.
- IUPAC, 1978. IUPAC-IUB Commission on Biochemical Nomenclature: The nomenclature of Lipids. *Journal of Lipid Research* 19, 114-129.
- Izumimoto M., Onyango C.A., Darmadji P., 1997. Comparison of distillation and extraction methods in TBARS determination of cured meat. *Scientific Reports of the Faculty of Agriculture Okayama University* 86, 55-59.
- Jackson M.J., 1974. in *Biomembranes*, Vol. 4B (Smyth D.H. ed.) pp. 673-709, Plenum Press, New-York, NY.
- Jacobs M.N., Johnston P.A., Wyatt C.L., Santillo D., French M., 1997. Organochlorine pesticide and PCB residues in pharmaceutical, industrial and food grade fish oils. *International Journal of Environment and Pollution* 8, 74-93.
- Jacotot B., 1988. Acides gras alimentaires pour la prévention du risque coronarien, *Cahier de Nutrition Diététique* 23, 211-214.

- Jakobsen K., Engberg R.M., Andersen J.O., Jensen S.K., Lauridsen C., Sørensen R, Henckel R, Bertelsen G., Skibsted L.H., Jensen C., 1995. Supplementation of broiler diets with all-rac- α - or a mixture of natural source RRR- α , γ , δ -tocopherol acetate. 1. Effect on vitamin E status of broilers in vivo and at slaughter. *Poultry Science* 74, 1984-1994.
- Jakobsson A., Westerberg R., Jacobsson A., 2006. Fatty acid elongases in mammals: Their regulation and roles in metabolism. *Progress in Lipid Research* 45, 237-249.
- Jensen C., Guidera J., Skovgaard I., Staun H., Skibsted L., Jensen S.K., Moller A.J., Buckey J., Bertelsen G., 1997. Effects of dietary α -tocopherol acetate supplementation on α -tocopherol deposition in porcine m. psoas major and m. longissimus dorsi and on the drip loss, colour stability, and oxidative stability of pork meat. *Meat Science* 45, 491-500.
- Jensen C.L., Maude M., Anderson R.E., Heird W.C., 2000. Effect of docosahexaenoic acid supplementation of lactating women on the fatty acid composition of breast milk lipids and maternal and infant plasma phospholipids. *American Journal of Nutrition* 71, 292S-299S.
- Jiang Y., Fan K.W., Wong R.T.Y., Chen F., 2004. Fatty Acid Composition and Squalene Content of the Marine Microalga *Schizochytrium mangrovei*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52, 1196-1200.
- Juaneda P., Rocquelin G., 1985. Rapid and convenient separation of phospholipids and non phosphorus lipids from rat heart using silica cartridges. *Lipids* 20, 40-41.
- Kang J.X., Wang J., Wu L., Kang Z.B., 2004. Transgenic mice: fat-1 mice convert n-6 to n-3 fatty acids. *Nature* 427, 504.
- Kanner J., 1994. Oxidative processes in meat and meat products: Quality implications. *Meat Science* 36, 169-189.
- Karleskind A., 1992. *Manuel des corps gras*. Volume 1, 116-317. Edition Tec & Doc. Paris.
- Kim J.B., Spiegelman B.M., 1996. ADD1/SREBP1 promotes adipocytes differentiation and gene expression linked to fatty acid metabolism. *Genes Development* 10, 1096-1107.
- Kimura Y., Kono S., Toyomura K., Nagano J., Mizoue T., Moore M.A., Mibu R., Tanaka M., Kakeji Y., Maehara Y., Okamura T., Ikejiri K., Futami K., Yasunami Y., Maekawa T., Takenaka K., Ichimiya H., Imaizumi N., 2007. Meat, fish and fat intake in relation to subsite-specific risk of colorectal cancer: The Fukuoka Colorectal Cancer Study. *Cancer Science* 98, 590-597
- Kloareg M., Le Bellego L., Mouro J., Noblet J., Van Milgen J., 2005. Deposition of dietary fatty acids and of de novo synthesised fatty acids in growing pigs: effects of high ambient temperature and feeding restriction. *The British Journal of Nutrition* 93, 803-811.
- Kouba M., 2006. Effect of dietary omega-3 fatty acids on meat quality of pigs and poultry. In M. C. Teale (Ed.), *Omega-3 fatty acid research* (pp. 225-239). New York: Nova Publishers.

Kouba M., Enser M., Whittington F.M., Nute G.R., Wood J.D., 2003. Effect of a high-linolenic acid diet on lipogenic enzyme activities, fatty acid composition, and meat quality in the growing pig. *Journal of Animal Science* 81, 1967-1979.

Kouba M., Hermier D., Le Dividich J., 1999. Influence of a high ambient temperature on stearoyl-CoA-desaturase activity in the growing pig. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and molecular Biology* 124B, 7-13.

Kouba M., Mourot J., 1998. Effect of a high linoleic acid diet on stearoyl-CoA-desaturase activity, lipogenesis and lipid composition of pig subcutaneous adipose tissue. *Reproduction Nutrition Development* 38, 31-37.

Kouba M., Mourot J., 1999. Effect of a high linoleic acid diet on lipogenic enzyme activities and on the composition of the lipid fraction of fat and lean tissues in the pig. *Meat Science* 52, 39-45.

Kremer, J.M., Bigauoette J., Michalek A.V., Timchalk M.A., Lininger L., Rynes R.I., Huyck C., Zieminski J., Bartholomew L.E., 1985. Effects of manipulation of dietary fatty acids on clinical manifestations of rheumatoid arthritis. *The Lancet* 1, 184-187.

Labroue F., Goumy S., Gruand J., Mourot J., Neelz V., Legault C., 2000. Comparaison au Large White de quatre races locales porcines françaises pour les performances de croissance, de carcasse et de qualité de la viande. *Journée de la Recherche Porcine* 32, 403-412.

Lai L, Kang J.X., Li R., Wang J., Witt W.T., Yong H.Y., Hao Y., Wax D., Murphy C.N., Rieke A., Samuel M., Linville M.L., Korte S.W., Evans R.W., Starzl T.E., Prather R.S., Dai Y., 2006. Generation of cloned transgenic pigs rich in omega-3 fatty acids. *Nature Biotechnology* 24, 435-436.

Lainé E., Hano C., Lamblin F., 2007. Les lignanes phytoestrogènes du lin sont-ils des bienfaiteurs méconnus ? *Phytothérapie* 5, 121-128.

Lanari M.C., Schaefer D.M., Scheller K.K., 1995. Dietary vitamin E supplementation and discoloration of pork bone and muscle following modified atmosphere packaging. *Meat Science* 41, 237-250.

Lauridsen C., Jensen C., Jakobsen K., Engberg R.M., Andersen J.O., Jensen S.K., Sørensen 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, 187-196.

Lauridsen C., Jensen S.K., Skibsted L.H., Bertelsen G., 2000. Influence of supranutritional vitamin E and copper on α -tocopherol deposition and susceptibility to lipid oxidation of porcine membranous fractions of M. Psoas major and M. Longissimus dorsi. *Meat Science* 54, 377-384.

Lauridsen C., Nielsen J.H., Henskel P., Sorensen M.T., 1999. Antioxidative and oxidative status in muscles of pigs fed rapeseed oil, vitamin E and copper. *Journal of Animal Science* 77, 1482-1489.

- Lavau M., Bazin R., Karaoghlanian Z., Guichard C., 1982. Evidence for a high fatty acid synthesis activity in interscapular brown adipose tissue of genetically obese Zucker rats. *The Biochemistry Journal* 204, 503-507.
- Le Dividich J., Esnault T.H., Lynch B., Hoo-Paris R., Castex C.H., Peiniau J., 1991. Effect of colostrum fat deposition and plasma metabolite in the new born pig. *Journal of Animal Science* 69, 2480-2488.
- Lebret B., 2004. Conséquences de la rationalisation de la production porcine sur les qualités des viandes. *INRA Productions animales* 17, 79-91.
- Lebret B., Guillard A.S., Berger F., 2002. Influence du mode d'élevage (bâtiment ou plein air) sur les qualités des carcasses et des viandes de truies de réforme. *Journées de la recherche porcine* 34, 31-37.
- Lebret B., Le Roy P., Monin G., Lefaucheur L., Caritez J.C., Talmant A., Elsen J.M., Sellier P., 1999a. Influence of the three RN genotypes on chemical composition, enzyme activities and myofiber characteristics of porcine skeletal muscle. *Journal of Animal Science* 77, 1482-1489.
- Lebret B., Lefaucheur L., Mourot J., 1999b. La qualité de la viande de porc. Influence des facteurs d'élevage non génétiques sur les caractéristiques du tissu musculaire. *INRA Productions Animales* 12, 11-28.
- Lebret B., Mourot J., 1998. Caractéristiques et qualité des tissus adipeux chez le porc. Facteurs de variation non génétiques. *INRA Productions Animales* 11, 131-143.
- Lecerf J.M., 2004. Poisson, acides gras oméga 3 et risque cardiovasculaire : données épidémiologiques. *Cahier de Nutrition et de Diététique* 39, 143-50.
- Lee Y.B., Kauffman R.G., Grummer R.H., 1973. Effect of early nutrition on the development of adipose tissue in the pig. 1. Age constat basis. *Journal of Animal Science* 37, 1312-1318.
- Lefaucheur L., 2003. Typologie et ontogenèse des fibres musculaires chez le porc. *INRA Productions Animales* 16, 133-136.
- Lefaucheur L., Gerrard D., 2000. Muscle fiber plasticity in farm animals. *Journal of Animal Science* 77, 1-19.
- Legrand P., 2007. Les acides gras : structures, fonctions, apports nutritionnels conseillés. *Cahier de Nutrition et de Diététique* 42, S7-S12.
- Legrand P., Schmitt B., 2003. Améliorer l'alimentation animale au bénéfice de la nutrition de l'homme : l'exemple des oméga 3. *La Lettre Scientifique de l'Institut Français pour la Nutrition* 95, 1-7.
- Leikin A.I., Brenner R.R., 1987. Cholesterol-induced microsomal changes modulate desaturase activities. *Biochimica Biophysica Acta* 922, 294-303.

- Leikin A.I., Brenner R.R., 1988. In vivo cholesterol removal from liver microsomes induces changes in fatty acid desaturase activities. *Biochimica Biophysica Acta* 963, 311-319.
- Leskanich C.O., Matthews K.R., Warkup C.C., Noble R.C., Hazzledine M., 1997. The effects of dietary oil containing (n-3) fatty acids on the fatty acid, physicochemical, and organoleptic characteristics of pig meat and fat. *Journal of Animal Science* 75, 673-683.
- Leszczynski D.E., Pikul J., Easter R.A., McKeith F.K., McLaren D.G., Novakofski J., Bechtel P.J., Jewell D.E., 1992. Characterization of Lipid in Loin and Bacon from Finishing Pigs Fed Full-Fat Soybeans or Tallow. *Journal of Animal Science* 70, 2175-2181.
- Liu Y.L., Li D.F., Gong L.M., Yi G.F., Gaines A.M., Carroll, J.A., 2003. Effects of fish oil supplementation on the performance and the immunological, adrenal, and somatotropic responses of weaned pigs after an *Escherichia coli* lipopolysaccharide challenge. *Journal of Animal Science* 81, 2758-2765.
- Lopez-Bote C.J., Rey A.I., Sanz M., Gray J.I., Buckley J.D., 1997. Dietary vegetable oil and α -tocopherol reduce lipid oxidation in rabbit muscle. *Journal of Nutrition* 127, 1176-1182.
- MacLean C.H., Newberry S.J., Khanna P., Issa A.M., Suttorp M.J., Lim Y.W., Traina S.B., Hilton L., Garland R., Morton S.C., 2006. Effects of omega 3 fatty acids on cancer risk : a systematic review. *Journal of American Medical Association* 295, 403-415.
- Mairesse G., Fillaut M., Mourot J., 2008. Effet de la compétition entre l'acide alpha-linolénique (ALA) et l'acide linoléique (LA) sur la composition en acides gras du tissu adipeux sous-cutané et musculaire du porc charcutier. 12^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes 8 et 9 Octobre 2008 Tours, Viande et Produits Carnés, Hors série 2008, 89-90.
- Malmfors B., Lundström K., Hansson I., 1978a. Fatty acid composition of porcine back fat and muscle lipids as affected by sex, weight and anatomical location. *Swedish Journal of Agricultural Research* 8, 25-38.
- Malmfors B., Lundström K., Hansson I., 1978b. Interrelations between boar taint, 5 α -androstenone and boar taint in pigs. *Swedish Journal of Agricultural Research* 8, 161-169.
- Mandrup S., Lane M.D., 1997. Regulating adipogenesis. *Journal of chemical biology* 272, 5367-5370.
- Mantzioris E., James M.J., Gibson R.A., Cleland L.G., 1994. Dietary substitution with an alpha-linolenic acid-rich vegetable oil increases eicosapentaenoic acid concentrations in tissues. *The American Journal of Clinical Nutrition* 59, 1304-1309.
- Marsh J.B., James A.T., 1962. Conversion of stearic to oleic acid by liver and yeast. *Biochimica Biophysica Acta* 60, 320-328.
- Martinez M., 1996. Docosahexaenoic acid therapy in docosahexaenoic acid-deficient patients with disorders of peroxisomal biogenesis. *Lipids* 31, S145-152.

- Massiera F., Saint-Marc P., Seydoux J., Murata T., Kobayashi T., Narumiya S., Guesnet P., Amri E.Z., Negrel R., Ailhaud G., 2003. Arachidonic acid and prostacyclin signaling promote adipose tissue development: a human health concern? *Journal of Lipid Research* 44, 271-279.
- Matthews K.R., Homer D.B., Thies F., Calder P.C., 2000. Effect of whole linseed (*Linum usitatissimum*) in the diet of finishing pigs on growth performance and on the quality and fatty acid composition of various tissues. *British Journal of Nutrition* 83, 637-643.
- Mersmann H.J., 1986. Lipid metabolism in swine. In *Cardiovascular Research*, ed. Stanton HC & Mersmann HJ. CRC Press, Inc., London: MAFF.
- Mersmann H.J., Allen C.D., Steffen D.G., Brown L.G., Danielson D.M., 1976. Effect of age, weaning and diet on swine adipose tissue and liver lipogenesis. *Journal of Animal Science* 43, 140-150.
- Mersmann H.J., Goodman J.R., Brown L.J., 1975. Development of swine adipose tissue morphology and chemical composition. *Journal of Lipid Research* 16, 269-279.
- Mersmann H.J., Houk J. M., Phinney G., Underwood M. C., 1973. Effect of diet and weaning age on in vitro lipogenesis in young swine. *Journal of Nutrition* 103, 821-828.
- Metayer A., Daumas G., 1998. Estimation, par découpe, de la teneur en viande maigre des carcasses de porcs. *Journées de la Recherche Porcine Française* 30, 7-11.
- Miller M.F., Shackelford S.D., Hayden K.D., Reagan J.O., 1990. Determination of the alteration in fatty acid profiles, sensory characteristics and carcass traits of swine fed elevated levels of monounsaturated fats in the diet. *Journal of Animal Science* 68, 1624-1631.
- Minivielle B. Boutten B., Alviset G., Deschodt G., Goureau L., Boulard J., Le Strat P., Houix Y., 2002. Composition chimique des muscles de jambons frais et des jambons cuits : influence de l'âge à l'abattage et de la classe de pH ultime. *Journées de la Recherche Porcine* 34, 7-14.
- Monahan F.J., Buckley D.J., Morrissey P.A., Lynch P.B., Gray J.I., 1992. Influence of dietary fat and a-tocopherol supplementation on lipid oxidation in pork. *Meat Science* 31, 229-241.
- Monin G., 1983. Influence des conditions de production et d'abattage sur les qualités technologiques et organoleptiques des viandes de porc. *Journées de la Recherche Porcine en France* 15, 151-176.
- Monin G., 1988. Evolution post mortem du tissu musculaire et conséquences sur les qualités de la viande de porc. *Journées de la Recherche Porcine en France* 20, 201-214.
- Monin G., Larzul C., Le Roy P., Culioli J., Mourot J., Rousset-Akrim S., Talmant A., Sellier P., 1999. Effects of the halothane genotype and slaughter weight on texture of pork. *Journal of Animal Science* 77, 408-415.
- Montalto M.B., Bensadoun A., 1993. Lipoprotein lipase synthesis and secretion: effects of concentration and type of fatty acids in adipocytes cell culture. *Journal of Lipid Research* 34, 397-407.

- Morgan C.A., Noble R.C., Cocchi M., McCartney R., 1992. Manipulation of the fatty acid composition of pig meat lipids by dietary means. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 58, 357-368.
- Mori T.A., Bao D.Q., Burke V., Puddey I.B., Beilin L.J., 1993. Docosahexaenoic acid but not eicosapentaenoic acid lowers ambulatory blood pressure and heart rate in humans. *Hypertension* 34, 253-260.
- Morise A., Hermier D., Combe N., Legrand P., Mourot J., Fénart E., Weill P., 2005. Effet de la dose d'acide α -linoléique alimentaire sur le métabolisme lipidique. *Oléagineux, Corps gras, Lipides* 12, 1-7.
- Morris M.C., Sacks F., Rosner B., 1993. Does fish oil lower blood pressure? A meta-analysis of controlled trials. *Circulation* 88, 523-533.
- Morrison W.R., Smith L.M., 1964. Preparation of fatty acid methyl esters and dimethylacetals from lipids with boron fluoride methanol. *Journal of Lipid Research* 5, 600-608.
- Morrissey P.A., Buckley D.L, Sheehy P.J.A., Monahan F.J., 1994. Vitamin E and meat quality. *Proceedings of the Nutrition Society* 53, 289-295.
- Mottram D.S., Edwards R.A., 1983. The role of triglycerides and phospholipids in the aroma of cooked beef. *Journal of the science of food and agriculture* 34, 517-522
- Mourot J., 2009. Sensorial and nutritional quality of pork. In *Improving the sensory and nutritional quality of fresh meat: New technologies* Edited by J P Kerry, and D A Ledward. Woodhead Publishing Cambridge, CB1 6AH, England, 342-355.
- Mourot J., Aumaitre A., Mounier A., Wallet P., 1992. Interaction entre vitamine E et acide linoléique alimentaires sur la composition de la carcasse, la qualité et la conservation des lipides de la viande de porc. *Science des Aliments* 12, 743-755.
- Mourot J., Camara M., Fevrier C., 1995a. Effects of dietary fats of vegetable and animal origin on lipid synthesis in pigs. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Série III, Sciences de la Vie* 318, 965-970.
- Mourot J., Guillevic M., Blochet J.E., Le Minous A.E., 2007. Lutter contre les croyances : une nouvelle évaluation de l'intérêt nutritionnel des charcuteries. *Revue de Nutrition Pratique* 19, 20-26.
- Mourot J., Hermier D., 2001. Lipids in monogastric animal meat. *Reproduction Nutrition Development* 41, 109-118.
- Mourot J., Kouba M., Bonneau M., 1996. Comparative study of in vitro lipogenesis in various adipose tissues in the growing Meishan pig. Comparison with the Large White pig. *Comparative Biochemistry and Physiology* 115, 383-388.
- Mourot J., Kouba M., Peiniau P., 1995b. Comparative study of in vitro lipogenesis in various adipose tissues in the growing domestic pig (*Sus domesticus*). *Comparative biochemistry and physiology. Part B, Biochemistry & molecular biology* 111, 379-384.

- Mourot J., Kouba M., Salvatori G., 1999. Facteurs de variation de la lipogenèse dans les adipocytes et les tissus adipeux chez le porc. *INRA Productions Animales* 12, 311-318.
- Mourot J., Lebret B., 2009. Modulation de la qualité de la viande de porc par l'alimentation. *INRA Productions Animales* 22, *sous presse*
- Mourot J., Mourot B.P., Kerhoas N., 2009. Comment consommer davantage d'acides gras n-3 sans modifier nos pratiques alimentaires? *Revue de Nutrition Pratique* 22, *sous presse*
- Mourot J., Peiniau P., Mounier A., 1994. Effet de l'acide linoléique alimentaire sur l'activité des enzymes de la lipogenèse dans les tissus adipeux chez le porc. *Reproduction Nutrition Development* 34, 213-220.
- Mozaffarian D., Ascherio A. Hu F.B., Stampfer M.J., Willet W.C., Siscovick D.S., Rimm E.R., 2005. Interplay between different polyunsaturated fatty acids and risk of coronary heart disease in men. *Circulation* 111, 157-164.
- Myer R.O., Johnson D.D., Kanauft D.A., Gorbet D.W., Brendemuhl J.H., Walker W.R., 1992. Effect of Feeding High-Oleic-Acid Peanuts to Growing-Finishing Swine on Resulting Carcass Fatty Acid Profile and on Carcass and Meat Quality Characteristics. *Journal of Animal Science* 70, 3734-3741.
- Nakamura M.T., Nara T.Y., 2004. Structure, function, and dietary regulation of $\Delta 6$, $\Delta 5$, and $\Delta 9$ desaturases. *Annual review of Nutrition* 24, 345-376.
- Nakamura M.T., Tang A.B., Villanueva J., Halsted C.H., Phinney S.D., 1994. Selective reduction of $\Delta 6$ and $\Delta 5$ desaturase activities but not $\Delta 9$ desaturase in micropigs chronically fed ethanol. *Journal of Clinical Investigation* 93, 450-454.
- Nelson G.J., Ackman R.G., 1988. Absorption and transport of fat in mammals with emphasis on n-3 polyunsaturated fatty acids. *Lipids* 23, 1005-1014.
- Nettleton J.A., 1991. ω -3 fatty acids: comparison of plant and seafood sources in human nutrition. *Journal of the American Dietetic Association* 91, 331-337.
- Ngapo M.T., Gariépy C., 2008. Factors Affecting the Eating Quality of Pork. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 48, 599-633.
- Niki E., Yoshida Y., Saito Y., Noguchi N., 2005. Lipid peroxidation: mechanisms, inhibition, and biological effects. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 338, 668-676.
- Nitsan Z., Mokady S., Sukenik A., 1999. Enrichment of poultry products with n-3 fatty acids by dietary supplementation with the alga *Nannochloropsis* and mantur oil. *Journal of Agricultural and Food chemistry* 47, 5127-5132.
- Niu S.L., Mitchell D.C., Lim S.Y., Wen Z.M., Kim H.Y., Salem N. Jr, Litman B.J., 2004. Reduced G protein-coupled signalling efficiency in retinal rod outer segments in response to n-3 fatty acid deficiency. *Journal of Biology and Chemistry* 279, 31098-31104.

- Noblet J., Jaguelin-Peyraud Y., Quemeneur B., Chesneau G., 2008. Valeur énergétique de la graine de lin chez le porc : impact de la technologie de cuisson-extrusion. *Journées de la Recherche Porcine* 40, 203-208.
- Ntambi J.M., Miyazaki M., 2003. Recent insights into stearyl-CoA desaturase-1. *Current Opinion in Lipidology* 14, 255-261.
- Ntambi J.M., Sessler A.M., Takova T., 1996. A model cell line to study regulation of stearyl-CoA desaturase gene 1 expression by insulin and polyunsaturated fatty acids. *Biochemical and biophysical research communications* 220, 990-995.
- Numa S., Nakanishi S., Hashimoto T., Iritani N., Okozaki T., 1970. Role of acetyl coenzyme A carboxylase in the control of fatty acid synthesis. *Vitamins and Hormones* 28, 213-220.
- Nydahl M., Gustafsson I.B., Ohrvall M., Vessby B., 1994. Similar serum lipoprotein cholesterol concentrations in healthy subjects on diets enriched with rapeseed and with sunflower oil. *European Journal of Clinical Nutrition* 48, 128-137.
- Offer G., Knight P., Jeacocke R., Almond R., Cousins T., Elsey J., Parsons N., Sharp A., Starr R., Purslow P., 1989. The structural basis of the water-holding, appearance and toughness of meat and meat products. *Food Microstructure* 8, 151-170.
- Ofival, 2004. *Le marché des produits carnés et avicoles en 2003*. Ed. Ofival, Paris, 450 p.
- Ofival, 2007. *La filière porcine*. Ed. Ofival, Paris, 4 p.
- O'Hea E.K., Leveille G.A., 1969a. Significance of adipose tissue and liver as sites of fatty acid synthesis in the pig and the efficiency of utilization of various substrates for lipogenesis. *Journal of Nutrition* 99, 338-344.
- O'Hea E.K., Leveille G.A., 1969b. Lipid biosynthesis and transport in the domestic chick (*Gallus domesticus*). *Comparative Biochemistry and Physiology* 30, 149-159.
- Oriani G., Salvatori G., Pastorelli G., Pantaelo L., Ritieni A., Corino C., 2001. Oxidative status of plasma and muscle in rabbits supplemented with dietary vitamin E. *The Journal of Nutritional Biochemistry* 12, 138-143.
- Pawar A., Botolin D., Mangelsdorf D.J., Jump D.B., 2003. The role of liver X receptor-alpha in the fatty acid regulation of hepatic gene expression. *The Journal of Biological Chemistry* 278, 40736-40743.
- Pearson A.M., Gillett T.A., 1996. *Processed meats*. New York: Chapman & Hall. pp448.
- Peluffo R.O., Brenner R.R., 1974. Influence of dietary protein on 6- and 9-desaturation of fatty acids in rats of different ages and in different seasons. *The Journal of Nutrition* 104, 894-900.
- Pfaffl M.W., 2001. A new mathematical model for model for relative quantification in real-time RT-PCR. *Nucleic Acids Research* 29, 2002-2007.

Pignier C., Revenaz C., Rauly-Lestienne I., Cussac D., Delhon A., Gardette J., Le Grand B., 2007. Direct protective effects of poly-unsaturated fatty acids, DHA and EPA, against activation of cardiac late sodium current. *Basic Research in Cardiology* 102, 553-564.

Plourde M., Cunnane S.C., 2007. Extremely limited synthesis of long chain polyunsaturates in adults: implications for their dietary essentiality and use as supplements. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 32, 619-634.

Poissonnet C.M., Burdi A.R., Bookstein F.L., 1983. Growth and development of human adipose tissue during early gestation. *Early Human Development* 8, 1-11

Portolesi R., Powell B.C., Gibson R.A., 2008. D6 desaturase mRNA abundance in HepG2 cells is suppressed by unsaturated fatty acids. *Lipids* 43, 91-95

Price P.T., Nelson C.M., Clarke S.D., 2000. Omega-3 polyunsaturated fatty acid regulation of gene expression. *Current Opinion in Lipidology* 11, 3-7.

Purvis J.M., Clandinin M.T., Hacker R.R., 1983. Chain elongation-desaturation of linoleic acid during the development of the pig. Implications for the supply of polyenoic fatty acids to the developing brain. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology* 75B, 199-204.

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, 199-221.

Reeves J.B., Weihrauch J.L., 1979. Composition of foods: fat and oils – raw, processed, prepared. US Department of Agriculture, Agriculture Handbook no. 8–4, Washington, DC.

Renaudeau D., Mourot J., 2004. Comparaison des qualités de carcasse et de viande du porc Large-White et créole. 10^{ème} Journées des Sciences du Muscle et Technologie des Viandes, Rennes, 25 et 26 octobre 2004. *Viandes et Produits Carnés Hors-Série* 2004, 79-80.

Rey A. I., Kerry J. P., Lynch P. B., Lopez-Bote C. J., Buckley D. J., Morrissey P. A., 2001. Effect of dietary oils and α -tocopheryl acetate supplementation on lipid (TBARS) and cholesterol oxidation in cooked pork. *Journal of Animal Science* 79, 1201-1208.

Rhee K.S., 1992. Fatty acids in meats and meat products. In *Fatty acids in foods and their health implications*, ed. Chow CK. Marcel Dekker, New-York, pp 65-93.

Rhee K.S., Davidson T.L., Knabe D.A., Cross H.R., Ziprin Y.A., Rhee K.C., 1988. Effect of dietary high-oleic sunflower oil on pork carcass traits and fatty acid profiles of raw tissues. *Meat Science* 24, 249-260.

Richard M.J., Julius A.D., Wiggers K.D., 1983. Effects of dietary protein and fat on cholesterol deposition and body composition of pigs. *Nutrition Reports International* 28, 973-981.

Riley P.A., Enser G.R., Nute G.R., Wood J.D., 2000. Effects of dietary linseed on nutritional value and other quality aspects of pig muscle and adipose tissue. *Animal Science* 71, 483-500.

- Rinaldo D., Mourot J., 2002. Effects of tropical climate and season on growth, chemical composition of muscle and adipose tissue and meat quality in pigs. *Animal Research* 50, 507-512.
- Rioux V., Catheline D., Bouriel M., Legrand P., 2000. High performance liquid chromatography of fatty acids as naphthacyl ester. *Analysis* 27, 186-193.
- Rioux V., Legrand P., 2007. Saturated fatty acids: simple molecular structures with complex cellular functions. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care* 10, 752-758.
- Robelin J., Casteilla L., 1990. Différenciation, croissance et développement du tissu adipeux. *INRA Productions Animales* 3, 243-252.
- Romans J.R., Wulf D.M., Johnson R.C., Libal G.W., Costello W.J., 1995a. Effects of ground flaxseed in swine diets on pig performance and on physical and sensory characteristics and omega-3 fatty acid content of pork: I. Dietary level of flaxseed. *Journal of Animal Science*. 73, 1982-1986.
- Romans, J.R., Johnson R.C., Wulf D.M., Libal G.W., Costello W.J., 1995b. Effects of ground flaxseed in swine diets on pig performance and on physical and sensory characteristics and omega-3 fatty acid content of pork: II. Duration of 15% dietary flaxseed. *Journal of Animal Science* 73, 1987-1999.
- Sampath H., Ntambi J.M., 2004. Polyunsaturated fatty acid regulation of gene expression. *Nutrition reviews* 62, 333-339.
- SAS (1999). SAS/STAT® User's Guide (Release 8.1). SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- Sauvant D., Perez J.P., Tran G. Coord., 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevages. INRA éditions, Paris, 304p.
- Schlenk H., Sand D.M., Gellerman J.L., 1969. Retroconversion of docosahexaenoic acid in the rat. *Biochimica Biophysica Acta* 187, 201-207.
- Scott R.A., Cornelius S.G., Mersmann H.J., 1981. Effects of age on lipogenesis and lipolysis in lean and obese swine. *Journal of Animal Science* 52, 505-511.
- Serhan C.N., Arita M., Hong S., Gotlinger K., 2004. Resolvins, Docosatrienes, and Neuroprotectins, Novel Omega-3-Derived Mediators, and Their Endogenous Aspirin-Triggered Epimers. *Lipids* 39, 1125-1132.
- Sessler A.M., Ntambi J.M., 1998. Polyunsaturated fatty acid regulation of gene expression. *Journal of Nutrition* 128, 923-926.
- Shaikh S.R., Dumauval A.C., Castillo A. LoCascio D., Siddiqui R.A., Stillwell W., Wassall S.R., 2004. Oleic and docosahexaenoic acid differentially phase separate from lipid raft molecules: a comparative NMR, DSC, AFM, and detergent extraction study. *Biophysical Journal* 87, 1752-1766.

Simopoulos A.P., 1991. Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development. *The American Journal of Clinical Nutrition* 54, 438-463.

Simopoulos A.P., 2002 The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomed Pharmacother* 56, 365-379.

Simopoulos, A.P., 2008. The Importance of the Omega-6/Omega-3 Fatty Acid Ratio in Cardiovascular Disease and Other Chronic Diseases. *Experimental Biology and Medicine* 233, 674-688.

Singer P., Wirth M., Berger I., 1990. A possible contribution of decrease in free fatty acids to low serum triglyceride levels after diets supplemented with n-6 and n-3 polyunsaturated fatty acids. *Atherosclerosis* 83, 167-175.

Smith P.K., Krohn R.I., Hermanson G.T., Mallia A.K., Gartner F.H., Provenzano M.D., Fujimoto E.K., Goeke N.M., Olson B.J., Klenk D.C., 1985. Measurement of protein using bicinchoninic acid. *Annals of Biochemistry* 150, 76-85.

Specht-Overholt S., Romans J.R., Marchello M.J., Izard R.S., Crews M.G., Simon D.M., Costello W.J., Evenson P.D., 1997. Fatty acid composition of commercially manufactured omega-3 enriched pork products, haddock, and mackerel. *Journal of Animal Science* 75, 2335-2343.

Sprecher H., 1983. The mechanism of fatty acid chain elongation and desaturation in animals. In high and low erucic acid rapeseed oils, eds Kraner JK, Sauer FD & Pigden WJ. Academic Press, London, pp385-411.

Sprecher H., 2002. The roles of anabolic and catabolic reactions in the synthesis and recycling of polyunsaturated fatty acids. *Prostaglandins. Leukotrien Essential Fatty Acids* 67, 79-83.

Spychalla J.P., Kinney A.J., Browse J., 1997. Identification of an animal ω -3 fatty acid desaturase by heterologous expression in *Arabidopsis*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94, 1142-1147.

St. John L.C., Young C.R., Knabe D.A., Thompson L.D., Schelling G.T., Grundy S.M., Smith S.B., 1987. Fatty acid profiles and sensory and carcass traits of tissues from steers and swine fed an elevated monounsaturated fat diet. *Journal of Animal Science* 64, 1441-1447.

Stone N.J., 1996. Fish consumption, fish oil, lipids, and coronary heart disease. *Circulation* 94, 2337-2340.

Suryawan A., Hu C.Y., 1997. Effect of retinoic acid on differentiation of cultured pig preadipocytes. *Journal of Animal Science* 75, 112-117

Taskinen M.R., Kuusi T., 1987. Enzymes involved in triglyceride hydrolysis. *Baillière's clinical endocrinology and metabolism* 1, 639-666

Teye G.A., Sheard P.R., Whittington F.M., Nute G.R., Stewart A., Wood J.D., 2006. Influence of dietary oils and protein level on pork quality. 1. Effects on muscle fatty acid composition, carcass, meat and eating quality. *Meat Science* 73, 157-165.

- Thiébaud A.C., Chajès V., Gerber M., Boutron-Ruault M.C., Joulin V., Lenoir G., Berrino F., Riboli E., Bénichou J., Clavel-Chapelon F., 2009. Dietary intakes of omega-6 and omega-3 polyunsaturated fatty acids and the risk of breast cancer. *International Journal of Cancer* 124, 924-931.
- Thies F., Peterson L.D., Powell J.R., Nebe-von-Caron G., Hurst T.L., Matthews K.R., Newsholme E.A., Calder P.C., 1999. Manipulation of the type of fat consumed by growing pigs affects plasma and monocyte cell fatty acid compositions and lymphocyte and phagocyte functions. *Journal of Animal Science* 77, 137-147.
- Tichivangana J.Z., Morrissey P.A., 1985. Metmyoglobin and inorganic metals as prooxidants in raw and cooked muscle systems. *Meat Science* 15, 107-116.
- Tocher D.R., Leaver M.J., Hodgson P.A., 1998. Recent advances in the biochemistry and molecular biology of fatty acyl desaturases. *Progress in Lipid Research* 37, 73-117.
- Tomé D., 2008. Qualité nutritionnelle des protéines de la viande. *Cahier de Nutrition et de Diététique* 43, 40-45.
- Tonon T., Harvey D., Larson T.R., Graham I.A., 2002. Long chain polyunsaturated fatty acid production and partitioning to triacylglycerols in four microalgae. *Phytochemistry* 61, 15-24.
- Trinder P., 1969. Determination of glucose in blood using glucose oxidase with an enzyme that produces hydrogen peroxide. *Annals of clinical biochemistry* 6, 24-27.
- Valin C., 1988. Différenciation du tissu musculaire. Conséquences technologiques pour la filière viande. *Reproduction Nutrition Development* 28, 845-856.
- Vallot A., Bernard A., Carlier H., 1985. Influence of the diet on the portal and lymph transport of decanoic acid in rats. Simultaneous study of its mucosal catabolism. *Comparative Biochemistry Physiology A. Comparative Biophysiology*. 82A, 693-699.
- Van Harmelen V., Reynisdottir S., Eriksson P., Thorne A., Hoffstedt J., Lonnqvist F., Arner P., 1998. Leptin secretion from subcutaneous and visceral adipose tissue in women. *Diabetes* 47, 913-917.
- Van Oeckel M.J., Boucque C.V., 1992. Omega-3-fatty acids in pig nutrition – A review. *Landbouwtijdschrift* 45, 1177-1192.
- Van Oeckel M.J., Casteels M., Warnants N., Van Damme L., Boucqué C.H., 1996. Omega-3 fatty acid in pig nutrition: Implications for the intrinsic and sensory quality of the meat. *Meat Science* 44, 55-63.
- Vautier A., 2005. Les valeurs nutritionnelles de la viande de porc: les facteurs de variation. ITP, rapport d'étude, 28pp.
- Vodovar N., Desnoyer F., François A.C., 1971. Origine et évolution des adipocytes mésentériques du porcelet avant la naissance. *Journal de microscopie* 11, 265-284.

- Vodovar N., Desnoyer F., François A.C., 1977. Etude morphologique du tissu adipeux de couverture au stade de sa formation chez le fœtus de porc. *Annales de biologie animale, biochimie, biophysique* 17 : 775-786.
- Volatier J.L., Maffre J., Couvreur A., et al., 2000. Enquête individuelle et nationale sur les consommations alimentaires (INCA). Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- Vorin V., Mourot J, Weill P., Robin G., Peiniau P., Mounier A., 2003. Effet de l'apport d'acides gras oméga 3 dans l'alimentation du porc sur les performances de croissance et la qualité de la viande. *Journées de la recherche porcine* 35, 251-256.
- Voss A., Reinhart M., Sankarappa S., Sprecher H., 1991. The metabolism of 7,10,13,16,19-docosapentaenoic acid to 4,7,10,13,16,19-docosahexaenoic acid in rat liver is independent of a 4-desaturase. *The Journal of Biological Chemistry* 266, 19995-20000.
- Wang Y., Botolin D., Christian B., Busik J., Xu J., Jump D.B., 2005. Tissue-specific, nutritional, and developmental regulation of rat fatty acid elongases. *Journal of Lipid Research* 46, 706-715.
- Wang Y., Botolin D., Xu J., Christian B., Mitchell E., Jayaprakasam B., Nair M., Peters J.M., Busik J., Olson L.K., Jump D.B., 2006. Regulation of hepatic fatty acid elongase and desaturase expression in diabetes and obesity. *Journal of Lipid Research* 47, 2028-2041.
- Warnants N., Van Oeckel M.J., Boucque C.V., 1996. Incorporation of dietary polyunsaturated fatty acids in pork tissues and its implication for the quality of the end products. *Meat Science* 44, 125-144.
- Warnants N., Van Oeckel M.J., Boucque C.V., 1999. Incorporation of dietary polyunsaturated fatty acids into pork fatty tissues. *Journal of Animal Science* 77, 2478-2490.
- Warnants N., Van Oeckel M.J., Boucque C.V., De Paepe M., 1995. Influence of feeding dietary polyunsaturated fatty acids (extruded rapeseed) on animal performance, carcass, meat and fat quality. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 74, 24-33.
- Whelan J., Rust C., 2006. Innovative dietary sources of n-3 fatty acids. *Annual Review of Nutrition* 26, 75-103.
- Wigmore P.M., Stickland N.C., 1983. Muscle development in large and small pig fetuses. *Journal of anatomy* 137, 235-245.
- Wilfart A., Ferreira J.M., Mounier A., Robin G., Mourot J., 2004a. Effet de différents teneurs en acides gras n-3 sur les performances de croissance et la qualité nutritionnelle de la viande de porc. *Journées de la Recherche Porcine* 36, 195-202.
- Wilfart A., Robin G., Mourot J., 2004b. Effet des Omega 3 sur la taille et le nombre d'adipocytes de la bardière de porc. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 39, 72.
- Wilkinson P., Leach C., Ah-Sing E.E., Hussain N., Miller G.J., Millward D.J., Griffin B.A., 2005. Influence of alpha-linolenic acid and fish-oil on markers of cardiovascular risk in subjects with an atherogenic lipoprotein phenotype. *Atherosclerosis* 181, 115-124.

- 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, 351-362.
- Wood J.D., Enser M., 1982. Comparison of boars and castrates for bacon production. 2. Composition of muscle and subcutaneous fat, and changes in side weight during curing. *Animal Production* 35, 1449-1456.
- Wood J.D., Enser M., Fisher A.V., Nute G.R., Richardson R.I., Sheard P.R., 1999. Manipulating meat quality and composition. *Proceedings of the Nutrition Society* 58, 1-8.
- 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, 343-358.
- Wood J.D., Enser M., Whittington F.M., Moncrief C.B., Kempster A.J., 1989. Backfat composition in pigs: differences between fat thickness groups and sexes. *Livestock Production Science* 22, 351-362.
- Wood J.D., Richardson R.I., Nute G.R., Fisher A.V., Campo M.M., Kasapidou E., Sheard P.R., Enser M., 2003. Effects of fatty acids on meat quality: A review. *Meat Science* 66, 21-32.
- Yamamoto S., 1992. Mammalian lipoxygenases: molecular structures and functions. *Biochimica Biophysica Acta* 1128, 117-131.
- Zapata-Gonzalez F., Rueda F., Petriz J., Domingo P., Villarroya F., Diaz-Delfin J., de Madariaga M.A., Domingo J.C., 2008. Human dendritic cell activities are modulated by the omega-3 fatty acid, docosahexaenoic acid, mainly through PPAR(γ):RXR heterodimers: comparison with other polyunsaturated fatty acids. *Journal of Leukocyte Biology* 84, 1172-1182.
- Zhan Z.P., Huang F.R., Luo J., Dia J.J., Yan X.H., Peng J., 2009. Duration of feeding linseed diet influences expression of inflammation related genes and growth performance of growing-finishing barrows. *Journal of Animal Science* 87, 603-611.
- Zullo A., Baronoe C.M.A., Colatruglio P., Girolami A., Matassino D., 2003. Chemical composition of pig meat from the genetic type "casertana" and its crossbreeds. *Meat Science* 63, 89-100.

ANNEXES

Annexe 1. Composition centésimale de l'aliment de base des porcs charcutiers de l'INRA, UMR SENAH.

Composition	Teneur
Orge	24,70
Blé	24,30
Tourteau de soja	23,00
Maïs	15,00
Son fin de blé	5,00
Pulpe betterave	3,00
Mélasses	2,00
Carbonate	1,30
Phosphate bicalcique	0,51
Mélange oligo-vitamines	0,50
Sel	0,45
L-lysine	+
Acidifiant (antifongique)	+
Phytase	+
DL-méthionine	(+)
L-thréonine	(+)

Annexe 2. Étude I : Teneur en acide gras des tissus adipeux et musculaires des porcs charcutiers (mg/100 g)

1. Tissu adipeux sous cutané dorsal

	Contrôle		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
C12:0	56,5	56,5	72,5	34,2	38,9		39,5		
C14:0	853,3	853,3	1095,3	650,2	602,0		526,6		
C14:1	23,8	23,8	45,0	32,8	23,4		26,0		
C16:0	18088,5	18088,5	22482,2	14296,6	12659,0		10696,9		
C16:1	1586,4	1586,4	1904,4	1068,6	1020,2		1001,2		
C18:0	10327,1	10327,1	12562,6	8658,5	7654,7		5664,3		
C18:1	30683,2	30683,2	37650,6	22561,1	21087,6		19128,5		
C18:2	10049,3	10049,3	16844,5	7705,6	6865,5		7684,2		
C20:0	224,1	224,1	288,3	167,9	165,7		145,0		
C18:3	614,5	614,5	747,9	2350,2	2869,6		425,5	***	**
C20:1	762,0	762,0	913,3	555,8	478,5		460,8		
C20:2	498,9	498,9	809,3	369,0	310,3		376,9		
C20:3	57,7	57,7	80,9	34,7	25,7		39,5	*	
C20:4	236,2	236,2	329,0	137,3	175,4		160,1	***	
C22:1	0,0	0,0	0,0	10,0	16,5		6,8	***	
C20:5	12,5	12,5	10,4	31,0	45,8		15,1	***	
C24:0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0		2,9		
C24:1	70,4	70,4	103,3	39,1	24,9		48,4	*	
C22:5	56,4	56,4	68,3	100,2	116,3		33,0	***	
C22:6	24,8	24,8	29,9	9,8	27,1		20,3		**
Σ AG saturés	29549,5	29549,5	36500,9	23809,6	21120,3		17037,6		
Σ AG monoinsaturés	33125,7	33125,7	40616,6	24267,4	22651,1		20642,3		
Σ AG polyinsaturés	11550,3	11550,3	18920,3	11037,9	10735,8		8688,7		
Σ AG n-6	10343,3	10343,3	17254,5	8177,7	7366,7		7876,9		
Σ AG n-3	708,2	708,2	856,5	2491,2	3058,8		481,5	***	**
AG n-6 / AG n-3	14,7	14,7	20,1	3,3	2,4		0,9		
C18:2/C18:3	16,4	16,4	22,4	3,3	2,4		1,0		

D : effet distribution ; ETR : écart type résiduel ; R : Effet régime

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monosaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 2. Étude I : Teneur en acide gras des tissus adipeux et musculaires des porcs charcutiers (mg/100 g)

2. Panne

	Contrôle		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D
C12:0	47,2	47,2	54,6	50,9	51,8		14,6		
C14:0	795,7	795,7	792,9	765,6	764,3		126,7		
C14:1	6,5	6,5	7,6	18,9	15,1		10,9		***
C16:0	16673,5	16673,5	15771,0	16791,3	15819,9		2388,6		
C16:1	1072,5	1072,5	964,0	911,9	898,5		173,9		
C18:0	11256,0	11256,0	10309,2	11850,4	11268,5		1723,6		
C18:1	21654,6	21654,6	19335,3	20189,6	19461,1		3276,6		
C18:2	6783,2	6783,2	9575,0	7143,6	6933,2		1695,4	***	
C20:0	175,9	175,9	160,7	172,4	197,2		58,0		
C18:3	433,4	433,4	428,1	2423,8	3157,3		509,6	***	*
C20:1	436,7	436,7	363,0	420,4	378,4		99,1		
C20:2	260,8	260,8	318,8	259,5	280,7		89,4		
C20:3	38,2	38,2	47,3	34,2	49,5		26,2		
C20:4	163,5	163,5	181,7	157,6	188,9		8,2	***	
C22:1	2,4	2,4	5,7	17,3	20,9		5,8	***	*
C20:5	14,4	14,4	15,1	39,1	54,5		0,9	***	***
C24:0	0,8	0,8	4,7	3,5	9,9		7,7	*	*
C24:1	49,3	49,3	55,1	35,1	35,1		16,4	**	
C22:5	49,2	49,2	43,5	107,0	118,2		25,8	***	
C22:6	23,1	23,1	24,7	19,9	28,5		10,4		***
Σ AG saturés	28949,1	28949,1	27093,1	29634,1	28111,5		4172,1		
Σ AG monoinsaturés	23222,1	23222,1	20730,6	21593,3	20809,2		3506,8		
Σ AG polyinsaturés	7765,8	7765,8	10634,2	10384,6	11010,9		2233,9	**	
Σ AG n-6	6984,9	6984,9	9803,9	7535,4	7371,7		1749,3	***	
Σ AG n-3	520,1	520,1	511,5	2589,8	3358,6		543,1	***	*
AG n-6 / AG n-3	13,5	13,5	19,2	2,9	2,2		1,2		
C18:2/C18:3	15,8	15,8	22,4	3,0	2,2		1,2		

D : effet distribution ; ETR : écart type résiduel ; R : Effet régime

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monosaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 2. Etude I : Teneur en acide gras des tissus adipeux et musculaires des porcs charcutiers (mg/100 g)

3. Tissu adipeux intermusculaire du jambon

	Contrôle		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	ETR	R	D
C14:0	694,0	685,1	703,5	669,3	708,1		87,0		
C14:1	7,1	7,1	6,5	6,6	6,3		2,7		
C16:0	12500,0	12783,6	12609,4	12156,4	12946,3		1299,1		
C16:1	1289,6	1140,5	1228,9	1199,5	1223,2		178,0		
C18:0	6070,7	6795,2	6077,4	6105,8	6609,3		960,2		
C18:1	18282,8	17908,9	18362,8	18126,2	19168,8		1995,3		
C18:2	9258,3	10191,9	12126,8	9164,7	10443,5		2019,6	**	
C20:0	99,6	110,0	101,7	99,3	104,7		17,9		
C18:3	581,4	586,9	591,7	2034,9	3610,9		1218,2	***	**
C20:1	362,9	350,3	361,7	361,6	375,0		57,5		
C20:2	331,1	358,8	419,5	340,6	350,6		72,7		
C20:3	59,2	68,0	65,8	58,7	50,0		15,9	*	
C20:4	230,7	257,2	249,9	0,0	0,0		126,3	***	
C22:1	0,0	0,0	0,0	20,8	22,0		10,5	**	
C20:5	15,3	20,9	14,8	40,5	56,2		17,5	***	
C24:0	2,3	0,0	1,4	0,0	7,6		7,8		
C24:1	93,8	66,3	78,9	64,7	49,3		32,8		
C22:5	83,1	62,4	67,8	101,0	145,7		46,6	*	
C22:6	44,1	24,5	33,1	34,0	48,8		46,5		
Σ AG saturés	19366,6	20373,8	19493,4	19030,8	20376,1		2214,0		
Σ AG monoinsaturés	20036,3	19473,2	20038,8	19779,3	20844,6		2174,4		
Σ AG polyinsaturés	10633,2	11570,6	13569,5	11774,4	14705,7		2434,6	**	**
Σ AG n-6	9488,9	10449,1	12376,7	9164,7	10443,5		2072,2	**	
Σ AG n-3	813,1	762,7	773,3	2269,2	3911,6		1263,1	***	**
AG n-6 / AG n-3	11,9	13,8	16,1	4,0	2,7		5,4		
C18:2/C18:3	15,9	17,5	20,6	4,5	2,9		7,2		

D : effet distribution ; ETR : écart type résiduel ; R : Effet régime

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monosaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 2. Etude I : Teneur en acide gras des tissus adipeux et musculaires des porcs charcutiers (mg/100 g)

4. Muscle *longissimus dorsi*

	Contrôle		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	ETR	R	D	
C12:0	1,2	1,2	1,1	1,7	1,1	1,0			
C14:0	13,5	13,5	14,0	13,9	13,2	6,2			
C14:1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,3	0,2			
C16:0	266,8	266,8	289,3	313,8	271,7	97,2			
C16:1	37,3	37,3	40,5	40,3	34,4	15,7			
C18:0	125,2	125,2	135,1	157,4	133,9	44,9			
C18:1	449,6	449,6	499,8	520,3	450,3	184,7			
C18:2	138,7	138,7	165,5	139,1	141,7	26,0	*		
C20:0	2,9	2,9	2,9	2,8	2,6	0,8			
C18:3	4,6	4,6	4,9	19,9	25,5	4,2	***	*	
C20:1	7,3	7,3	8,5	8,6	7,0	3,2			
C20:2	4,0	4,0	5,3	4,6	3,9	1,2			
C20:3	3,3	3,3	3,3	3,2	2,9	0,6			
C20:4	28,4	28,4	30,0	26,2	23,1	5,6	*		
C22:1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,1	***	**	
C20:5	1,7	1,7	1,4	4,3	7,0	0,8	***	***	
C24:0	0,4	0,4	0,0	1,3	0,4	0,9		**	
C24:1	4,7	4,7	5,3	3,4	2,5	1,6	***		
C22:5	4,2	4,2	3,8	5,8	8,1	1,4	***	*	
C22:6	2,1	2,1	1,7	1,5	2,1	0,7			
Σ AG saturés	410,0	410,0	442,5	490,9	422,9	149,8			
Σ AG monoinsaturés	499,2	499,2	554,5	573,4	495,1	203,2			
Σ AG polyinsaturés	186,9	186,9	216,0	204,5	214,4	35,0			
Σ AG n-6	170,3	170,3	198,8	168,5	167,7	29,5	*		
Σ AG n-3	12,6	12,6	11,9	31,4	42,7	5,5	***	**	
AG n-6 / AG n-3	13,8	13,8	17,0	5,6	3,9	1,4			
C18:2/C18:3	32,1	32,1	34,9	7,3	5,6	5,6			

D : effet distribution ; ETR : écart type résiduel ; R : Effet régime

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monoinsaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 2. Étude I : Teneur en acide gras des tissus adipeux et musculaires des porcs charcutiers (mg/100 g)

5. Muscle *semimembranosus*

	Contrôle		Tournesol		Lin		Statistiques		
	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	50-105 kg	80-105 kg	ETR	R	D
C12:0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1		0,5		
C14:0	13,7	13,7	14,4	16,8	16,1		6,8		
C14:1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2		0,2		
C16:0	285,1	285,1	297,6	343,9	327,4		117,5		
C16:1	42,5	42,5	44,4	46,1	47,3		18,5		
C18:0	127,0	127,0	131,2	165,0	149,9		52,8		
C18:1	514,5	514,5	543,5	602,1	619,3		228,5		
C18:2	174,8	174,8	219,8	185,3	192,9		54,7	*	
C20:0	2,9	2,9	2,8	3,3	3,0		1,2		*
C18:3	6,0	6,0	6,9	28,8	37,5		9,0	***	
C20:1	7,8	7,8	8,8	10,4	9,7		4,1		
C20:2	4,8	4,8	6,6	6,4	5,7		2,2		
C20:3	3,7	3,7	3,7	4,1	3,4		1,1		**
C20:4	35,1	35,1	37,9	31,7	29,5		7,4	**	
C22:1	0,0	0,0	0,0	0,7	0,8		0,5	***	
C20:5	2,6	2,6	2,1	6,0	8,5		1,4	***	
C24:0	0,3	0,3	0,1	0,6	0,1		1,0		*
C24:1	5,5	5,5	5,6	4,2	3,1		1,9	**	
C22:5	5,1	5,1	4,7	6,9	10,1		1,8	***	**
C22:6	2,2	2,2	2,2	1,8	2,7		1,1		*
Σ AG saturés	429,9	429,9	447,2	530,7	497,5		177,8		
Σ AG monoinsaturés	570,6	570,6	602,6	663,6	680,3		251,6		
Σ AG polyinsaturés	234,3	234,3	284,0	271,0	290,4		71,5		
Σ AG n-6	213,6	213,6	261,5	221,1	225,8		60,5	*	
Σ AG n-3	15,9	15,9	15,9	43,5	58,9		10,9	***	
AG n-6 / AG n-3	13,5	13,5	16,6	5,1	3,9		1,2		
C18:2/C18:3	30,6	30,6	33,5	6,8	5,4		4,5		

D : effet distribution ; ETR : écart type résiduel ; R : Effet régime

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monosaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 3. Etude II : Teneur en acide gras du tissu adipeux, du muscle *longissimus dorsi* et du foie des porcs charcutiers (mg/100 g)

1. Tissu adipeux sous cutané dorsal

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile Chanvre	Huile Colza	Huile Lin	Graines Lin A	Graines Lin B	Graines Lin C	Huile Palme	Huile Tournesol	ETR	Effet
C12:0	49,0	39,8	39,8	44,3	47,6	37,8	42,1	47,1	9,1	
C14:0	609,1	608,9	612,4	595,5	641,9	564,7	643,2	576,5	87,3	
C14:1	16,4	17,0	13,9	20,1	22,3	13,2	14,3	20,2	9,0	
C16:0	12366,2	12496,0	12476,6	12293,5	12899,3	11731,8	13057,7	11710,5	1773,5	
C16:1	1104,1	1059,5	973,0	1218,1	1170,4	944,5	1207,1	1155,2	182,6	**
C18:0	7168,9	7337,9	7881,5	7160,6	7592,8	7259,7	7182,6	6642,5	1326,9	
C18:1	21000,7	23274,2	19658,3	21033,1	21263,5	19142,7	23047,6	19958,9	3101,1	*
C18:2	9638,6	7069,1	7238,3	6982,1	7618,5	6990,0	7050,6	8804,4	1475,9	***
C20:0	273,2	161,7	155,9	149,0	163,3	147,5	151,0	152,8	39,9	***
C18:3	1338,9	894,1	3377,3	3015,1	3446,3	3266,3	511,9	419,7	585,3	***
C20:1	516,7	560,7	423,1	446,7	425,5	404,9	528,3	442,3	114,3	*
C20:2	486,6	328,2	325,3	355,6	371,6	320,1	352,5	424,6	87,3	***
C20:3	168,8	73,9	49,9	77,9	71,6	49,6	56,9	77,1	26,5	***
C20:4	131,3	119,1	76,4	449,5	341,4	60,5	127,4	312,9	114,8	***
C22:1	15,4	19,5	26,2	23,8	28,3	27,6	16,1	17,8	12,0	
C20:5	30,9	23,3	52,5	102,2	68,6	53,0	16,6	27,9	28,4	***
C24:0	65,9	66,0	21,5	81,1	62,3	14,3	63,1	90,2	28,7	***
C24:1	20,7	23,4	28,3	25,3	22,9	28,5	25,6	20,9	13,3	
C22:5	83,5	65,5	129,7	168,8	138,8	124,9	57,7	51,6	29,4	***
C22:6	21,9	20,1	25,1	27,5	27,6	22,1	22,0	21,9	11,8	
Σ AG saturés	20532,4	20710,2	21187,8	20323,9	21407,2	19755,8	21139,6	19219,6	3129,2	
Σ AG monoinsaturés	22673,9	24954,3	21122,7	22767,0	22932,9	20561,4	24838,9	21615,1	3265,4	*
Σ AG polyinsaturés	11900,5	8593,2	11274,5	11178,6	12084,5	10886,5	8195,7	10140,2	1942,6	***
Σ AG n-6	9938,7	7262,0	7364,7	7509,5	8031,5	7100,1	7234,9	9194,4	1445,5	***
Σ AG n-3	1643,9	1076,9	3634,5	3391,5	3752,9	3515,9	665,1	598,2	553,2	***
Σ AG n-6 / Σ AG n-3	5,9	6,7	2,0	2,4	2,1	2,0	10,9	15,2	0,8	***
C18:2 / C18:3	7,2	7,9	2,1	2,9	2,2	2,1	13,9	22,6	2,0	***

ETR : écart type résiduel

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monosaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 3. Etude II : Teneur en acide gras du tissu adipeux, du muscle *longissimus dorsi* et du foie des porcs charcutiers (mg/100 g)

2. Muscle *longissimus dorsi*

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile Chanvre	Huile Colza	Huile Lin	Graines Lin A	Graines Lin B	Graines Lin C	Huile Palme	Huile Tournesol	ETR	Effet
C12:0	1,1	0,7	1,1	0,9	1,1	0,9	0,6	0,9	0,4	
C14:0	14,1	10,1	13,7	11,9	13,9	11,8	7,4	11,4	5,4	
C14:1	0,5	0,4	0,6	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,2	
C16:0	309,0	216,9	274,6	254,4	288,0	245,9	164,8	241,1	94,1	*
C16:1	40,2	28,4	37,6	28,0	40,7	33,9	22,3	27,2	14,3	*
C18:0	164,0	111,8	144,2	139,7	146,3	128,8	82,8	133,0	49,1	*
C18:1	539,7	389,8	477,8	432,7	520,3	442,3	289,0	413,2	184,1	
C18:2	182,4	117,4	125,2	151,3	143,9	115,7	102,6	167,0	31,4	**
C20:0	4,7	3,2	2,4	3,2	2,7	2,6	2,4	3,6	1,4	**
C18:3	13,9	8,0	30,5	48,5	33,5	27,7	4,0	5,9	11,8	***
C20:1	9,7	7,3	8,4	8,5	8,7	6,4	5,3	8,7	3,8	
C20:2	6,6	4,1	4,6	6,0	5,2	4,2	3,4	6,7	2,4	*
C20:3	5,8	3,7	3,5	3,1	4,0	3,2	3,6	3,2	1,3	***
C20:4	37,3	26,7	23,5	20,3	25,1	21,6	27,1	25,1	10,9	*
C22:1	0,6	0,4	0,9	0,6	0,6	0,9	0,5	0,5	0,2	***
C20:5	3,3	2,2	6,4	5,9	8,2	5,9	1,4	1,0	1,6	***
C24:0	5,6	4,1	3,0	2,6	3,6	2,8	4,7	4,8	1,4	***
C24:1	1,5	1,0	1,2	1,1	1,4	1,1	1,0	1,0	0,4	*
C22:5	7,6	4,8	8,5	7,6	9,8	7,9	3,7	3,0	2,3	***
C22:6	1,9	1,3	1,5	1,3	1,7	1,4	1,4	0,9	0,6	*
Σ AG saturés	498,5	346,8	439,0	412,7	455,5	392,7	262,7	394,8	149,2	*
Σ AG monoinsaturés	592,2	427,3	526,6	471,3	572,2	485,1	318,5	450,9	201,5	
Σ AG polyinsaturés	258,7	168,1	203,7	243,9	231,3	187,7	147,1	212,8	59,8	***
Σ AG n-6	225,5	147,8	152,2	174,7	173,0	140,5	133,3	195,3	48,3	***
Σ AG n-3	32,4	19,9	50,4	66,3	57,1	46,1	14,0	14,0	13,7	***
Σ AG n-6 / Σ AG n-3	7,1	7,4	3,1	2,8	3,0	3,1	9,5	13,9	0,8	
C18:2 / C18:3	14,1	15,2	4,3	3,9	4,4	4,3	26,7	32,2	4,1	

ETR : écart type résiduel

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monosaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 3. Etude II : Teneur en acide gras du tissu adipeux, du muscle *longissimus dorsi* et du foie des porcs charcutiers (mg/100 g)

3. Foie

	Régimes expérimentaux								Statistiques	
	Huile Chanvre	Huile Colza	Huile Lin	Graines Lin A	Graines Lin B	Graines Lin C	Huile Palme	Huile Tournesol	ETR	Effet
C12:0	3,2	2,6	0,2	18,2	4,2	0,2	5,0	4,9	12,3	
C14:0	13,9	11,3	5,8	15,0	15,6	7,8	8,8	10,1	12,3	
C14:1	1,8	1,8	2,0	1,9	2,2	2,6	2,6	2,4	8,1	
C16:0	360,3	317,5	262,2	257,4	385,1	291,2	322,0	326,9	0,8	
C16:1	26,9	24,9	13,4	17,9	34,1	20,5	22,6	23,9	80,5	
C18:0	561,7	557,2	534,3	601,7	663,6	518,1	548,4	629,1	11,7	
C18:1	361,4	402,1	247,3	265,7	436,1	301,4	356,2	309,1	76,8	*
C18:2	429,9	348,5	333,8	303,5	436,0	352,1	302,4	406,4	114,3	
C20:0	10,4	6,8	4,5	5,1	6,6	5,4	7,9	8,5	81,2	*
C18:3	43,5	25,2	59,4	65,3	120,1	79,5	11,2	11,2	3,3	
C20:1	6,2	6,4	4,9	6,2	6,2	4,8	5,9	6,0	27,6	***
C20:2	12,9	7,9	10,9	9,5	11,0	9,0	7,1	13,4	2,3	
C20:3	16,3	15,7	15,4	14,7	15,4	14,4	16,0	14,5	2,7	**
C20:4	330,1	315,8	236,4	178,3	256,4	231,3	320,3	400,8	4,2	
C22:1	5,0	5,2	12,9	12,5	13,7	12,0	1,3	1,2	57,7	***
C20:5	33,5	31,0	94,6	89,3	127,2	104,3	12,2	9,3	3,3	***
C24:0	15,3	14,4	7,4	6,5	6,5	6,9	21,2	25,6	17,7	***
C24:1	4,6	4,0	3,4	3,6	3,8	4,1	7,3	6,9	7,3	***
C22:5	66,3	62,4	86,2	64,1	83,4	77,9	44,1	39,5	2,2	*
C22:6	24,4	19,1	22,6	15,4	21,6	24,0	22,7	16,6	15,4	***
Σ AG saturés	964,7	909,8	814,4	903,8	1081,6	829,7	913,3	1005,0	7,1	
Σ AG monoinsaturés	406,0	444,4	283,9	307,8	496,0	345,3	395,9	349,5	152,1	
Σ AG polyinsaturés	956,9	825,6	859,3	740,1	1071,2	892,5	735,8	911,7	127,5	
Σ AG n-6	776,3	680,0	585,6	496,5	707,8	597,9	638,6	821,8	174,8	*
Σ AG n-3	184,0	153,3	278,2	248,8	367,7	300,1	106,0	91,1	130,9	**
Σ AG n-6 / Σ AG n-3	4,2	4,4	2,1	2,0	1,9	2,0	6,0	9,0	54,6	***
C18:2 / C18:3	9,9	13,8	5,6	4,6	3,6	4,4	27,0	36,4	0,4	***

ETR : écart type résiduel

NS : p>0,05 ; * : p<0,05 ; ** : p<0,01 ; *** : p<0,001

Σ AG saturés : C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0 + C20:0 + C24:0

Σ AG monoinsaturés : C12:1 + C14:1 + C16:1 + C18:1 + C20:1 + C22:1 + C24:1

Σ AG polyinsaturés : C18:2 + C18:3 + C20:4 + C20:5 + C22:5 + C22:6

Σ AG n-6 / Σ AG n-3 : (C18:2 + C20:4) / (C18:3 + C20:5 + C22:5 + C22:6)

Annexe 4. Composition des solutions pour la culture cellulaire

1. Tampon HEPES Phosphate (pH 7,4)

Solution	Concentration
NaCl	0,135 M
CaCl ₂	2,2 mM
MgSO ₄	1,25 mM
KH ₂ PO ₄	0,45 mM
Na ₂ HPO ₄	2,17 mM
HEPES	10 mM
D-Glucose	5 mM

2. Tampon Earl (pH 7,4)

Solution	Concentration
NaCl	0,12 M
KCl	5,37 mM
Na ₂ HPO ₄ , 2 H ₂ O	0,79 mM
NaHCO ₃	28,6 mM

3. Hémalum de Mayer

Solution	Concentration
Hematoxyline	3,31 mM
NaIO ₃	1,01 mM
Alun de potassium	0,105 mM
Acide citrique	5,2 mM
Hydrate de chloral	0,303 M

4. Tampon VMG (pH 7,4) + Héparine

Solution	Concentration
Véronal	5 mM
MgCl ₂	0,5 mM
Glycérol	1 M
CaCl ₂	1,8 mM
Mannitol	20 mM
Héparine	20 U/mL

5. Tampon MOPS 20X (pH 7)

Solution	Concentration
MOPS	0,4 M
Acétate de sodium	1 M
EDTA	0,02 M

Annexe 5. Composition des milieux de culture

1. Composition du milieu d'inoculation

Solution	Concentration
DMEM	qsp volume
SVF	10%
Pénicilline-Streptomycine	50 U/mL-50 µg/mL
Gentamycine	20 µg/mL
Nystatine	0,25 µg/mL
Fongizone	0,25 µg/mL
Insuline	2,6 nM
Cortisol	100 nM
L-Glutamine	4 mM

2. Composition du milieu sérique

J1 de culture

Solution	Concentration
DMEM	qsp volume
SP	10%
P-S	50 U/mL-50 µg/mL
Gentamycine	20 µg/mL
Nystatine	0,25 µg/mL
Fongizone	0,25 µg/mL
Insuline	2,6 nM
Cortisol	100 nM
L-Glutamine	4 mM

J3 de culture

Solution	Concentration
DMEM	qsp volume
SP	2,5%
P-S	50 U/mL-50 µg/mL
Gentamycine	20 µg/mL
Nystatine	0,25 µg/mL
Fongizone	0,25 µg/mL
Insuline	2,6 nM
Cortisol	100 nM
L-Glutamine	4 mM

3. Composition du milieu défini

Solution	Concentration
DMEM/Ham F12 (1/1)	qsp volume
Pénicilline-Streptomycine	50 U/mL-50 µg/mL
Gentamycine	20 µg/mL
Nystatine	0,25 µg/mL
Fongizone	0,25 µg/mL
Insuline	8 nM
Cortisol	100 nM
T3	0,2 nM
Transferrine	10 µg/mL
b-mercaptoéthanol	50 µM
Acide ascorbique	0,1 nM
L-Glutamine	2,5 mM

Effect of n-3 fatty acids on the construction of the pig's meat nutritional quality and lipid metabolism

Nutritional quality of pork can be improved by rearing factors, and mainly by their diet. There is in pig a strong relationship between fatty acids providing by the diet and fatty acid composition of adipose tissue and muscle, as it is usually the case in monogastrics. This property is a mean to rise level of n-3 fatty acids for human consumption. The French food safety agency (AFSSA) recommendations suggest a daily intake of 2 g of C18:3 n-3 and a C18:2 n-6 / C18:3 n-3 ratio equal to 5.

The aim of this thesis was to study the effect of n-3 fatty acid (FA) incorporation in the diet on adipoconversion process, lipid metabolism, and n-3 FA level in meat and cooked pork meat. Three experimentations were performed to reach this objective.

Firstly, increasing linseed diet distribution to pigs, from 1 to 2 months rose n-3 FA proportion (precursor and long chain FA) in meat. Lipid metabolism (lipogenesis and desaturation) were not influenced by diet. Cooked pork meat could cover about 75% of daily n-3 FA recommendations for consumers

Secondly, by the variation of many vegetable sources of n-3 FA (linseed, hemp, rape) in different forms (oil, seed) and different technological processes, we showed that hemp oil is an interesting source in terms of n-3 FA despite its level of n-6 FA. However, linseed is still the most effective source in terms of n-3 accumulation in meat. Technological process improved n-3 deposition.

Thirdly, *in vitro*, during the adipogenesis process, we showed that n-6 FA promote preadipocyte differentiation unlike n-3 FA.

As a conclusion, it was shown that it is possible to improve the nutritional quality of meat without reducing technological and gustative quality by the distribution of n-3 FA rich diets. Additionally, the adipoconversion processes were lowered with n-3 FA. All our results confirm AFSSA's recommendations to have a good balance between n-6 and n-3 FA.

Key words : Pig, Meat, Cooked pork meat, Muscle, Adipose tissue, Adipoconversion, n-3 FA

Effet des acides gras n-3 sur la construction de la qualité nutritionnelle de la viande de porc et sur le métabolisme des lipides.

La construction de la qualité nutritionnelle de la viande de porc passe par la compréhension de la mise en place des tissus adipeux et l'étude de la synthèse des lipides et des dépôts en acides gras (AG). La qualité nutritionnelle de la viande peut être modifiée par les facteurs d'élevage où l'alimentation en est une de ses principales composantes. Chez le porc, il existe une relation directe entre les acides gras alimentaires et ceux déposés dans la viande. Cette propriété peut être utilisée pour introduire dans la ration de l'animal des AG jugés bons pour la santé humaine. L'AFSSA recommande d'augmenter l'apport quotidien en C18:3 n-3 et d'équilibrer le rapport C18:2 n-6/C18:3 n-3 vers une valeur proche 5. Pour atteindre ces objectifs, la viande de porc sera considérée comme un des vecteurs potentiels d'apport d'AG n-3.

Les objectifs de cette thèse sont d'étudier les conséquences de la distribution de régimes riches en AG n-3 chez le porc sur les processus d'adipoconversion des cellules adipeuses, sur le métabolisme des lipides et enfin sur le dépôt en AG n-3 dans la viande et les produits de transformation. Pour répondre à ces objectifs, trois études expérimentales ont été mises en place.

La première étude consistait à comparer la durée de distribution de régimes riches en C18:3 n-3 (graine de lin extrudée). Nous avons montré qu'augmenter sa durée de distribution (de 1 à 2 mois) permettait un dépôt plus important en C18:3 n-3 mais aussi en dérivés à longue chaîne. Le métabolisme des lipides, étudié par activités des enzymes de la lipogénèse et les enzymes désaturases est peu affecté par les régimes. Enfin, les produits de transformation, globalement bien acceptés par le consommateur, couvrent jusqu'à 75 % des ANC.

La deuxième étude a permis d'observer les conséquences sur le dépôt en AG n-3 selon les sources en ALA (lin, chanvre, colza), selon leur biodisponibilité (huile ou graines de lin) et selon les paramètres technologiques de cuisson-extrusion de la graine. Outre le fait que la graine de lin reste le meilleur moyen d'enrichir les tissus en AG n-3, le chanvre constitue une source intéressante supérieure au colza, avec néanmoins des valeurs en AG n-6 plus importante. Enfin, la cuisson-extrusion des graines de lin a des conséquences sur le dépôt des AG n-3 au sein des tissus.

La troisième étude a permis de déterminer le rôle des AG n-6 et n-3 sur l'adipoconversion d'adipocytes de porcelet en culture primaire. Nos travaux ont mis en évidence que les AG n-6 favorisaient l'adipogénèse, *a contrario* des AG n-3 qui la diminuaient.

En conclusion, nos résultats montrent qu'il est possible d'enrichir, sans en modifier l'appréciation du consommateur, la qualité nutritionnelle de la viande de porc et des produits de charcuterie. La distribution de graines de lin extrudé ne modifie pas les paramètres d'élevage et la qualité technologique de la viande. La diminution de l'adipoconversion des préadipocytes nous conforte dans l'idée du bon équilibre des AG n-6 et n-3 comme recommandé par l'AFSSA.

Mots clés : Porc, Viande, Produits de charcuterie, Muscle, Tissu adipeux, Adipoconversion, AG n-3