



HAL
open science

De la maîtrise de la qualité de la viande et de la carcasse à l'optimisation des services par ingénierie de l'écosystème digestif chez le lapin

Sylvie Combes

► **To cite this version:**

Sylvie Combes. De la maîtrise de la qualité de la viande et de la carcasse à l'optimisation des services par ingénierie de l'écosystème digestif chez le lapin. Sciences du Vivant [q-bio]. 2014. tel-02791991

HAL Id: tel-02791991

<https://hal.inrae.fr/tel-02791991>

Submitted on 5 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.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

Mémoire présenté pour obtenir

L'HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Par

Sylvie COMBES

INRA UMR1388 GenPhySE

De la maîtrise de la qualité de la viande et de la carcasse à l'optimisation des services par ingénierie de l'écosystème digestif chez le lapin

Devant le jury composé de

Mme BAYOURTHE Corine	Professeur de l'ENSA de Toulouse	Correspondant
M. SCHMIDELY Philippe	Professeur de l'AgroParisTech	Rapporteur
M. GODON Jean-Jacques	Directeur de Recherches INRA	Rapporteur
M. MAERTENS Luc	Directeur de Recherches ILVO	Rapporteur
M. GIDENNE Thierry	Directeur de Recherches INRA	Examineur

Le 12 juin 2014

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Jean-Jacques Godon, Luc Maertens et Philippe Schmidely qui me font l'honneur d'être rapporteurs de ce travail, ainsi que Corine Bayourthe, pour avoir accepté d'être mon correspondant.

Je remercie chaleureusement Thierry Gidenne, pour son accueil au sein de son équipe. Il a su me faire bénéficier de son expérience lors de mon lancement dans ce nouveau domaine d'étude des écosystèmes digestifs en relation avec la santé et l'efficacité digestive. Ses idées et son investissement ont largement contribué au développement de cette thématique au sein de notre équipe et de notre unité. Je remercie également Xavier Fernandez, directeur de TANDEM puis de GenPhySE pour son soutien et sa disponibilité. J'adresse mes remerciements à François Lebas, directeur de la SRC, pour la confiance témoignée et son aide précieuse pour mener à bien les travaux de recherches sur la qualité de la viande de lapin ainsi que Daniel Delmas pour ses précieux conseils initiatiques. Mes remerciements sincères vont bien évidemment à Isabelle Louveau, Michel Bonneau, Ulrike Weiler et Michel Etienne qui m'ont formée au métier de la recherche et ont encadré ma thèse, mes stages de DEA et d'ingénieur.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réalisation de ces travaux : le personnel de la SRC puis de TANDEM puis de GenPhySE, ils ont tous par leurs compétences, leur savoir faire et leur sympathie permis la réalisation des travaux de recherche présentés dans ce mémoire. Je remercie Laurence Fortun-Lamothe qui a su apporter un nouvel angle, une direction, une inversion de paradigme aux thématiques de recherches menées dans notre unité. Je tiens également à remercier Francis Enjalbert, pour la confiance qu'il m'a témoignée et le pari gagné sur les nouvelles technologies de séquençages. Je remercie Annabelle Troegeler, Christine Julien, Olivier Zemb et Géraldine Pascal pour leur dynamisme apporté à notre équipe.

Une pensée particulière à ceux qui m'ont suivi dans les chambres froides à 4 heures du matin, dans les abattoirs les plus reculés, qui inlassablement ont pesé, agité, lavé des billes, changé pour des univers plus odorants et endossé le rôle si important de MacGyver : merci à Béatrice Gabinaud, Laurent Cauquil, Muriel Ségura, Carole Bannelier, Véronique Tartié, Bérengère Peña-Arnaud, Patrick Aymard. Merci également à celles qui rendent le travail de recherches plus facile : Viviane Batailler et Valérie Lozano. Je remercie également l'ensemble des personnels de PECTOUL.

Je remercie l'ensemble des étudiants qui au cours de leur stage ont contribué à la production de résultats avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler, les thésards et post doctorants Rory Michelland, Mélanie Martignon, Moussa Kimsé, Asma Zened, Mickael Rey, Christelle Knudsen, Vincent Jacquier et Katia Massip, les masters Lise Aubourg, Aziz Zoubai, Vincent Soulié, Uyen Tran, Flora Nice et Yoan Teissier

A ma famille pour son indéfectible soutien,

SOMMAIRE

A. Curriculum Vitae.....	1
B. Mes deux thématiques de recherches successives	5
Partie 1. Influence des facteurs d'élevage sur la qualité de la viande de lapin.....	7
I. Contexte	7
I1. Contexte au sein de la filière	7
I2. Contexte scientifique.....	8
II. Disposer d'outils objectifs de mesure de la qualité de la viande et de la carcasse de lapin.....	9
II1. Cisaillement de Warner Bratzler	9
II2. Test de flexion en 3 points	10
II.3 Comportement mécanique de la jonction tendino-osseuse par étirement passif	11
II4. Aptitude des méthodes physico-chimiques à discriminer les lots de lapins et relation avec les analyses sensorielles.....	12
III. Evaluation de l'impact des facteurs d'élevage sur la qualité de la carcasse et de la viande ..	14
III1. Effet de l'âge.....	15
III2. Facteur génétique : 2 lignées sélectionnées sur le poids à 63 jours	15
III3. Facteurs alimentaires : enrichissement en luzerne de la ration et valeur nutritionnelle de la viande de lapin.....	17
III4. Logement des animaux et impact de l'exercice physique.....	19
IV. Bilan de mes activités de recherches sur la qualité de la viande et de la carcasse	21
Partie 2. Caractérisation de l'écosystème cæcal en relation avec la nutrition et la santé digestive du lapin.....	23
I. Enjeux socio économiques et contexte scientifique	23
I1. Les enjeux socio économiques	23
I2. Contexte scientifique.....	24
II. Diversité de l'écosystème digestif du lapin	25
III. Structuration de la communauté microbienne.....	28
III2. Structuration spatiale de la communauté microbienne	28
III2. Structuration temporelle de la communauté microbienne	29
III3. Structuration intra et inter individus de la communauté microbienne	29
IV. Implantation du microbiote et succession écologique des espèces.....	30
V. Réponses des communautés microbiennes à une perturbation	31
VI. Conclusion sur les connaissances acquises.....	31
Partie 3. Perspectives de recherches : L'ingénierie écologique de l'écosystème digestif du lapin : une solution pour limiter les intrants médicamenteux, et améliorer la santé et l'efficacité digestives	33
I. L'ingénierie écologique des écosystèmes digestifs selon 3 voies d'approche	33
I1. Orienter précocement le microbiote	33
I2. Modulation de l'activité de l'écosystème digestif mature.....	34
I3. Agir sur les interactions avec l'hôte	34
II. Les outils pour l'ingénierie écologique.....	35
II1. L'alimentation.....	35
II3. Implantation d'une communauté microbienne complexe ou déplacement d'équilibre des populations.....	37

III. Hypothèse d'une optimisation de la mise en place et du fonctionnement du système immunitaire par le contrôle de la succession écologique des espèces via une alimentation précoce	37
C. Actions d'animations de formation et de valorisation.....	39
D. Conclusion générale.....	41
E. Références bibliographiques	43
F. Formation par et pour la Recherche.....	48
I. Encadrement	48
Diplôme de premier cycle	48
Diplôme de deuxième cycle	48
Accueil de doctorant étranger.....	48
Accueil de post-doctorant	48
II. Co-encadrement.....	49
Diplôme de deuxième cycle	49
Diplôme de troisième cycle	49
G. Listes des travaux	50
I. Publications scientifiques	50
I1. Articles primaires dans des périodiques à comité de lecture	50
I2. Synthèses publiées dans des périodiques à comité de lecture.....	52
I3. Communications présentées en congrès	53
I4. Synthèses publiées dans des congrès ou des symposium.....	58
II. Rapports diplômants	58
III. Documents à vocation de transfert.....	58
III.1 Travaux personnels dans des périodiques sans comité de lecture	58
III 2. Rapports écrits.....	59
Annexe : Publications choisies (abstract).....	60

A. Curriculum Vitae

COMBES Sylvie (née SCHNOEBELEN)

Née le 24 août 1969 à Mulhouse (Haut-Rhin)

Domiciliée 1, impasse Clos Valette, 31450 POMPERTUZAT

Mariée, 3 enfants

Diplômes

- 1996 Thèse de Doctorat de l'ENSAR, spécialité Biologie et Agronomie (mention Très Honorable avec Félicitations du jury).
- - 1993 DEA de Biologie et Agronomie, Université de Rennes I (mention Très Bien).
- - 1992 Ingénieur ENSFA (Ecole Nationale Supérieure Féminine d'Agronomie) Rennes.

Formations complémentaires

- 2000 Formation à l'expérimentation animale, niveau I (ENV Toulouse)
- 2006 Unité d'enseignement L3 Biologie Moléculaire : 30 h (Université Paul Sabatier Toulouse)
- 2006 Unité d'enseignement L3 Microbiologie Générale : 30 h (Université Paul Sabatier Toulouse)
- 2006 Ecole Chercheur Phylogénomique : 5 j (INRA / Carry le Rouet)
- 2008 Ecole Thématique Ecologie, diversité et fonctionnement : 5j (INRA / Alénia)
- 2009 Ecole Chercheur Aliment et microflore : 21h (INRA / Loges les Josas)
- 2010 Ecole Chercheur : Métaprogramme "Métagénomique des écosystèmes microbiens" : 30h (INRA / Paris)
- 2012 Statistiques appliquées aux données haut débit post génomique : 4j (INRA GenoToul /Toulouse)

Cursus professionnel

- 1992 Stage ingénieur à la Station de Recherches Porcines (INRA Rennes)
- 1993 Stage de DEA à la Station de Recherches Porcines (INRA Rennes) et Université de Tübingen (Allemagne)
- 1993-1996 Travail de thèse à la Station de Recherches Porcines (INRA Rennes)
- 1997-1999 Ingénieur conseil en production animale spécialisée dans le développement et le suivi des élevages de diversification. Chambre d'Agriculture du Tarn et Garonne
- 1999 Ingénieur de recherches 1^{ère} classe, affectée à la Station de Recherches Cunicoles (INRA Toulouse)

Thématiques de recherche

De 1999 à 2006

Objectif général : Influence des conditions d'élevage sur la qualité de la carcasse et de la viande de lapin

Techniques utilisées : pHmétrie, rhéologie (cisaillement de Warner Bratzler, test de flexion en 3 points, étirement passif), ToBEC (mesure de la conductivité), dosage biochimique, mesures de paramètre de qualité de carcasses

Depuis 2007

Objectif général : Caractérisation de l'écosystème cœcal en relation avec la nutrition et la santé digestive du lapin

Techniques utilisées : mesures biochimiques, extraction ADN, PCR-SSCP, PCR en temps réel, pyroséquençage gènes ARN 16S

Productions scientifiques et techniques

- Articles originaux : 39
- Communications à des congrès : 78
- Articles de synthèse : 8
- Articles de vulgarisation : 7
- Rapports de contrat de recherche : 2

Animation scientifique et administration de la recherche

Animation collective de la recherche

- Responsable de l'équipe NED (Nutrition et Ecosystèmes Digestifs composés de 7 scientifiques et 6 personnels techniques) au sein de l'UMR1388 GenPhySE (depuis 2014)
- Membre du comité scientifique des Journées de la Recherche Cunicole (2003 -2007)
- Membre suppléant du conseil scientifique du département ENA (2002-2006)
- Membre du comité de suivi du Plan de Déplacement d'Administration (PDA, depuis 2007)
- Membre élu du conseil de gestion de centre (depuis 2007)
- Membre nommé du conseil de gestion de département (depuis 2011)
- Responsable informatique 2000-2005
- Participation à un jury de concours AI (2004)

Participation et gestion de programmes et de contrats de recherche

- Action européenne COST848 2000-2004 (participation) «Meat quality and safety in rabbit» (1998-2004, coordinateur: L. Maertens)
- Projet AQS 2000-2003 (responsable scientifique) : Aptitudes des méthodes physico-chimiques rapides à évaluer les qualités sensorielles de la viande de lapin
- Contrat SNDF C31094 2005 (responsable scientifique) : Influence du taux d'incorporation de la luzerne dans la ration sur la qualité des carcasses et la composition en acides gras de la viande de lapin

Participation à des commissions et associations scientifiques

- Membres de la commission de normalisation pour l'élaboration de la Norme NF V47-001 Viandes de lapin : Production et transformation de lapin de chair domestique (2004)
- Membre de l'Association Scientifique Française de Cuniculture (depuis 2007), et de l'Association Francophone d'Ecologie Microbienne (depuis 2007)

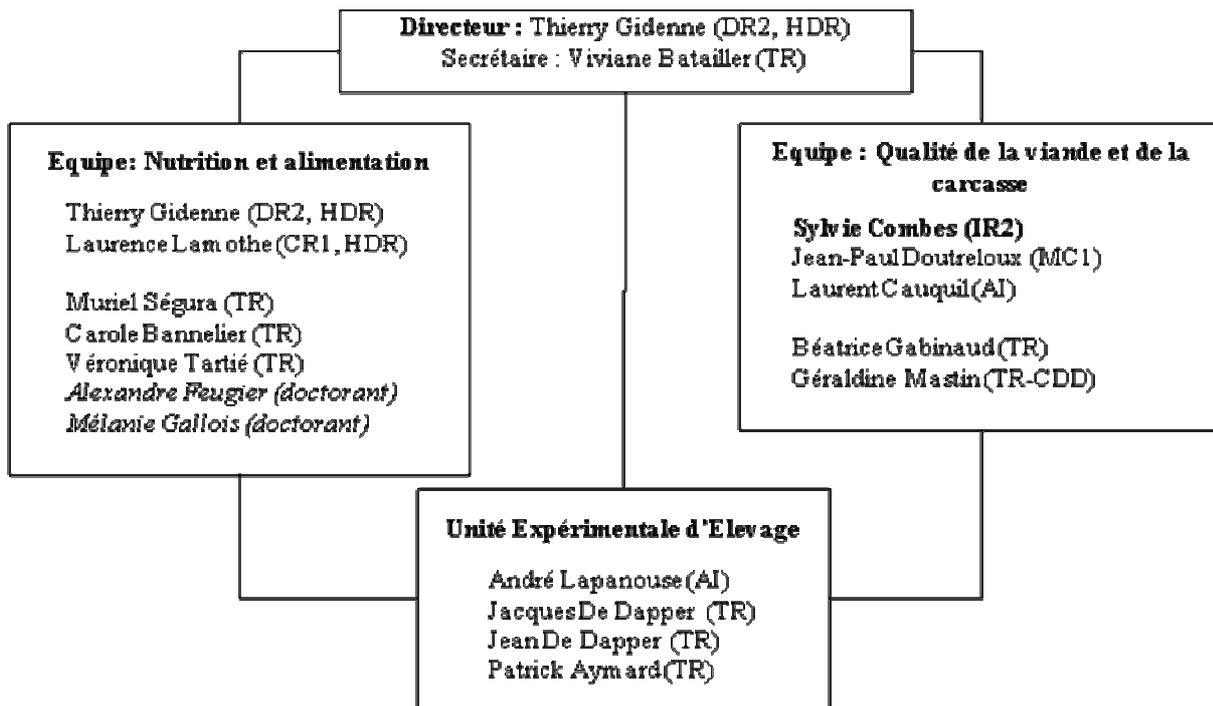


Figure 1: Organigramme de la Station de Recherches Cunicoles (SRC) en 2006

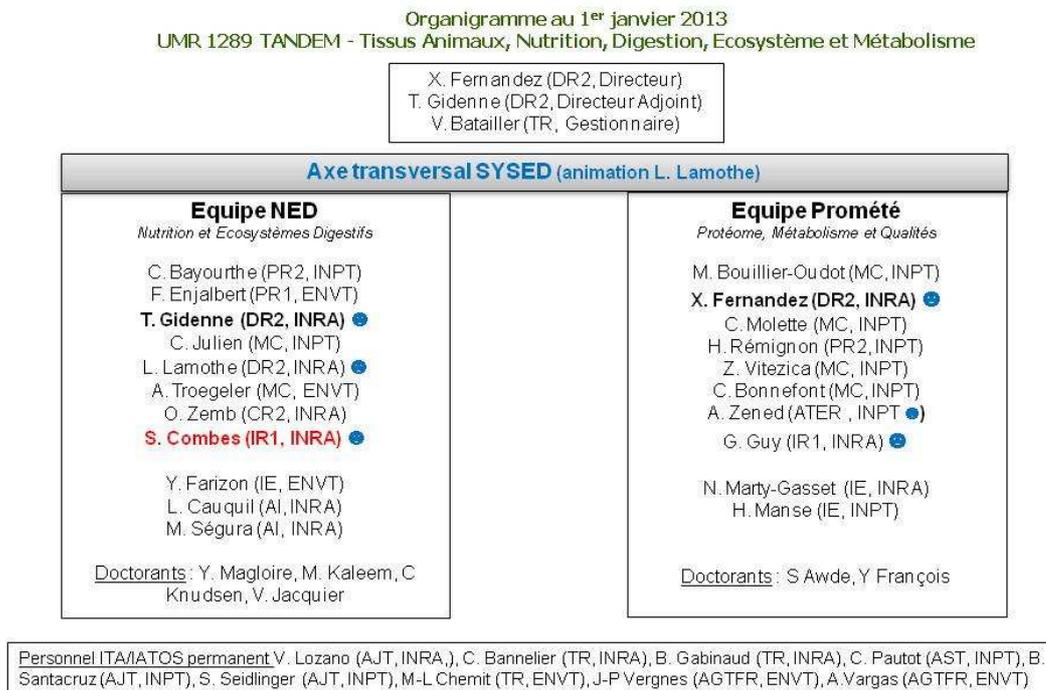


Figure 2 : Organigramme de l'UMR1289 TANDEM (Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme) en 2013

B. Mes deux thématiques de recherches successives

Depuis mon recrutement à l'INRA en tant qu'ingénieur de recherche en 1999, j'ai abordé deux thèmes de recherches:

- De 1999 à 2006 : **Influence des conditions d'élevage sur de la qualité de la carcasse et de la viande de lapin** au sein de la Station de Recherches Cunicoles
- Depuis 2007 : **Caractérisation de l'écosystème cæcal en relation avec la nutrition et la santé digestive du lapin** au sein de l'UMR TANDEM (Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystèmes et Métabolisme)

Ce changement thématique coïncide avec la première restructuration de mon unité de recherches, il a également été le résultat d'un choix personnel. Plusieurs raisons ont motivé mon choix :

- D'une part l'analyse des **priorités thématiques au sein de la filière cunicole** combinée à la réduction des effectifs de chercheurs travaillant en relation avec la filière cunicole. En effet, la viande de lapin ne connaît pas de défaut majeur qui entraverait le développement de la filière. A l'inverse, la réussite des ateliers cunicoles est largement dépendante de la santé des animaux. Cependant, les mécanismes impliqués dans la préservation de la santé digestive restent non identifiés. L'enjeu est donc de mieux comprendre le fonctionnement et l'implication de l'écosystème cæcal, siège des fermentations digestives, dans la résistance aux troubles digestifs.
- D'autre part **l'aspect novateur de la thématique chez le lapin**. L'étude de l'écosystème cæcal bien qu'à priori centrale dans la compréhension de l'apparition des troubles digestifs chez le lapereau au moment du sevrage, n'avait fait l'objet que de très peu de travaux de recherche (une seule équipe espagnole). Les études ont porté essentiellement sur la caractérisation du biotope et non du microbiote.
- Enfin l'aspect **novateur d'un point de vue technique**. Les techniques culturales mises au point à ce jour, ne permettent d'appréhender que 10 à 20 % de la communauté microbienne des écosystèmes digestifs. Ainsi, l'acquisition d'information sur le microbiote ne peut se faire que par l'utilisation d'outils de microbiologie moléculaire dont l'émergence et l'accessibilité sont relativement récentes et dont les évolutions techniques ne cessent de s'accélérer.

Dans ce mémoire, je ferai dans une première partie, un bilan de mes activités de recherches sur **la qualité de la viande et de la carcasse chez le lapin**. Aidée de deux collaborateurs, D. Delmas (IE) puis L. Cauquil (AI) et de B. Gabinaud (TR), nous réalisons l'ensemble des travaux menés sur cette thématique au sein de la Station de Recherches Cunicoles, dirigée par F. Lebas puis T. Gidenne (figure 1). Dans une deuxième partie, je développerai le bilan de mes activités de recherches consacrées à la **caractérisation de l'écosystème cæcal en relation avec la nutrition et la santé digestive du lapin**. Dans ce cadre, j'ai bénéficié de l'environnement scientifique d'une équipe de nutritionnistes spécialisés dans la physiologie digestive et dirigé par T. Gidenne (création de l'équipe NED, figure 2). Enfin, je décrirai les perspectives de recherches associées à **l'ingénierie écologique de l'écosystème digestif du lapin** qui font partie intégrante du projet de recherche de l'équipe NED que j'anime pour 5 ans, depuis son intégration dans une nouvelle unité UMR1388 GenPhySE (Génétique, Physiologie et Système d'Élevage).

Partie 1. Influence des facteurs d'élevage sur la qualité de la viande de lapin

L'objectif général de mon programme de recherche **était l'étude de l'impact des facteurs d'élevage sur les caractéristiques quantitatives et qualitatives de la viande et de la carcasse de lapin**. Une première partie de mon travail avait pour objectif d'adapter aux particularités de l'espèce lapin les mesures physico-chimiques de la qualité de la viande classiquement utilisées dans les autres espèces (porc, bovin). Puis, d'évaluer l'impact des différents paramètres d'élevage sur les caractéristiques de la viande et de la carcasse.

I. Contexte

I1. Contexte au sein de la filière

Ces travaux s'inscrivaient déjà dans un courant de désaffection de la consommation pour les viandes en général, la consommation du lapin ne faisant pas exception. Face à cette situation, les acteurs de la filière de production cherchaient à diversifier l'offre d'une part avec des produits commercialisés sous signe de qualité (Certificat de Conformité Produit [CCP], label, production Agriculture Biologique ou cahier des charges privés...) et d'autre part avec des produits un peu plus élaborés qu'une carcasse entière. En effet, la transformation des modes de consommation se traduit par une attractivité toujours plus forte en direction des produits élaborés et surgelés plus pratiques et rapides à préparer au détriment des produits bruts. Comme en témoigne le développement de la découpe (figure 3) au détriment des ventes de carcasse entière (Le Cren, 2006).

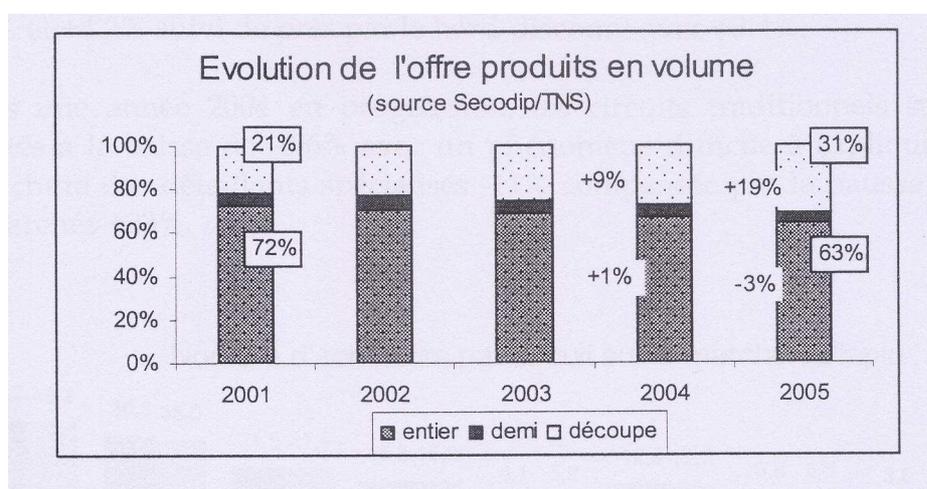


Figure 3 : Evolution de l'offre des produits (carcasse entière, demi carcasse et découpe) entre 2001 et 2005 (selon Le Cren, 2006).

Par ailleurs, il n'existe pas de défaut majeur à la viande de lapin (Ouhayoun, 1988, Ouhayoun, *et al.*, 1989, Ouhayoun, 1990, Ouhayoun, *et al.*, 1990). Ainsi, les syndromes de viande dures et rouges (DFD) ou pâles, molles et exudatives (PSE) et de contracture au froid n'ont jamais été rapportés par les intervenants de la filière. A l'inverse, le caractère hétérogène des poids et formats des carcasses de lapin a fait l'objet de discussions. Ce phénomène s'est d'autant plus accentué que les

systèmes d'élevage « tout vide, tout plein » en bande unique se développaient. Les lapins sont enlevés au même âge quel que soit leur poids. Si le caractère hétérogène des lots est une constatation, ce n'est pas un réel problème, car l'abatteur utilise cette variabilité pour répartir les carcasses entre différentes voies de transformation : vente en carcasse entière ou demi et découpe. La viande de lapin est un produit standard dont les qualités satisfont le consommateur régulier constitué principalement de couples seniors et de foyers aisés. Ces consommateurs sont qualifiés par le Secodip/TNS comme des ménages qui « privilégient la vie traditionnelle à la maison, pour qui la cuisine reste une valeur clé » (Le Cren, 2006).

L'enjeu pour la filière de lapin était et est, de conserver le consommateur traditionnel mais également de séduire une nouvelle clientèle plus jeune. Selon une étude réalisée par l'OFIVAL en 2005, le lapin apparaît au consommateur potentiel particulièrement compliqué à préparer et à consommer. En revanche deux atouts sont évoqués : la typicité du goût et la valeur diététique. Il s'agit donc de diversifier l'offre notamment en proposant de nouveaux produits plus adaptés à la jeune clientèle mais également en modifiant les conditions de productions dans le but de valoriser certaines caractéristiques d'élevage. Cette évolution du marché s'est traduite par une demande de plus en plus pressante de la filière de connaissances et d'informations : d'une part sur les facteurs d'élevage susceptibles de modifier de manière sensible la qualité du produit afin de pouvoir proposer des produits différents; et d'autre part sur les qualités intrinsèques du produit afin de le valoriser et de le faire connaître auprès des consommateurs.

I2. Contexte scientifique

Les travaux disponibles, lors de ma prise de fonction, concernaient essentiellement des mesures de qualité des carcasses (poids, rendement, adiposité) et de composition chimique de la viande (teneur en lipides, eau, protéines et cendre) (Ouhayoun, 1989). Des travaux concernant le typage histologique des différents muscles de la carcasse (Dalle Zotte & Ouhayoun, 1995, Dalle Zotte, *et al.*, 1996), les grandes étapes de la maturation des fibres musculaires (Gondret, *et al.*, 1996) et l'évolution avec l'âge des lipides intramusculaires chez le lapin (Gondret, *et al.*, 1998) avaient également été effectués. Les facteurs d'élevage étudiés correspondaient majoritairement à l'alimentation, l'âge et le poids d'abattage. Ces travaux avaient ainsi permis de définir l'âge optimal d'abattage fonction des allométries de croissance respectives des tissus musculaires et adipeux. La communauté scientifique internationale travaillant sur la qualité du produit chez le lapin, avait en 1993 publié des recommandations pour la standardisation des critères de mesures de qualité de la carcasse (Blasco & Ouhayoun, 1993). Ces recommandations avaient pour but d'harmoniser les pratiques et de proposer une terminologie commune. Elles portaient sur la description des critères de croissance et d'élevage, les traitements péri- mortem et surtout elles donnaient une définition claire de la composition de la carcasse de référence. A l'inverse, l'appréciation de la qualité de la viande par des méthodes physico-chimiques objectives avait été beaucoup moins abordée (Ouhayoun & Dalle Zotte, 1996). J'ai donc cherché à adapter les techniques de mesures physico-chimiques de la viande aux particularités de l'espèce lapin, particularités essentiellement liées à la taille de l'animal. Mon travail de recherches sur la qualité de la viande peut être qualifié de « recherches appliquées » dans la mesure où il s'agissait avant tout de bâtir des programmes qui répondaient pleinement aux attentes exprimées des acteurs de la filière cunicole.

II. Disposer d'outils objectifs de mesure de la qualité de la viande et de la carcasse de lapin

Parmi les méthodes de mesure de la qualité de la viande que j'ai développée, je présenterai dans ce mémoire les méthodes rhéologiques. En effet, ces méthodes d'étude du comportement mécanique des tissus présentent l'avantage d'être rapides de mise en œuvre, peu coûteuses car sans réactif et facilement transposables dans les conditions d'un abattoir industriel. Les méthodes développées permettaient d'étudier le comportement mécanique de la viande (cisaillement de Warner-Bratzler et étirement passif), des os (test de flexion en 3 points) et des jonctions tendino-osseuses (étirement passif).

II.1. Cisaillement de Warner Bratzler

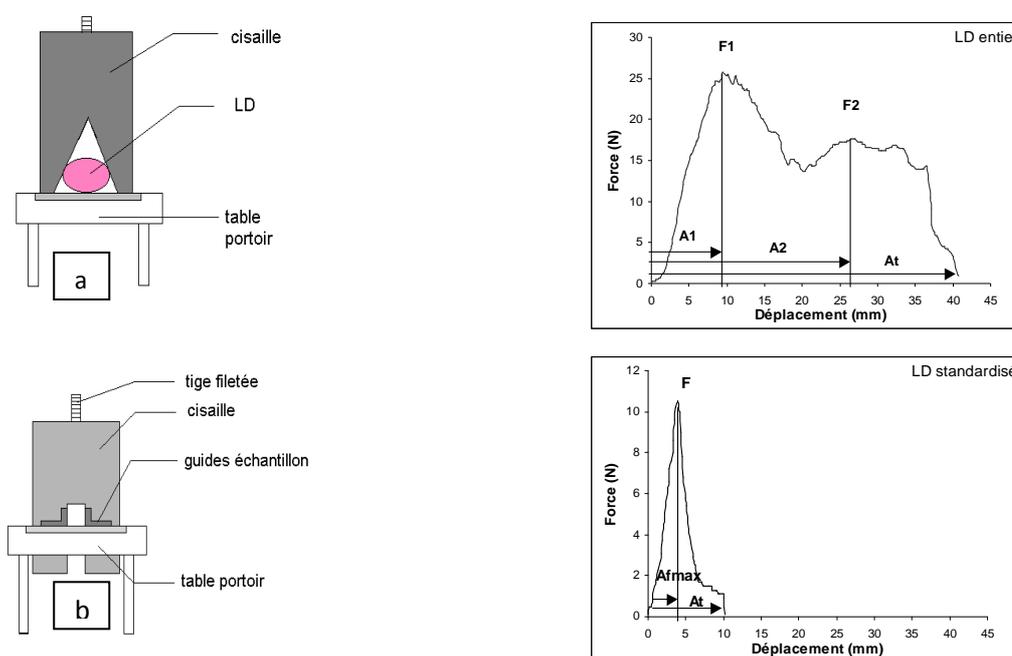


Figure 4 : Schéma des dispositifs et courbes types pour la mesure de cisaillement par le test de Warner Bratzler sur le muscle *Longissimus dorsi* (LD) entier (a) ou sur échantillon standardisé (b) [C10].

La texture de la viande et plus particulièrement sa tendreté constitue une composante importante des qualités organoleptiques de la viande. La tendreté peut se définir comme la facilité avec laquelle le consommateur déstructure la viande pendant la mastication (Lepetit & Culioli, 1994). Cette tendreté est donc directement dépendante des caractéristiques mécaniques de la viande. Bien qu'il soit difficile de réduire cette perception multidimensionnelle à un simple test mécanique, la méthode de Warner Bratzler (WB) est la plus couramment utilisée et présente une corrélation acceptable avec les tests sensoriels (Lepetit & Culioli, 1994, Peachey, *et al.*, 2002). J'ai choisi d'adapter cette technique à l'étude de la tendreté de la viande de lapin en partenariat avec J. Lepetit (Station de Recherches sur la Viande, département CEPIA de l'INRA). Pour des raisons de quantité de matériel nécessaire à l'analyse et de représentativité du muscle au sein de la carcasse de lapin, ces mesures sont réalisées sur le muscle *Longissimus dorsi*. Dans les autres espèces de type bovin, ovin ou porcin où la quantité de muscle disponible n'est pas un facteur limitant, les tests de WB sont effectués sur un grand nombre d'échantillons standardisés en parallélépipèdes

rectangles de 1 cm² de section et de 3 cm de longueur (Honikel, 1998) et sur différents muscles de la carcasse (figure 4b). Pour des raisons pratiques (quantité de muscle disponible) et de rapidité de mise en œuvre, nous avons en plus de la méthode précédemment exposée, également cherché à mettre au point une technique de cisaillement de muscle LD entier (figure 4a). Ces deux techniques ont été testées sur échantillon frais et congelé, cuit ou cru et sur les différents modèles que nous avons étudiés (tableau 1).

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des principaux résultats de cisaillement Warner Bratzler sur le muscle *Longissimus dorsi* entier (E) ou sur éprouvette standardisée (S) de *Longissimus dorsi*

Facteurs de variation	méthode	Résultats	Publication
Congélation /frais	E	La congélation augmente la variabilité de la mesure	[C10]
Standardisé/entier	E+S	variabilité intra échantillon E<S	[C10]
Effet temps et température de cuisson	E + S	Même évolution	[A7 ; C1]
Relation analyse sensorielle	E	R=-0.58 tendreté sensorielle et paramètre de cisaillement sur muscle cru	[A13]
Logement	E+S	Aucun effet du logement sur les 2 méthodes	[C21 ; A21]
Bio vs standard	S	Effet sexe+ effet élevage	[C19; C20]
Discrimination système de production	E	3ème variable retenue pour la discrimination	[A12]
Label vs Standard	S	Lapin standard plus tendre que Label	[C8]
Sélection génétique sur le poids à 63 jours	E + S	Tendreté plus élevée chez les lapins à croissance rapide avec les 2 méthodes	[A9 ; A10]

En l'absence de recommandation sur les modalités de cuisson de la viande de lapin pour la réalisation des tests de cisaillement, j'ai étudié l'évolution de la tendreté en fonction de la température et du temps de cuisson. Cette étude a permis de montrer l'importance du contrôle de la température et du temps de cuisson sur les paramètres de la tendreté mécanique (figure 5) et un couple temps/température optimal a pu être défini [A7] (40 minutes / 80°C). Dans ce cadre nous avons également dosé la teneur en collagène totale et soluble et montré la forte solubilité du collagène de lapins (taux de solubilité de 75%).

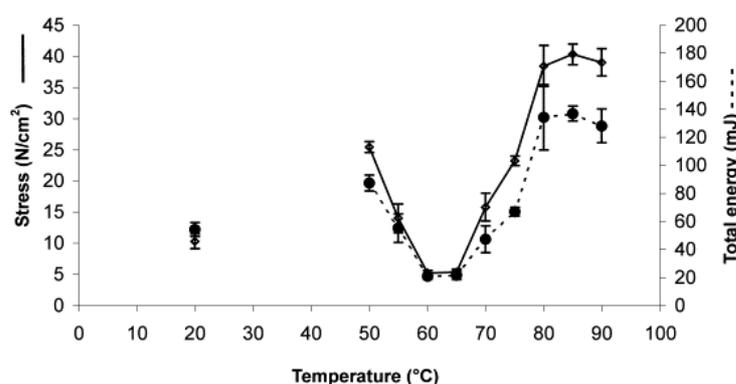


Figure 5 : Evolution de la tendreté mécanique en fonction de la température de cuisson

II.2. Test de flexion en 3 points

Au moment de l'accrochage ou lors du dépouillage, les forces exercées sur la carcasse peuvent briser le tibia. La présentation de la cuisse s'en trouve ainsi dépréciée. Basé sur des travaux réalisés chez le poulet (Leterrier & Nys, 1992), nous avons mis au point, en collaboration avec A. Auvergne de l'équipe de zootechnie de l'ENSAT, le test de flexion en trois points pour le lapin afin de vérifier

si les paramètres d'élevage et notamment le rajeunissement de l'âge à l'abattage, avaient une influence sur cette fragilité osseuse. Les os reposent sur 2 points d'appui distants et sont fléchis en leur milieu par la descente à une vitesse constante d'un troisième appui. Cette mesure qui, au premier abord, peut paraître éloignée de la mesure de la qualité de la viande s'est révélé être un indicateur de l'âge (figure 6) et de la maturité des animaux (rapport entre le poids d'abattage et le poids adulte). Elle permet ainsi la discrimination des lots en fonction de leur vitesse de croissance [A9] ou de leur mode d'élevage [A12]. Ces mesures enfin ne subissent aucune interaction avec les conditions peri-mortem [C38].

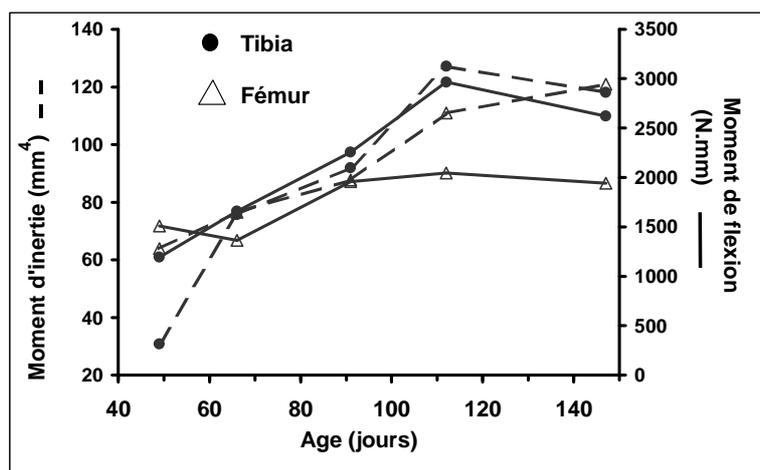


Figure 6 : Evolution avec l'âge des moments d'inertie et de flexion pour le fémur et le tibia des lapins (n=10/âge) [C2]

II.3 Comportement mécanique de la jonction tendino-osseuse par étirement passif

Lors de la transformation ou de la consommation de viande, les professionnels et les consommateurs rapportent un défaut de cohésion des muscles à l'os, ce qui déprécie les morceaux de découpe ou les plats cuisinés. Ce défaut concerne surtout les espèces de petites tailles dont on consomme un membre entier (cuisse ou avant). Afin de disposer d'une mesure objective de cette observation, j'ai mis au point un test d'étirement passif de la jonction tendino-osseuse chez le lapin. C'est dans ce cadre que j'ai initié des collaborations entre 4 partenaires : 1 enseignant chercheur de l'ENSAT, 1 chercheur de l'ENSAT, 1 enseignant chercheur de l'Université Paul Sabatier (UFR STAPS) et 1 chercheur de SENAH. Nous nous sommes appuyés sur des services extérieurs à l'INRA pour la réalisation ou l'apprentissage de certaines techniques : Laboratoire d'anatomie et de pathologie du CHU Rangueil, et Laboratoire de Biomécanique INSERM CHU Purpan.

Une première étude a permis d'identifier les sites anatomiques utilisables, il s'agit : 1)- de l'insertion du tendon d'Achille sur le calcaneum, 2)- du ligament rotulien sur la rotule et 3)- du tendon du *Semimembranosus proprius* sur l'os du tibia. En collaboration avec le service d'anatomie et de pathologie du CHU de Rangueil, nous avons analysé des coupes histologiques de la jonction tendino-osseuse (enthèse) des 3 sites retenus ainsi que des tendons impliqués. Le comportement mécanique des 3 jonctions tendino-osseuses a été déterminé après cuisson, les tests d'étirement passif ont été réalisés à l'aide d'une colonne de traction-compression. Les parties osseuses sont maintenues fixes, tandis que les extrémités des tendons préalablement refroidies à l'azote liquide

sont pincées dans un mors mobile monté sur rotule et relié au capteur de force. Cette technique a été appliquée dans le cadre d'une étude visant à étudier les effets de l'exercice physique sur la qualité de la carcasse et de la viande, le comportement mécanique et les caractéristiques morphométriques, biochimiques et histologiques de l'enthèse [A17]. Cette technique a par la suite été adaptée au poulet dans le cadre d'une thèse dirigée par H. Rémignon au sein de l'équipe de zootechnie de l'ENSAT (Moussa, *et al.*, 2007).

II4. Aptitude des méthodes physico-chimiques à discriminer les lots de lapins et relation avec les analyses sensorielles

Suite à ce travail de recherche de mesures objectives des caractéristiques de la viande et de la carcasse de lapin, il s'agissait dans un second temps d'évaluer l'aptitude de chacune de ces mesures à rendre compte des modifications qualitatives ou quantitatives de la viande et de la carcasse de lapin. C'est dans cet objectif que j'ai conçu et dirigé un programme AQS (1999-2003), en collaboration avec F. Lebas, avec un partenaire de la filière (abatteur) et des chercheurs (INRA SAGA, INRA Magneraud, ITAVI). Il s'agissait de tester des méthodes physico-chimiques rapides, peu coûteuses et transposables dans un atelier d'abattage ou de découpe. L'une des finalités était de pouvoir distinguer les viandes en fonction du mode d'élevage à l'aide des méthodes objectives (mesure poids carcasse et découpe, cisaillement du muscle, test de flexion en 3 points, réflectance, TOBEC, pHmétrie, capacité de rétention en eau). Pour cela nous avons utilisé des lapins issus de 3 systèmes de production susceptibles de générer une variation qualitative et quantitative de la viande et de la carcasse (rapport [G1]).

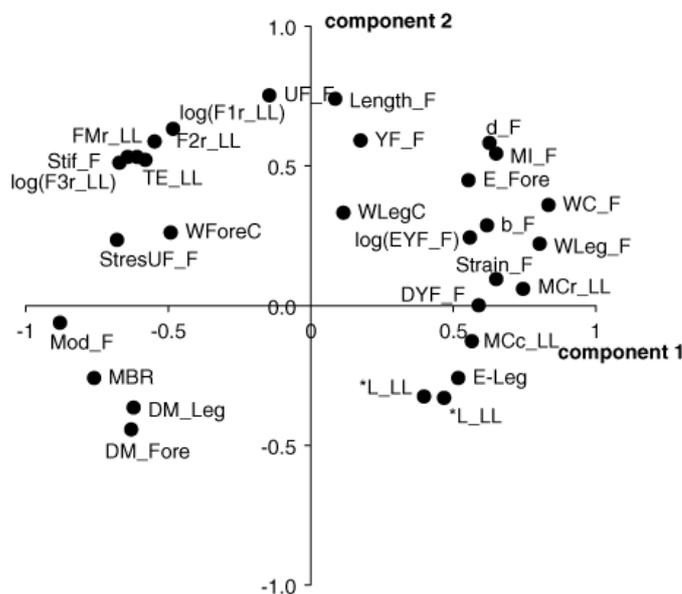


Figure 7 : Projection sur le plan défini par les deux premières composantes principales des 30 variables physicochimiques (sélectionnées sur la base $R^2 > 0,18$ $p < 0,001$ pour l'effet lot) utilisées pour la construction du système de discrimination de 3 lots de lapins [A12]

Nous avons généré un ensemble de 63 variables que nous avons classées en fonction de leur capacité à discriminer les lots (figure 7). Des paramètres tels que le pHu, la capacité de rétention en eau et les paramètres de test de cisaillement sur LD cuit ne permettaient pas de discriminer les lots. A l'inverse, les caractéristiques mécaniques (test de flexion en 3 points) et morphologique des

os et les caractéristiques mécaniques du LD cru (cisaillement de WB) permettait d'expliquer une grande part de la variabilité (figure 7). L'utilisation de l'analyse linéaire discriminante (LDA) et la technique des arbres de décision a permis la construction 2 systèmes de discrimination (figure 8). Si le système obtenu par LDA présentait les meilleures performances (96 % de classement correct vs 90 %) le système calculé par arbre de décision était plus simple d'utilisation. En effet pour discriminer les 3 lots dans le système de l'arbre de décision, seules deux variables sont nécessaires contre 14 pour le système LDA [A12].

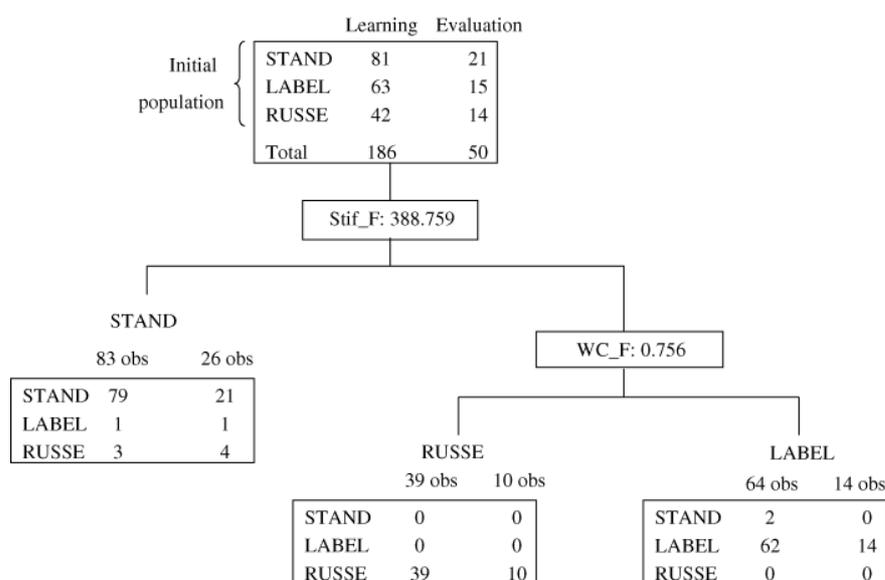


Figure 8 : Arbre de décision calculé sur un jeu de données d'apprentissage (« Learning » : colonne de gauche) et sur un jeu de données d'évaluation (« Evaluation » : colonne de droite) [A12]

Afin d'étudier les relations entre les paramètres physico-chimiques et les paramètres sensoriels mesurés par un jury entraîné, j'ai initié une collaboration avec S. Dejean de l'institut de Mathématiques de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Chez le lapin les travaux concernant les relations entre ces deux types de paramètres se limitait à une seule étude (Hernandez, *et al.*, 2000). Ce travail, utilisant l'analyse en composante principale, montrait que les deux types de paramètres, sensoriels et physico-chimiques participaient à l'explication de la variabilité observée sans pour autant parvenir à trouver une relation entre eux. Nous avons exploité les données par analyse des corrélations canoniques (CCA). Cette méthode statistique multidimensionnelle permet d'étudier les relations linéaires entre deux jeux de données de nature différente (sensorielle d'une part et physico-chimique d'autre part) mesurées sur les mêmes individus. Il s'agit ici de maximiser les corrélations entre une combinaison linéaire de variables du premier jeu de données avec une combinaison linéaire de variables issues du second jeu de données (Gittins, 1985). Ce travail a été réalisé en utilisant le package développé sous le logiciel R (<http://cran.r-project.org/>) par l'équipe de l'UMR 5219 CNRS (Gonzalez, *et al.*, 2008).

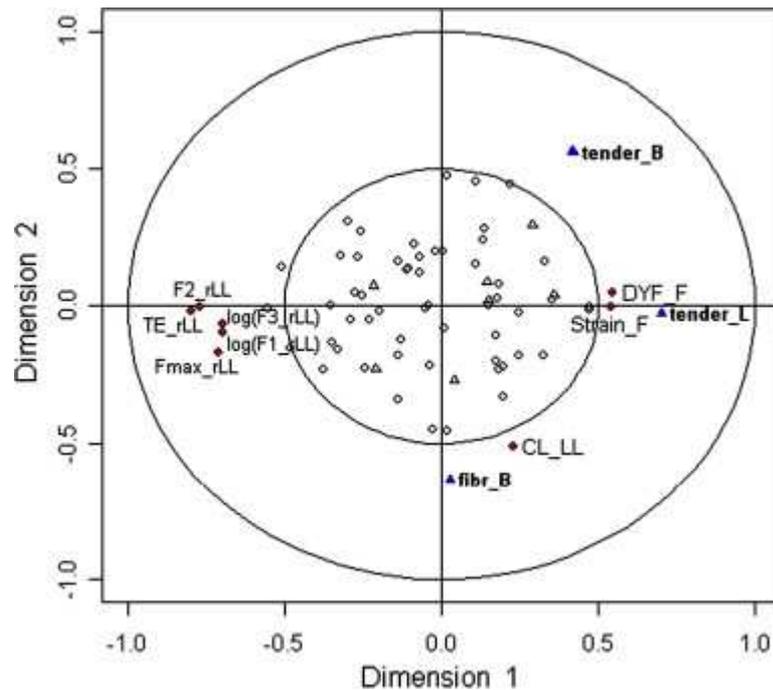


Figure 9: Représentation sur le plan défini par les deux premières variables canoniques des variables sensorielles (triangle) et physico-chimiques (losange). Les variables à l'extérieur du petit cercle central sont corrélées entre elles [A13].

L'analyse par corrélation canonique a permis de montrer pour la première fois chez le lapin (figure 9), qu'il existait des corrélations entre les données sensorielles et les données physico-chimiques ($R^2 = 0,73$ and $0,68$ entre les deux premières paires de variables canoniques) [A13]. La tendreté sensorielle perçue dans la cuisse ou le râble est ainsi corrélée aux paramètres de cisaillement de WB dans le muscle *Longissimus dorsi* cru. De même l'aspect fibreux de la viande est corrélé à la perte de jus à la cuisson.

III. Evaluation de l'impact des facteurs d'élevage sur la qualité de la carcasse et de la viande

Pour contrer, la diminution régulière de la demande, les acteurs de la filière se sont lancés dans une démarche de segmentation du marché de la viande de lapin. De nouveaux produits se sont développés tels les lapins certifiés ou Labels. Bien que la production de lapin dite standard représentait près des $\frac{3}{4}$ des volumes, les productions Certifiées (CCP) ou sous cahier des charges privés gagnaient du terrain (Braine, 2006). En revanche les productions Label restaient à l'état de niche, actuellement il n'existe plus qu'un réseau actif. Si la production de lapins différenciés pouvait répondre à une demande des consommateurs encore fallait-il maîtriser les facteurs majeurs de variation de cette qualité. Parmi les différents facteurs, je me suis plus particulièrement intéressée à l'effet de l'âge, de la génétique, qui sont considérés comme des facteurs ayant une forte influence sur la qualité de la viande tel que pourrait le percevoir le consommateur (Dalle Zotte, 2002). La prise en compte du bien-être des animaux d'une part et la recherche d'une adéquation entre le mode de production et l'image que s'en fait le consommateur, ont conduit les professionnels à rechercher des alternatives aux modes de logement conventionnels. C'est pourquoi j'ai également travaillé sur l'influence du logement et de l'exercice sur la qualité de la viande et de la carcasse. Enfin l'argument « aliment santé » devenant

un nouvel argument commercial, des demandes de la filière concernant la qualité nutritionnelle de la viande de lapin sont apparues. En réponse à cette demande, j'ai réalisé la première synthèse sur ce sujet [B2] et nous avons étudié les modalités d'enrichissement de la viande de lapin en oméga 3.

III1. Effet de l'âge

Durant la croissance, les tissus de l'animal ne présentent pas la même allométrie de croissance (Cantier, *et al.*, 1969). De ce fait la carcasse et la qualité de la viande évolue fortement au cours de la croissance. Ainsi avec l'élévation de l'âge et du poids le rendement en carcasse augmente régulièrement jusqu'à 90 jours – 98 jours (Dalle Zotte & Ouhayoun, 1995, Jehl & Juin, 1999). A âge égal, le rendement d'abattage est d'autant plus élevé que les lapins sont abattus plus lourds (Roiron, *et al.*, 1992). A poids égal d'abattage, les lapins les plus jeunes ont des performances de croissance supérieures, mais un rendement en carcasse inférieur (Cabanes-Roiron & Ouhayoun, 1994). Fort de cette observation, nous avons étudié l'influence de l'âge avec deux objectifs complémentaires. Le premier à des fins exploratoires de compréhension de la croissance (évolution simultanée de l'âge et du poids), le second en relation avec la problématique de précocité de croissance dans le cadre d'une expérience de sélection divergente (effet de l'âge à poids fixé, voir paragraphe III2.). D'une manière générale, l'âge est l'un des principaux facteurs distinguant les lapins standards et ceux produits sous signe de qualité. C'est donc un des facteurs sur lequel nous avons porté nos efforts.

En collaboration avec J.P. Doutréoux, maître de conférences à l'université Paul Sabatier (UFR Sciences et Techniques des Activités physiques et Sportives), nous avons mis en place des études exploratoires communes de l'effet de l'âge avec un objectif triple : **1)** décrire l'évolution des résistances à l'étirement passif des muscles au cours du développement en relation avec l'architecture du muscle; **2)** établir l'évolution de la tendreté mécanique du muscle *Longissimus dorsi* cru et cuit en relation avec sa teneur en collagène; et enfin **3)** décrire les propriétés mécaniques des os aux stades entourant l'âge d'abattage classique des lapins.

La résistance à la rupture de tous les muscles étudiés augmente avec l'âge [A8]. En parallèle, la teneur en collagène s'accroît en fonction de l'âge dans les muscles *Extensor digitorum longus* et *Rectus femoris*, mais décroît dans le *Semimembranosus proprius*, le *Psoas* et dans le *Longissimus dorsi*. Parallèlement, une diminution de la solubilité du collagène est observée avec l'âge dans les muscles *Extensor digitorum longus* et *Rectus femoris*, le *Semimembranosus proprius* et le *Psoas*. La contrainte au cisaillement sur *Longissimus dorsi* cru augmente entre 66 et 147 jours d'âge mais pas sur le muscle cuit. Ce résultat est à relier à la forte solubilité du collagène des muscles du lapin. L'augmentation de la résistance élastique des os longs observée avec l'accroissement de l'âge s'explique par l'augmentation de leur taille (moment d'inertie) (figure 6). En effet, les caractéristiques mécaniques du matériau constitutif n'évoluent pas entre 49 et 147 jours d'âge (contrainte et module élastique). Les os des animaux les plus jeunes ne sont donc pas intrinsèquement plus fragiles [A8 ; C2 ; C9].

III2. Facteur génétique : 2 lignées sélectionnées sur le poids à 63 jours

Il s'agissait d'étudier l'impact de l'augmentation de la vitesse de croissance sur la qualité de la viande de lapin. Un programme de sélection des animaux d'une souche lourde issue d'une lignée

commerciale a été effectué de manière divergente sur le poids à 63 jours, sur 6 générations. Ce programme a permis la mise en place d'une collaboration avec C. Larzul (INRA SAGA) pour les mesures génétiques, F. Gondret (INRA SENAH) pour les mesures histologiques et métaboliques et moi même pour les mesures physico-chimiques. Les conséquences de cette sélection sur l'efficacité alimentaire, la composition corporelle, les caractéristiques physico-chimiques, rhéologiques et histologiques des muscles et de la viande ont été évaluées à la dernière génération en comparant les deux lignées sélectionnées avec une lignée témoin issue d'embryons congelés. Cette comparaison a été réalisée sur des lapins abattus à âge constant ou à poids constant pour étudier les conséquences de la sélection dans le cadre d'un alourdissement des lapereaux (+ 17 % ; tableau 2) ou d'un rajeunissement des lapereaux (52, 58 et 63 jours pour les lignées haute, contrôle et basse), respectivement. Nous avons ainsi pu montrer, hormis l'efficacité de la sélection (2 écarts-types phénotypiques entre les deux lignées divergentes, la lignée témoin étant intermédiaire), qu'à âge fixé (tableau 2) la composition de la carcasse commençait à être modifiée par la sélection pour la lignée légère uniquement (-0,3 point d'adiposité). Concernant les caractéristiques musculaires, seule la taille des fibres a été affectée (-17 % pour la lignée légère), et non leur nombre ou leurs types contractile et métabolique [A10]. Les paramètres de mesure de la qualité (pH, couleur, tendreté mécanique) sont peu ou pas modifiés par la sélection.

Tableau 2 : Evolution phénotypique des performance de croissance et des caractéristiques de la carcasse à la 3^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} génération de sélection divergente sur le poids à 63 j. L : lignée basse, H : lignée haute et C : lignée témoin issu d'embryon congelé [A10].

Traits	stde	Effects		G3		G5		G6		
		Line	Sex	L	H	L	H	L	C	H
Weight at slaughter (g)	201	***	NS	2363 ^a	2678 ^b	2426 ^a	2785 ^b	2423 ^a	2684 ^b	2880 ^c
FC, g feed/g gain	0.18	*	-	3.15	3.19	3.12 ^a	2.99 ^b	3.05 ^a	2.96 ^{ab}	2.90 ^b
Percentage (%)										
Skin	1.01	***	NS	20.22 ^a	20.58 ^a	16.24 ^b	15.62 ^a	19.12 ^c	18.23 ^b	17.55 ^a
Dressing out	2.17	*	NS	54.34	55.22	56.18	56.12	54.41 ^a	55.67 ^b	55.53 ^b
Perirenal fat	0.42	***	***	1.68	1.70	1.51 ^a	1.82 ^b	1.62 ^a	1.92 ^b	2.04 ^b
Colour										
L*carcass	2.15	NS	*	-	-	57.82	57.40	53.80	53.20	52.94
a*carcass	1.77	NS	NS	-	-	3.65	3.68	4.60	4.52	4.03
b*carcass	1.37	NS	**	-	-	3.04	2.94	4.39	4.23	3.78

La réduction de l'âge à l'abattage (52 jours vs 58 jours pour la lignée haute et contrôle) n'a pas eu d'impact majeur sur la carcasse et les paramètres histologique et physico-chimique de mesure de la qualité de la viande exception faite d'une plus grande fragilité osseuse (moindre élasticité). En revanche, l'augmentation de l'âge d'abattage (63 à 58 jours pour les lignées basse et contrôle) a eu des conséquences positives sur le rendement (+3 points) et la composition corporelle (+ 11% du rapport muscle sur os) par contre l'intérêt d'une telle sélection reste limité du fait de la dégradation de l'indice de consommation (+0,12 point). Aucune incidence sur les caractéristiques histologiques n'a été observée [A9].

Cette expérience de sélection divergente a globalement permis de montrer que les relations génétiques entre la croissance et la qualité de la viande sont faibles et que la sélection sur la vitesse de croissance n'a une incidence que sur la composition corporelle.

III3. Facteurs alimentaires : enrichissement en luzerne de la ration et valeur nutritionnelle de la viande de lapin

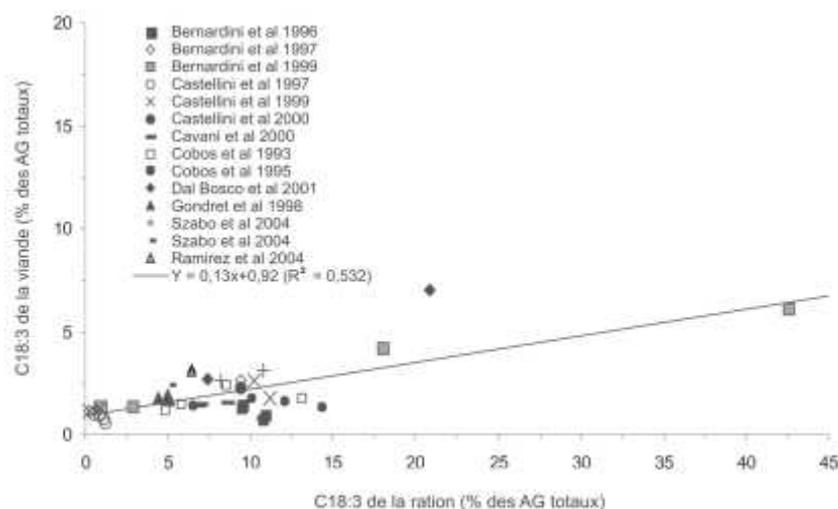


Figure 10 : Relation entre la proportion d'acide α -linoléique (C18:3 n-3) de la ration et celle mesurée dans le muscle *Longissimus dorsi*, la cuisse ou la viande exprimée en % des acides gras (AG) totaux [B2]

Selon les Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) pour la population française (Martin, 2001), l'alimentation humaine devrait apporter des matières grasses dont le rapport entre l'acide linoléique (C18:2n-6) et l'acide α -linoléique (C18:3n-3) soit inférieure ou égal à 5. En réalité dans notre alimentation, il est de l'ordre de 20. Une étude bibliographique [B2] m'a permis de montrer que le profil des acides gras de la viande de lapin se caractérise par sa richesse en acide palmitique, oléique et linoléique avec des proportions de plus de 20 % de la teneur totale en acide gras. Les acides stéarique, palmitoléique, myristique, arachidonique et linoléique représentent de 7 à 2 % de la teneur totale en acides gras. Les acides gras de la viande de lapin sont composés en moyenne pour 39 % d'AGS (acides gras saturés), pour 28 % d'AGMI (acides gras mono-insaturés) et 33 % d'AGPI (acides gras poly-insaturés). Comparativement aux autres viandes, le lapin se caractérise par une plus forte proportion d'AGPI (Dalle Zotte, 2002)[C40]. De nombreuses études ont démontré que le profil en acide gras de la viande de lapin dépend principalement de celui des acides gras ingérés (Xiccato, 1999) (figure 10). Un régime défini comme standard pour le marché français permet d'obtenir une viande présentant un ratio omega 3 / omega 6 de 8 et une teneur en C18:3n-3 qui satisfait au premier niveau d'allégation nutritionnelle « source de » puisqu'il couvre 15% des ANC de l'homme et de la femme (tableau 3) [C41 ; C46]. La luzerne déshydratée, qui est une matière première classiquement introduite dans les rations, est riche en acide α -linoléique. Dans le cadre d'un contrat de recherches avec le SNDF (Syndicat National des Deshydrateurs Français), j'ai conçu et dirigé une étude sur l'impact de l'enrichissement de la ration en luzerne sur la qualité nutritionnelle de la viande. Cette étude visait à produire des références

sur la valeur nutritionnelle de la viande de lapin et concernait plus particulièrement la mesure des teneurs en acides gras de la famille des oméga 3 et 6. Nous avons montré que l'incorporation de luzerne déshydratée à un taux de 40 % permet d'obtenir une viande présentant un rapport C18:2n-6/C18:3n-3 de 4,4 en accord avec les recommandations nutritionnelles et permet également de multiplier par 2 la teneur en AGPI n-3 à longue chaîne. Si notre étude a permis de chiffrer la relation entre la quantité de C18:3n-3 ingérée et celle déposée (figure 11) [A11], il restait cependant à déterminer la durée nécessaire et la stabilité au cours de temps de ce dépôt. En effet, les travaux de Szabo et al (2004) ont montré que la composition en acides gras des muscles est réversible en fonction du temps de distribution des régimes.

Tableau 3 : Teneur en Oméga 6, Oméga 3 et rapport oméga 6/ oméga 3 de la viande en fonction du régime alimentaire et couverture des apports nutritionnels conseillés (ANC) en oméga 3 pour 100 g de viande selon les différents régimes. [C41]

Régimes alimentaires	oméga-	Standard	oméga+	oméga++ finition	oméga++	ETR	
Teneur en lipides (g/100g)	13,0 ^a	12,5 ^{ab}	10,5 ^b	12,2 ^{ab}	11,8 ^b	2,1	**
Teneur en eau (g/100)	66,6	67,2	68,4	67,2	67,7	2,0	NS
C18:2n-6 linoléique (mg/100g)	2481	2579	2042	2429	2359	315	NS
C18:3n-3 linoléique (mg/100g)	198 ^e	319 ^d	431 ^b	959 ^c	1243 ^a	132	***
oméga6/oméga3 ⁽¹⁾	12,61 ^a	8,11 ^b	4,80 ^c	2,54 ^d	1,92 ^e	0,38	***
Couverture % ANC (homme/femme) ⁽²⁾	9 / 11	15 / 19	21 / 27	46 / 57	56 / 69		

(2) Les ANC recommande une consommation de 2 et 1,6 g/j de C18 :3n-3 pour un homme et une femme respectivement.

(1) ratio C18:2n-6/ C18:3n-3 ;

NS : non significatif, ** <0,01 ; ***<0,001 Les moyennes affectées d'une lettre différente diffèrent au seuil de p<0,05

A l'initiative du CLIPP (interprofession de la filière cunicole), une étude menée par l'ITAVI et à laquelle j'ai apporté mon expertise a permis de montrer que la distribution d'un aliment enrichi en oméga 3 en fin d'engraissement (7 à 10 semaine d'âge) suffisait à obtenir des viandes riches en oméga 3. La viande ainsi produite permettait de couvrir plus de 30% des apports nutritionnels recommandés, seuil nécessaire à l'époque pour obtenir l'allégation « riche en... » (tableau 3). Ainsi, la segmentation des programmes alimentaires est un outil qu'il convient d'optimiser afin d'obtenir une viande riche en oméga 3 à moindre coût et de valoriser au mieux cette différenciation produit.

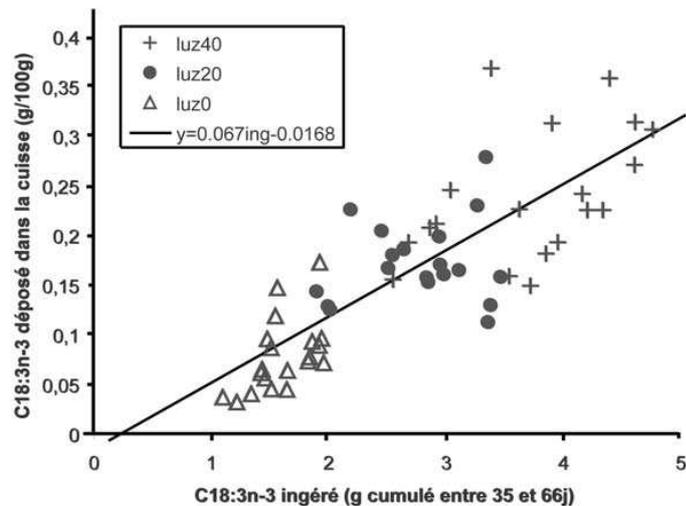


Figure 11: Quantité de C18:3n-3 déposée dans la viande de la cuisson en fonction de celle ingérée par les animaux ($R^2 = 0,669$) [A11]

III.4. Logement des animaux et impact de l'exercice physique

Un des freins importants à la consommation de viande de lapin est son image. En effet la compassion potentielle pour le lapin est beaucoup plus intense que pour le poulet par exemple. Le lapin peut également être un animal de compagnie. En réponse aux attentes des défenseurs du bien-être animal des essais ont été conduits en Europe et en France en particulier, sur le mode de logement des lapins en engraissement. Parmi les nouvelles techniques proposées, l'une consiste à agrandir les cages de manière à ce que chaque lapin puisse disposer de plus d'espace. Ces grandes cages appelées "parcs" ont généralement une surface triple à quadruple de la surface classique (1,5 à 2 m² contre 0,5 m²) [D1]. De ce fait les lapins augmentent fortement leurs déplacements, et sollicitent plus leurs muscles locomoteurs.

J'ai réalisé un travail de synthèse à partir d'une quarantaine de publications ayant traité de l'influence des conditions de logement sur les performances zootechniques et les qualités des carcasses et des viandes [D1]. Leur analyse montre globalement que le mode de logement (densité, surface allouée, ...) peut assez largement modifier les performances de la période d'engraissement (vitesse de croissance, efficacité alimentaire, viabilité des lapins). Certaines modifications de logement comme l'octroi de plus grandes possibilités de mouvement (parcs en particulier) sont susceptibles de modifier aussi la présentation de la carcasse : développement des parties arrières et moindre adiposité (figure 12).

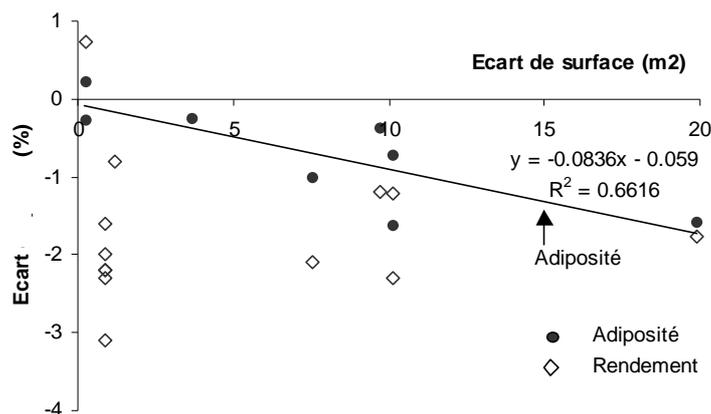


Figure 12 : Variations de rendement (losange) et d'adiposité de carcasse (point noir) en fonction des écarts de surface par rapport au témoin (cage biplace ou collective) pour les différentes études recensées (n= 8 et n=6 études respectivement pour le rendement et l'adiposité). Seuls ont été retenus les essais où des écarts significatifs ont été obtenus au moins entre lots extrêmes [D1].

Pour répondre à ces questions et parallèlement pour améliorer les connaissances sur les mécanismes d'adaptation structurelle, métabolique et contractile du muscle lors d'une activité physique, nous avons mis au point un modèle expérimental de logement, qui permet d'amplifier l'activité locomotrice des animaux (ici, le saut : figure 13). Nous avons ainsi montré (thèse de C. Ducomps 2002) que l'accroissement de l'activité entraîne une augmentation parallèle de la résistance des muscles à l'étirement passif et de leur teneur en collagène total et surtout insoluble (de +13 à +20% selon les muscles) [A8]. Cet accroissement de l'activité locomotrice avec sauts a aussi modifié l'équilibre entre les différents types de fibres qui se traduit par une augmentation du nombre de fibres oxydatives de type IIA, réalisée au détriment des fibres IIB/IIX dans le muscle *Rectus femoris* ou dans le *Psoas* [A8]. Par ailleurs, l'équilibre des voies métaboliques des lapins dont l'activité physique est stimulée s'établit en faveur d'un métabolisme plus oxydatif par rapport au lot sédentaire. L'accroissement de l'activité physique entraîne en particulier une meilleure aptitude à dégrader les acides gras pour produire l'énergie nécessaire à la contraction dans les fibres musculaires. Malgré une modification du métabolisme énergétique musculaire, il n'y a pas de variation associée à l'exercice physique de la teneur en lipides et en glycogène et du pH ultime musculaire, et donc vraisemblablement de la qualité de la viande [A9]. Il s'agit du premier modèle d'étude où l'on a pu démontrer que l'activité physique pouvait modifier la structure des muscles d'un animal.

Nous avons ensuite montré que la pratique répétée du saut chez le lapin modifie le comportement mécanique du tendon d'Achille et du ligament rotulien, évalué après cuisson. En effet, le tendon d'Achille et le ligament rotulien des lapins pratiquant le saut présentent une rigidité supérieure (respectivement, +25% et +34 %) à celle observée chez le lapin sédentaire. Cette étude suggère également pour la première fois, que la pratique d'un exercice physique régulier de type saut chez le lapin augmente la résistance des complexes tendino-osseux, ce qui serait favorable à la qualité des morceaux de découpe après cuisson [A9]. Des études relatives à la cohésion des muscles à l'os

ont fait l'objet d'un travail de thèse sur le modèle "poulet", (2005-2008, M. Moussa, dirigé par H. Rémignon).

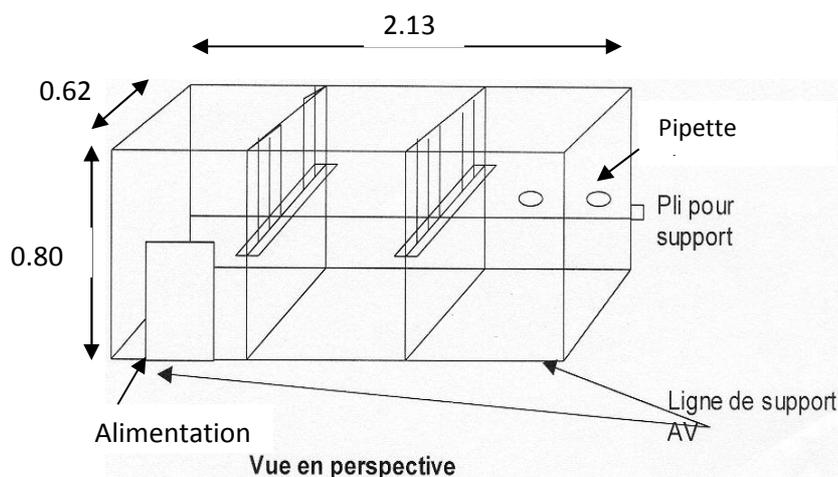


Figure 13 : Schéma d'un logement expérimental en parc de 1,32 m² destiné à stimuler le saut des lapins. Le dispositif présente 2 obstacles de hauteur modulable qui séparent le point d'abreuvement du point d'alimentation. [A8]

IV. Bilan de mes activités de recherches sur la qualité de la viande et de la carcasse

Les travaux de recherches que j'ai menés durant 7 années ont été soutenus par F. Lebas puis T. Gidenne, directeurs successifs de la Station de Recherches Cunicole. J'ai bénéficié de l'expertise initiale de D. Delmas, et réalisé ces travaux avec l'aide efficace de L. Cauquil et B. Gabinaud et en collaboration avec J.P. Doutreloux. Cette activité de recherche s'est soldée par la production de 11 articles primaires dont 10 en collaboration avec d'autres équipes de recherches (figure 14). Le bilan de mon activité sur la qualité de la viande et de la carcasse de lapin se traduit d'une part, par des avancées méthodologiques et d'autre part, par la production de nouvelles connaissances relatives à la physiologie du muscle. Ces travaux en cohérence avec les préoccupations de la filière cunicole ont permis de répondre à un certain nombre d'interrogations concernant l'influence de facteurs d'élevage sur la qualité de la viande et de la carcasse.

D'un point de vue méthodologique, nous avons mis au point trois méthodes rhéologiques de mesures objectives de la qualité de la viande et de la carcasse chez le lapin : cisaillement de Warner Bratzler, test de flexion en 3 points et étirement passif. Nous avons également réalisé une étude approfondie du comportement mécanique de la viande en fonction du temps et de la température de cuisson nous permettant ainsi de définir un couple temps/température optimal pour la mise en œuvre des tests de rhéologiques. Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'aptitude des méthodes physico chimiques à rendre compte des modifications qualitatives et quantitatives des caractéristiques de la viande et de la carcasse. Nous nous sommes principalement focalisés sur les méthodes simples rapides, peu coûteuses et transposables en abattoir et atelier de découpe industriels. Dans un troisième temps nous avons évalué la capacité de ces mesures objectives à retranscrire les évaluations sensorielles.

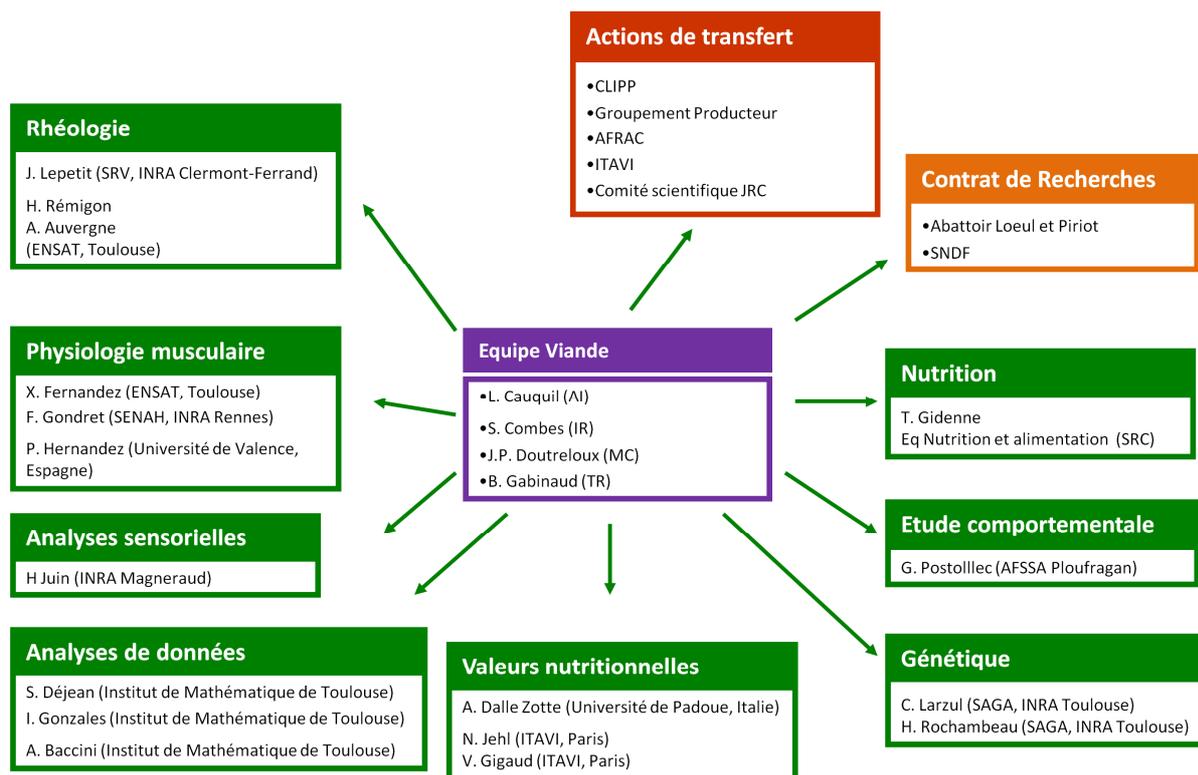


Figure 14 : Principales collaborations développées au cours du programme de recherches sur l'influence des conditions d'élevage du lapin sur la qualité de la carcasse et de la viande de lapin (les affectations administratives sont celles en vigueur en 2007)

L'étude des facteurs d'élevage susceptibles de générer des modifications de qualité chez le lapin ont permis de répondre aux demandes et questionnements émanant de la filière tout en contribuant à l'amélioration des connaissances relatives à la physiologie du lapin et notamment l'adaptation à l'exercice chez le lapin. D'un point de vue appliqué, mes travaux ont permis d'apprécier les conséquences de certaines pratiques d'élevage (rajeunissement de l'âge d'abattage, logement, alimentation) sur la qualité technologique, sensorielle et nutritionnelle de la viande et de la carcasse.

A partir de 2007, mon changement de thématique s'est soldé par un arrêt des programmes de recherches sur la qualité de la viande et de la carcasse du lapin, bien que le relai pour des expérimentations ponctuelles ait été assuré par l'équipe Promété de TANDEM (figure 2). Toutefois les compétences et l'expertise que j'ai acquises me conduisent encore actuellement à répondre à des sollicitations issues des sphères scientifiques et professionnelles.

Partie 2. Caractérisation de l'écosystème cæcal en relation avec la nutrition et la santé digestive du lapin

Bien qu'historiquement mes connaissances scientifiques et techniques portent davantage sur l'espèce lapin, je me suis également intéressée dans le cadre de cette mission à l'écosystème digestif de la vache laitière par le biais des collaborations avec les autres chercheurs de mon équipe. En effet les écosystèmes digestifs obéissent à des patrons communs en termes de diversité spécifique, fonctionnelle et de services écosystémiques rendus à l'hôte. Cependant dans la suite de ce document je me focaliserai principalement sur les finalités qui concernent le lapin.

I. Enjeux socio économiques et contexte scientifique

I1. Les enjeux socio économiques

La filière cunicole, à l'instar des autres filières, est confrontée à l'envolée des prix des matières premières, conjuguée à un déséquilibre entre l'offre et la demande. Par ailleurs, l'évolution des formules alimentaires, la technicité croissante des éleveurs, l'amélioration des techniques d'élevage et le rationnement, en particulier, concourent à de meilleures performances d'élevage, plus particulièrement une meilleure conversion alimentaire. En dépit de ces progrès techniques, le contexte de l'entérococolite épizootique du lapin (EEL) et la prégnance des pathologies digestives particulièrement dans les deux à trois semaines qui suivent le sevrage (Licois & Marlier, 2008)[A16] conduisent à une consommation de médicaments administrés à titre curatif ou préventif qui représente un coût important pour l'éleveur sans omettre l'aspect négatif pour le consommateur et la santé humaine (antibiorésistance). Les enjeux auxquels doit répondre la filière cunicole sont de trois ordres :

1. Limiter les intrants médicamenteux en améliorant la santé digestive.

Cet enjeu répond à la fois à une problématique économique mais également de santé publique. En effet, aux pertes économiques dues à la mortalité et au retard de croissance, une supplémentation médicamenteuse représente un coût supplémentaire de 15 à 40€ par tonne d'aliment. D'autre part, l'utilisation d'antibiotiques de manière préventive ou curative en production animale conduit à l'émergence et à la diffusion de gènes de résistance. Le lapin, puis les volailles et les porcs sont les espèces les plus exposées aux antibiotiques (Chevance & Moulin, 2012) (tableau 4). Bien que les mécanismes de transfert et de dispersion des gènes de résistance aux antibiotiques ne soient que partiellement connus, il est admis que les microorganismes du tractus digestif constituent un réservoir de gènes de résistance (Marshall, *et al.*, 2009). L'accroissement de leur occurrence et leur diffusion a pour conséquence la diminution du nombre d'antibiotiques potentiellement efficaces dans la lutte contre les infections bactériennes en médecine humaine mais également vétérinaire. Aussi l'enjeu majeur pour les productions animales et la production de lapin de chair en particulier, est de développer des systèmes d'élevages innovants pour préserver la santé des animaux et limiter voire s'affranchir de l'utilisation d'antibiotiques.

2. Améliorer l'efficacité digestive. Ce second enjeu est à replacer dans le contexte économique et correspond à une nécessité de diminution du coût de production pour des produits de qualité croissante. L'alimentation est le principale poste de dépense et représente ainsi à 53 % du prix de vente d'un lapin en 2012 (Coutelet, 2013). Optimiser l'efficacité digestive répond

également à l'objectif d'une incontournable nécessité de limitation de l'utilisation des ressources à l'échelle de la planète, et de limitation des rejets dans l'environnement (Gidenne, *et al.*, 2013). Il s'agit également de favoriser l'utilisation de nouvelles matières premières non concurrentes avec l'alimentation humaine.

3. **Contribuer à la conception d'élevages plus durables.** Il s'agit ici d'œuvrer pour des innovations permettant une production cunicole qui soit à la fois économiquement rentable, socialement acceptable et à moindre impact environnemental [A15]. La variabilité des performances observées sur un réseau de ferme de référence semble montrer qu'il existe dès à présent des leviers d'action qui permettent d'améliorer la durabilité des ateliers de production [C56]. Par ailleurs concernant le pilier environnemental, les premiers résultats d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) montrent que les impacts environnementaux des ateliers cunicoles sont principalement liés à la production des aliments et à la gestion des effluents [C78]. Ces résultats démontrent l'intérêt de travailler sur la capacité des animaux à valoriser des ressources à faible impact environnemental et sur l'efficacité du système de production, via l'amélioration de l'efficacité digestive et la réduction des pertes liées à la morbidité et à la mortalité.

Tableau 4 : Répartition des ventes d'antibiotique en 2012 entre les différentes espèces en tonnage de poids vif traité et en indicateur du niveau de l'exposition ALEA (Animal Level of Exposure to Antimicrobials = rapport entre le poids vif traité et le poids vif total produit) (Chevance & Moulin, 2012)

	Bovins	Chats & Chiens	Chevaux	Poissons	Lapins	Ovins & Caprins	Porcs	Volailles	Autres	Total
Poids vif traité (tonnage)	3 025 087	107 562	118 026	10 623	269 054	425 734	2 895 322	2 202 426	19 710	9 073 543
Pourcentage	33,3%	1,2%	1,3%	0,1%	3,0%	4,7%	31,9%	24,3%	0,2%	100 %
ALEA	0,326	0,685	0,391	0,217	2,887	0,691	0,991	1,177	0,508	0,592

12. Contexte scientifique

Les mammifères peuvent être assimilés à des super-organismes ou holobiontes puisqu'ils sont colonisés en permanence par une vaste et abondante communauté de microorganismes. Ainsi, le phénotype d'un individu est-il défini par l'expression de ses propres gènes mais également par celle des gènes des communautés microbiennes, appelée microbiote, qui le colonisent. Les fermenteurs digestifs, hébergent ainsi un microbiote constitué d'environ 100 à 1000 milliards de micro-organismes par gramme de digesta appartenant à un millier d'espèces différentes. Une relation hôte/microbiote basée sur un modèle de symbiose définit "l'écosystème digestif" où chaque partenaire trouve un bénéfice à cette association. En effet, les fermenteurs digestifs des mammifères, offrent un habitat très favorable au développement des microorganismes avec une vitesse de transit lente, un pH du milieu acide à neutre associé à une humidité importante et une température stable et élevée. L'hôte tire bénéfice de cette association car elle lui permet d'utiliser l'énergie des fibres végétales. En effet, seule l'action synergique d'un assemblage complexe de microorganismes permet l'hydrolyse, et la fermentation des fibres. La stratégie digestive du lapin est ainsi basée sur un mutualisme compétitif-coopératif (Mackie, 2002): le mutualisme est dit compétitif car le lapin à l'instar des espèces carnivores conserve un accès privilégié à l'aliment puisque le fermenteur est en position distale du tube digestif ; le mutualisme est dit coopératif car les microorganismes du cæcum, utilisent, des sources carbonées non concurrentielles pour le lapin.

La coévolution du microbiote digestif avec l'hôte se traduit par des interactions importantes entre la communauté microbienne et la physiologie de l'hôte. Ainsi, outre le service écosystémique de nutrition (apport d'énergie sous forme d'acides gras volatils, protéines bactériennes et vitamines), le microbiote digestif joue un rôle trophique sur le tractus digestif (angiogenèse et développement de la muqueuse), participe à l'immunité innée de l'hôte (rôle barrière), et stimule le système immunitaire inné et acquis (immunité cellulaire et humorale). La combinaison de l'utilisation d'animaux transgéniques et axéniques a permis et permet encore aujourd'hui de mieux comprendre les actions du microbiote digestif sur la physiologie de l'hôte, et inversement.

Toutefois, l'équilibre de l'écosystème digestif peut être rompu lors de transitions (sevrage) ou modifications environnementales (changement d'aliment). Cette rupture d'équilibre est à l'origine de certaines affections digestives. Ces dernières années, un effort de recherche considérable utilisant les techniques de la biologie moléculaire et de la microbiologie ont permis de mieux définir la composition de l'écosystème digestif, de mieux comprendre son fonctionnement et ses multiples rôles physiologiques. Dans ce contexte, mon programme de recherche a eu pour objectif initial de décrire la diversité spécifique de l'écosystème digestif, son implantation et d'évaluer sa résilience en réponse à une perturbation nutritionnelle. Il s'agissait de contribuer à la compréhension du fonctionnement de l'écosystème digestif. La finalité étant d'intégrer ces connaissances pour mieux contrôler l'efficacité et la santé digestive chez le lapin et contribuer ainsi à l'émergence de systèmes d'élevage innovants. Ces recherches s'inscrivaient dans le programme de l'équipe NED dirigé par Thierry Gidenne, et impliquait fortement Laurence Fortun-Lamothe et Rory Michelland, doctorant que je co-encadrais sur le modèle lapin, Laurent Cauquil et Béatrice Gabinaud.

II. Diversité de l'écosystème digestif du lapin

Chez le lapin, une abondante communauté bactérienne est présente dans l'ensemble cæcum-côlon, les caecotrophes et les fèces (10^{11} à 10^{12} bactérie/g) (Gouet & Fonty, 1973, Gouet & Fonty, 1979, Forsythe & Parker, 1985) [A25] tandis que la population archée est estimée à 10^7 par g de contenu [A25]. En ce qui concerne le domaine des eucaryotes, l'écosystème digestif cæcal du lapin semble dépourvu de champignons anaérobies (Bennegadi, *et al.*, 2003) et de levures [A31] quoique la présence de levures "commensales" ait été observée dans le cæcum (10^6 /g (Forsythe & Parker, 1985). Les protozoaires sont absents de l'écosystème cæcal (Bennegadi, *et al.*, 2003).

Les études basées sur l'aspect fonctionnel des microorganismes et leur capacité à se développer sur des substrats définis ont permis de montrer que le lapin adulte héberge 10^7 et 10^6 bactéries cellulolytiques par g de contenu cæcal et de fèces respectivement. Les populations de bactéries xylanolytiques et pectinolytiques s'établissent quant à elles entre 10^9 et 10^{10} bactéries par g dans le côlon et le cæcum. Les espèces cultivables les plus fréquemment identifiées sont *Eubacterium cellulosolvens* pour les bactéries cellulolytique et *Bacteroides ruminicola* pour les bactéries pectinolytiques et xylanolytiques (Boulahrouf, *et al.*, 1991). Par ailleurs, la fraction cultivable du microbiote digestif du lapin adulte sain se caractérise par l'absence ou la faible densité de *Lactobacillus*, *Streptococcus* et d'*Escherichia coli* (Ducluzeau, 1969, Gouet & Fonty, 1973, Gouet & Fonty, 1979, Yu & Tsen, 1993, Padilha, *et al.*, 1996) et la prédominance des *Bacteroides* (Gouet & Fonty, 1973, Gouet & Fonty, 1979).

Les techniques culturales ne permettent à priori l'étude que de 10 à 20 % de la population bactérienne du système digestif (Suau, *et al.*, 1999), puisque nos connaissances sur la physiologie de nombreux micro-organismes sont insuffisantes, pour pouvoir les isoler et les cultiver *in vitro*. Les techniques de microbiologie moléculaire ont permis une avancée considérable dans la connaissance de la diversité microbienne spécifique des écosystèmes digestifs. Marqueur neutre de l'évolution, ubiquitaire, facilement détectable, l'utilisation des gènes codants pour l'ARN de la petite sous unité du ribosome (ADNr 16S) permet d'appréhender la diversité spécifique des écosystèmes microbiens (Case, *et al.*, 2007, Deng, *et al.*, 2008). Au sein du laboratoire nous avons mis au point cinq grands types de méthodes : la réalisation d'inventaire moléculaire [A14] et les empreintes moléculaires (CE-SSCP : Capillary Electrophoresis Single Strand Conformation Polymorphism) [A19 ; A20] en collaboration avec le Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (INRA Narbonne), la quantification par PCR en temps réel [A25 ; A29] en collaboration avec Jean-Pierre Furet (MICALIS, INRA Jouy), et le séquençage en profondeur de l'ADNr 16S [A33 ; A36] (figure 15).

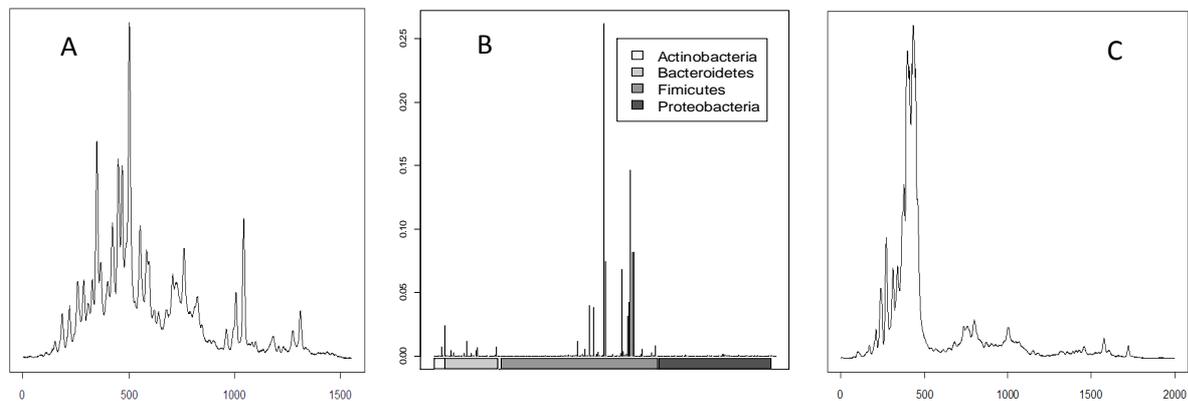


Figure 15 : Profil CE SSCP (A) et profil taxonomique par pyroséquençage 454 (B) de la communauté bactérienne et profil CE SSCP de la communauté archée (C) cœcale [B7]. Les ordonnées correspondent à des abondances relatives, les graphiques A et C : les abscisses correspondent au temps de migration. Graphique B ; en abscisse les taxons sont ordonnés par ordre alphabétique.

Tableau 5 : Distribution des OTU (Operational Taxonomic Unit) et des clones (séquences ADNr 16S isolées) dans les phyla présents dans le contenu cœcal d'un lapin adulte [A14]

Phyla	OTU (%)	Clones (%)
Bacteroidetes	3 (4,3)	7 (3,1)
Beta-gamma-proteobacteria	1 (1,4)	1 (0,4)
Firmicutes	65 (92,9)	211 (92,5)
Verrucomicrobiae	1 (1,43)	9 (4)

Les deux inventaires de la communauté bactérienne cœcale qui ont été réalisées, dont un dans notre laboratoire ont révélé le faible niveau de connaissances des espèces bactériennes hébergées dans le cœcum. En effet, la plupart des séquences identifiées correspondent à de nouvelles espèces bactériennes non cultivées et non référencées dans les bases de données (90% Abecia, *et al.*, 2005); 80% [A14]). Ces études montrent également le caractère particulier du microbiote cœcal du lapin puisque la moitié des séquences décrites dans chacune des études sont phylogénétiquement proches entre elles. L'analyse phylogénétique (tableau 5) range les séquences

dans leur très grande majorité dans les Firmicutes (plus de 90% des séquences), alors que les Bacteroidetes ne représenteraient que 4% des séquences. En accord avec ces premiers résultats exploratoires, la densité de population chez le lapin adulte, évaluée par PCR en temps réel, des Firmicutes est de $10,8 \log_{10}$ copies d'ADNr 16S/g de contenu cœcal, tandis que les genres *Bacteroides* et *Prevotella* atteignent $9,7 \log_{10}$ copies d'ADNr 16S/g [A25] (figure 16), soit dix fois moins.

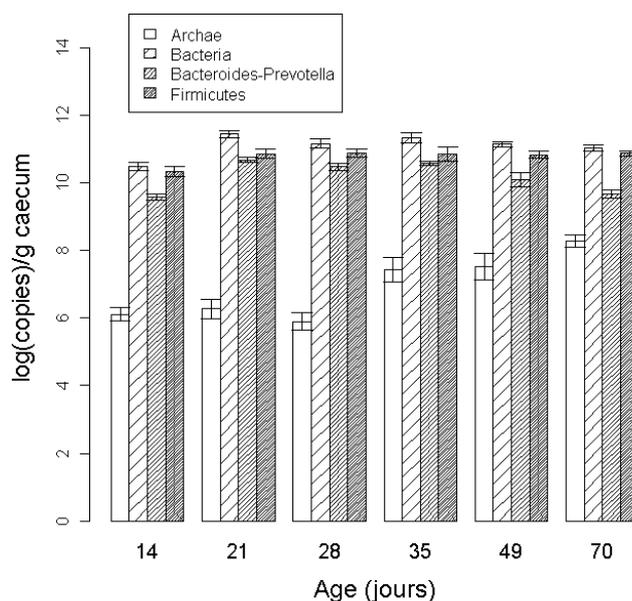


Figure 16 : Densités des populations archées, bactéries, du phylum Firmicutes et des genres *Bacteroides-Prevotella* dans le cœcum de lapin selon l'âge [A25]

La réalisation d'empreinte moléculaire dans le cœcum chez le lapin (CE-SSCP) permet d'obtenir une image représentative de la communauté bactérienne [A20] ou archée [A23] rapidement et à un coût modéré. L'analyse des pics en CE-SSCP fournit une image représentative des espèces dominantes du microbiote, et une idée de la richesse de la communauté par l'analyse de l'aire sous les pics (Fromin, *et al.*, 2002). Afin de faciliter l'utilisation de ces données, nous avons conçu et mis à disposition de la communauté scientifique un logiciel (StatFingerprints) sous environnement R (<http://cran.r-project.org/>) pour l'analyse de la structure de ces empreintes, et le calcul d'indice de diversité [A18].

Bien que la communauté bactérienne soit majoritaire dans les écosystèmes digestifs, un intérêt particulier a été porté aux archées. Les archées qui résident dans le tractus digestif, sont toutes méthanogènes et strictement anaérobies. Intégrées en fin de la chaîne trophique, elles permettent l'élimination de l'hydrogène issu des fermentations sous forme de méthane (Jones, *et al.*, 1987). Le méthane issu de leur activité est un puissant gaz à effet de serre (23 fois plus réchauffant que le CO₂) et représente également une perte de 6 à 8% de l'énergie et du carbone ingérés par l'animal (Boadi, *et al.*, 2004). Contrairement aux ruminants, chez le lapin, la réduction de l'émission de gaz à effets de serre n'est pas un enjeu majeur, puisque le lapin en croissance produit peu de méthane (Franz, *et al.*, 2011). Les profils CE-SSCP obtenus pour la communauté archée indiquent une diversité spécifique beaucoup plus faible que celle de la population bactérienne [A20 ; A23]. A

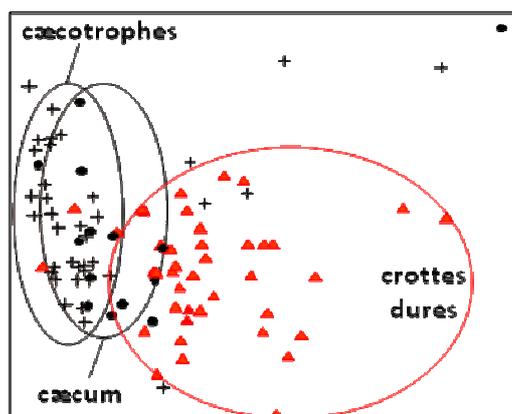
l'instar des autres écosystèmes digestifs de mammifères, l'ordre des Methanobacteriales et le genre *Methanobrevibacter* prédominent (Kušar & Avguštin, 2010). La densité des archées a été évaluée à 7-8 log₁₀ copie d'ADNr 16S /g de contenu cæcal (figure 16) [A25]. La grande hétérogénéité des émissions de méthane entre individus *in vivo* (Belenguer, *et al.*, 2011) suggère l'existence d'un effet génétique, mais également l'existence pour les individus non méthano-excréteur d'autres voies d'élimination de l'hydrogène : l'acétogenèse réductrice.

III. Structuration de la communauté microbienne

III.2. Structuration spatiale de la communauté microbienne

Bien que le cæcum soit le fermenteur principal chez le lapin, une population microbienne est également présente dans les segments proximaux (estomac, intestin grêle) et distaux (côlon proximal) du tube digestif (Gouet & Fonty, 1979). Le contenu stomacal du lapin, héberge 10⁴ à 10⁶ bactéries/g à l'âge adulte, cette densité est de 10 à 100 fois plus importante dans l'intestin grêle. Le côlon proximal abrite une population anaérobie équivalente à celle du cæcum (Gouet et Fonty, 1979), soit encore 100 à 1000 fois plus que dans l'iléon. La diversité bactérienne, mesurée à partir d'empreinte moléculaire, serait plus élevée dans l'iléon que dans le cæcum (Badiola, *et al.*, 2004) [A22]. Par ailleurs, la densité bactérienne des caecotrophes, qui correspondent à du contenu cæcal peu modifié, est du même ordre de grandeur que celle du cæcum (10¹¹ bactérie/g) et 10 fois supérieure à celle des fèces, plus riches en grosses particules (> 0,3 mm) (Emaldi *et al.*, 1978). De même, nous avons montré que la structure de la communauté bactérienne et archée des caecotrophes est plus proche de celle du contenu cæcal que de celle présente dans les fèces (figure 17) (Rodriguez-Romero, *et al.*, 2009) [A20 ; A23]. Cette structuration spatiale de la communauté s'explique principalement par les proximités de composition chimique entre les différents milieux digestifs. En effet, les facteurs physicochimiques de l'écosystème jouent un rôle majeur dans la sélection des espèces de microorganismes dont chacune possède des caractéristiques physiologiques propres. Si les paramètres du milieu (notion de filtre écologique) satisfont toutes ces caractéristiques (contraintes écologiques) alors les espèces microbiennes pourront se développer. Les paramètres physico-chimiques qui jouent un rôle majeur pour un écosystème digestif sont : l'absence d'énergie lumineuse, la température constante et relativement élevée (35 à 40°C), l'humidité (75 à 95%), le pH légèrement acide à neutre (6 à 6,5 pour le cæcum), le potentiel d'oxydoréduction relativement bas, (<200mv pour le caecum Kimsé, *et al.*, 2009).

A Communauté bactérienne chez le lapin



B Communauté d'archées chez le lapin

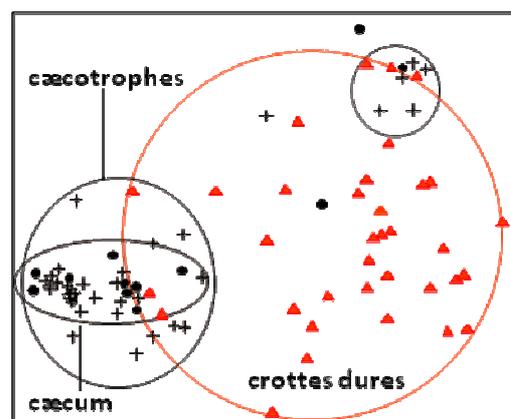


Figure 17: Représentation graphique d'une analyse nMDS des profils SSCP des communautés de bactéries (A) et d'archées (B) entre le cæcum (●), les cæcotrophes (+) et les crottes dures (▲) du lapin (travail de thèse Rory Michelland 2009). Chaque communauté est représentée par un point. Plus les points sont éloignés sur le graphique, plus les communautés bactériennes diffèrent. [A20, A23, B7]

III2. Structuration temporelle de la communauté microbienne

En l'absence de perturbations induites, nous avons montré que la communauté bactérienne du cæcum de lapin adulte (diversité, structure, densité des populations de bactéries totales, de Firmicutes et de *Bacteroides Prevotella*) reste stable dans le temps [A20; A29]. En accord avec les observations réalisées notamment chez l'homme adulte (Zoetendal, *et al.*, 1998, Vanhoutte, *et al.*, 2004), l'absence de variations temporelles du microbiote cæcal du lapin adulte illustre une remarquable stabilité de la composition microbienne dominante et indique que l'écosystème a atteint un équilibre.

III3. Structuration intra et inter individus de la communauté microbienne

Nos travaux n'ont pas permis de mettre en évidence l'existence d'un patron spécifique à chaque individu, stable dans le temps ou dans l'espace (différents compartiments)[A20]. En effet, la variabilité inter et intra individuelle des communautés bactériennes et archées sont de même ampleur [A20 ; A23]. Une forte variabilité inter individuelle de la composition de la communauté bactérienne a déjà été montrée chez le poulet (Wielen, *et al.*, 2002), cependant rares sont les études qui évaluent la variabilité intra individu (répétition d'un même individu dans le temps ou dans l'espace). Chez l'homme, un patron spécifique à chaque individu est retrouvé au sein des différents segments du colon (ascendant, descendant et transverse) (Zoetendal, *et al.*, 2002) ou au cours du temps dans les fèces (Zoetendal, *et al.*, 2002). L'absence de patron ou structure de la communauté bactérienne et archée spécifique de l'individu hôte chez le lapin pourrait trouver son origine dans la similarité génétique entre animaux issus de lignées sélectionnées et la forte standardisation des conditions d'élevage et d'alimentation. Ces paramètres tendraient à uniformiser l'influence de l'hôte sur la composition de sa communauté bactérienne.

IV. Implantation du microbiote et succession écologique des espèces

In utero, le tube digestif du lapereau est stérile, la colonisation débute dès la naissance au contact de la mère et de l'environnement immédiat (filrière génitale, tétée et proximité au nid). La mise en place des espèces est orchestrée en une succession écologique des espèces. Précédemment appréhendée par des techniques culturales, nous avons décrit pour la première fois cette succession écologique des espèces à l'aide d'outils moléculaires [A25 ; A36]. Dès deux jours d'âge, la densité bactérienne est élevée dans le cæcum (10^9 copies d'ARN 16S /g) puis atteint son maximum à 21 jours d'âge (10^{11} à 10^{12} copie d'ADNr 16S.g⁻¹)[A25]. A ce stade, le lapereau est encore allaité, mais a déjà débuté sa consommation d'aliment solide. Lors des premières semaines de vie, la communauté bactérienne du cæcum se compose à part égale de bactéries anaérobies strictes et facultatives, puis l'abondance de ces dernières diminue fortement jusqu'à disparaître après sevrage chez certains individus (Gouet & Fonty, 1979). Ainsi, les bactéries du groupe des *Bacteroides Prevotella*, (Gram négatives et anaérobies strictes) ont pu être détectées dès 2 – 3 jours d'âge (Kovács, *et al.*, 2006; [25]) pour atteindre son apogée à 21 jours d'âge (10^{10} - 10^{11} copies d'ADNr 16S.g-1 [A25]). Par ailleurs, 7 jours après la naissance, les archées sont présentes dans le cæcum à un niveau significatif (10^5 copies d'ADNr 16S/g [A25]). L'implantation des archées semble moins précoce que celle des bactéries puisqu'elle n'atteint sa densité maximum qu'à 35 jours d'âge (figure 16) [A25].

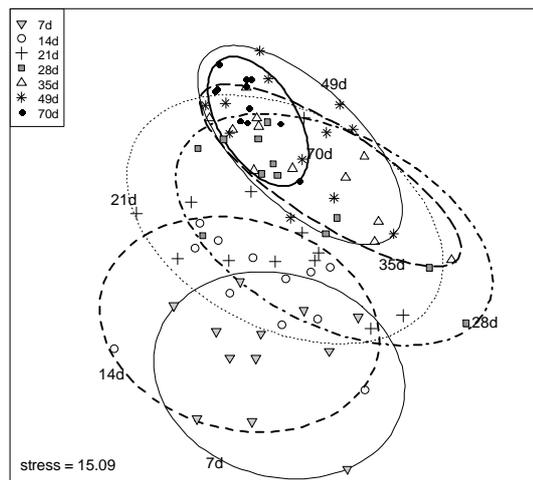


Figure 18 : Représentation graphique d'une analyse nMDS de la variabilité de la composition du microbiote en fonction de l'âge. Chaque point représente le microbiote d'un individu, plus les points sont proches plus les microbiotes sont similaires [A25]

Basée sur l'analyse des empreintes moléculaire (CE-SSCP), nous avons décrit pour la première fois chez le lapin et de manière plus complète que chez les autres espèces, la dynamique d'implantation de la communauté bactérienne présente dans le cæcum [A25]. Ainsi, la communauté bactérienne cæcale évolue progressivement avec une modification importante (shift) en termes de composition et d'abondance relative des espèces (figure 18). Cette évolution se traduit par la mise en place progressive d'une communauté de plus en plus complexe en termes de diversité et qui semble atteindre un état climacique à 70 jours d'âge [A25]. Une description plus fine de la communauté, réalisée récemment par pyroséquençage [A36], confirme cette évolution qui se traduit par une importante augmentation du ratio des phyla Bacteroidetes/Firmicutes (0,5 à 14 jours vs 35 à 80 jours). Le genre *Bacteroides* domine chez le jeune puis est progressivement

remplacé par des espèces non connues appartenant à des familles se classant dans l'ordre des Clostridiales et proches des Lachnospiraceae et des Ruminococcaceae. L'ensemble de ces résultats [A25, A36] nous permet de délimiter une fenêtre temporelle de forte variabilité liée au processus de mise en place du microbiote. Cette période pourrait correspondre à une période de permisivité pendant laquelle l'effet barrière du microbiote ou l'immunité de l'hôte, autoriseraient l'installation de nouvelles espèces, bénéfiques ou au contraire pathogènes pour l'hôte.

V. Réponses des communautés microbiennes à une perturbation

La santé digestive des lapereaux dépend en grande partie de l'équilibre de l'écosystème digestif. En effet, les animaux morbides présentent des profils fermentaires altérés (augmentation du pH et baisse de la concentration en AGV totaux, inversion du ratio propionate/butyrate) par rapport aux animaux sains (Kimse, 2009, Martignon, *et al.*, 2010). Aussi une meilleure connaissance de la capacité de réponse de l'écosystème digestif aux perturbations devrait permettre d'explorer des solutions pour mieux maîtriser les pathologies digestives. Chez le lapin, les perturbations étudiées ont concerné le changement du ratio amidon/fibres de l'aliment (Badiola, *et al.*, 2004; [A29]), l'ajout de probiotiques [A31], ou d'antibiotiques (Abecia, *et al.*, 2007b) ou encore l'inoculation de pathogènes (Dewrée, *et al.*, 2007, Martignon, *et al.*, 2010; [C50 ; C70]). En réponse à ces perturbations, l'écosystème peut alors (Ives & Carpenter, 2007) : i) rester constant, c'est-à-dire ne pas répondre aux perturbations ou de façon modérée. On parle alors de résistance, de persistance ou d'inertie de l'écosystème ; ii) être affecté par la perturbation mais retrouver son état initial. On parle alors de résilience ou d'homéostasie de l'écosystème ; iii) être affecté par la perturbation et ne pas retrouver son état initial. On parle alors de seuil de réversibilité pour étudier les limites de la capacité de réaction de l'écosystème (Ives & Carpenter, 2007). Nous avons étudié la dynamique des communautés bactériennes suite à une perturbation maintenue dans le temps, afin d'apprécier la réactivité et le temps d'adaptation nécessaire à un écosystème pour faire face aux nouvelles conditions qui lui sont imposées ou bien, au contraire d'évaluer son pouvoir de résistance à une perturbation. Nous avons montré que dans le cæcum, une augmentation modérée du ratio amidon/fibre (e.g. qui n'entraîne pas de signes cliniques de troubles digestifs) engendre des modifications de la communauté bactérienne (structure, quantité de bactéries). Elle s'accompagne d'une altération des paramètres physicochimiques et fermentaires. Ces modifications sont rapides, dès le deuxième jour d'application de la perturbation et se maintiennent durant les 39 jours d'application de la perturbation [A29]. L'écosystème semble avoir atteint rapidement un nouvel état d'équilibre.

VI. Conclusion sur les connaissances acquises

En conclusion, l'ensemble des travaux menés sur la caractérisation de l'écosystème cæcal du lapin a permis d'améliorer nos connaissances quant à la diversité, la structuration et la variabilité des communautés bactériennes et archées. En utilisant les techniques de microbiologie moléculaire nous avons montré que l'écosystème cæcal du lapin est composé majoritairement d'espèces non encore décrites et très spécifiques à cette espèce. La composition de la communauté microbienne diffère tout au long du tractus. Dans ce cadre, nous avons montré que les caecotrophes constituent un outil accessible pour le suivi de la dynamique du microbiote cæcal. La composition du microbiote varie peu entre individus d'un même environnement d'élevage et reste stable dans le temps. Toutefois, en cas de perturbation nutritionnelle, l'écosystème cæcal est capable de réagir et d'atteindre rapidement un nouvel état de stabilité. Enfin, l'étude de l'implantation du

microbiote a permis de décrire la dynamique d'implantation de la communauté bactérienne présente dans le cæcum. Cette évolution se traduit par la mise en place progressive d'une communauté de plus en plus complexe en termes de diversité et qui semble atteindre un état climacique après 49 jours d'âge. D'un point de vue méthodologique, la réalisation des empreintes moléculaires nous a permis de mieux comprendre la dynamique et la structuration des écosystèmes digestifs de nos modèles, et de définir notamment une période propice à leur manipulation dans une optique d'amélioration de la santé et de l'efficacité digestive. La maîtrise du pyroséquençage 454 puis du MiSeq, offre désormais la possibilité d'accéder à la diversité spécifique. Dans le cas du lapin, l'avancée est d'autant plus considérable que les espèces présentes n'ont fait l'objet que de rares investigations culturelles. La valorisation des résultats sur la caractérisation des écosystèmes digestifs dans les différentes espèces hôtes s'est notamment traduite pour ma part, par la rédaction de 26 articles (dont 4 en premier ou dernier auteur et 9 en second auteur) dont 6 en collaboration avec d'autres équipes de recherches (figure 19).

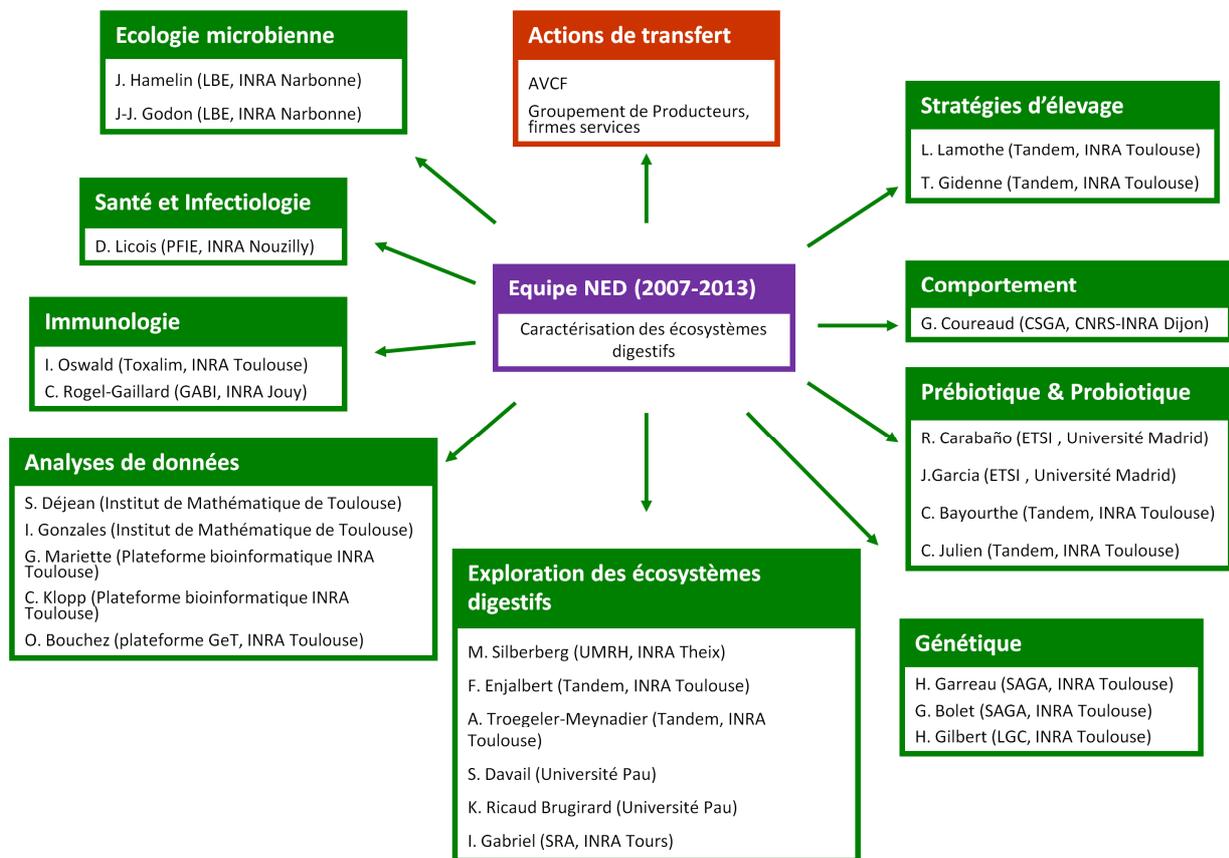


Figure 19 : Principales collaborations développées au cours du programme de recherche sur la caractérisation des écosystèmes digestifs (les affectations administratives sont celles en vigueur en 2013)

Compte tenu des connaissances disponibles, la caractérisation de l'écosystème digestif du lapin était une étape initiale et descriptive incontournable du projet de recherches puisqu'elle rend possible la recherche de facteurs de contrôle en toute connaissance de la variabilité spatiale temporelle et individuelle inhérente à l'écosystème. Dans un deuxième temps l'équipe NED a orienté son projet de recherches vers l'ingénierie écologique des écosystèmes digestifs pour l'optimisation des services écosystémiques. C'est dans ce cadre que s'inscrit désormais mon activité de recherche.

Partie 3. Perspectives de recherches : L'ingénierie écologique de l'écosystème digestif du lapin : une solution pour limiter les intrants médicamenteux, et améliorer la santé et l'efficacité digestives

L'ingénierie écologique se caractérise comme une approche pluridisciplinaire, intégrée et globale, basée sur la compréhension fine des éléments du fonctionnement des écosystèmes impliquant différents niveaux d'organisation. L'ingénierie écologique peut être définie comme étant l'application des principes de l'écologie et des disciplines d'ingénierie à la gestion de l'environnement. Appliquée aux écosystèmes microbiens digestifs, elle a pour but de façonner et stabiliser la diversité spécifique et fonctionnelle et les interactions avec l'hôte en tenant compte des environnements immédiat et historique de manière à optimiser les services écosystémiques.

Les services écosystémiques des fermenteurs digestifs en direction de l'hôte sont multiples et résultent de la coévolution de ces deux partenaires symbiotiques : nutrition de l'hôte, rôle trophique sur le tractus digestif de l'hôte, rôle de protection contre agents pathogènes, stimulation du système immunitaire inné et acquis. La manipulation ou ingénierie de l'écosystème digestif pour un service optimisé vers l'hôte constitue un challenge tant chez l'homme que chez les animaux. Afin d'améliorer l'efficacité digestive tout en préservant la santé, notre objectif est d'optimiser les services écosystémiques liés à la production de nutriments et à la mise en place et la stimulation du système immunitaire chez le lapin.

I. L'ingénierie écologique des écosystèmes digestifs selon 3 voies d'approche

Dans ce cadre, au sein de l'équipe NED (3 chercheurs impliqués pour le modèle lapin) nous proposons trois voies d'approche complémentaires: (i) orienter, manipuler précocement le microbiote chez le jeune animal (ii) d'autre part, moduler l'activité microbienne chez l'animal adulte et enfin (iii) agir sur les interactions avec l'hôte.

I1. Orienter précocement le microbiote

Chez le mammifère, la colonisation du tube digestif commence dès la naissance. En effet, à cette période de la vie de l'individu, il existe vraisemblablement peu ou pas de barrière à l'installation et au développement des microorganismes. Selon Curtis et Sloan (2004), la communauté digestive d'un nouveau né est un sous ensemble d'une méta communauté plus large comprenant toutes les espèces présentes dans l'environnement et capables d'investir le tractus digestif. Ainsi, des communautés initiales dont l'environnement est similaire, tel que le cæcum de lapins nouveau-nés, présentent des compositions différentes car elles sont formées par échantillonnage aléatoire issu de la méta-communauté qui les entoure (mère, litière, cage, air...). Nous avons montré [A25] que la composition du microbiote cæcal du lapereau était très variable entre individu et ce jusqu'à 49 jours d'âge (figure 18). Selon cette théorie, il existerait donc une grande part de hasard dans le processus d'acquisition du microbiote initial. A l'inverse, à 70 jours d'âge la composition du microbiote cæcal est plus homogène entre individus. Ces résultats permettent donc de définir une fenêtre d'action (0-49 jours) pendant laquelle la communauté n'est pas stabilisée et où il serait possible de modifier le microbiote.

Action sur les espèces pionnières

La part de hasard qui intervient dans la composition initiale du microbiote permet d'envisager une possibilité de manipulation au nid. La charge microbienne ou méta-communauté susceptible de servir de réservoir à la colonisation du tube digestif des lapereaux provient de la filière génitale de la lapine, du tractus digestif, de la fourrure (contact direct et poils déposés dans le nid) et des fèces dures qui sont déposées par la mère dans le nid et sont ingérées par les lapereaux (Moncomble, *et al.*, 2004, Kovács, *et al.*, 2006 ; [A36 ; C74]). L'influence de la mère allaitante sur la composition du microbiote cœcal des lapereaux a été démontrée par Abecia *et al* (2007a). Chez l'homme, la voie de naissance (par césarienne ou par voie basse), le type d'allaitement (lait maternel vs lait maternisé) ou l'utilisation d'antibiotique influencent la composition initiale du microbiote (Penders, *et al.*, 2006). Si la possibilité de manipulation de la composition initiale du microbiote est démontrée, l'influence de cette composition initiale sur la composition finale du microbiote et sur le service écosystémique rendu reste à valider.

Action sur la succession écologique des espèces

La forte variabilité intra groupe d'âge qui perdure jusqu'à 49 jours [A25] suggère qu'il existerait une variabilité entre les individus dans le patron de succession écologique des espèces. Par ailleurs, chez le lapin cette période recouvre également la période de sensibilité aux maladies digestives avec un indice de risque sanitaire élevé. Une hypothèse serait qu'il existe des patrons écologiques conférant une plus grande robustesse aux lapereaux et sécurisant ainsi les 3 semaines suivant le sevrage.

Action sur la dynamique

Nous avons montré que, quel que soit le microbiote de départ, le phénomène de succession écologique semble aboutir à des communautés d'une grande proximité entre individus à 70 jours [A25]. De ce fait, une voie d'action pourrait consister à accélérer le processus d'installation de manière à tendre plus rapidement vers une communauté climacique, c'est-à-dire stable, tel que chez l'adulte qui présente peu de problèmes digestifs.

12. Modulation de l'activité de l'écosystème digestif mature

Chez le lapin, l'écosystème peut être qualifié de mature ou stable au delà de 49 jours [A25 ; A36]. Dès lors l'ingénierie écologique de l'écosystème aura pour objectif la modification pérenne ou transitoire de la composition et/ou du fonctionnement d'un écosystème climacique. L'intérêt en production cunicole d'une telle manipulation concerne les lapins en fin d'engraissement dont on cherchera à améliorer l'efficacité digestive, les femelles futures reproductrices et les femelles reproductrices. En effet la manipulation du microbiote des lapines constituerait un levier d'action pour le contrôle de la transmission verticale du microbiote de la mère vers sa descendance.

13. Agir sur les interactions avec l'hôte

La mise en place et le fonctionnement du microbiote sont également sous la dépendance de l'hôte. En effet, l'hôte exerce un contrôle sur la succession écologique ou sur l'équilibre des populations (Hooper, *et al.*, 2012). Ces facteurs de contrôle sont liés, à l'état physiologie de l'hôte, la disponibilité qualitative et quantitative en nutriments endogènes, la capacité digestive des segments antérieurs, le pH et les conditions redox, la température, la motricité du tractus intestinal qui conditionne le temps de séjour des digesta, les sels biliaires et autres sécrétions

endogènes, la réponse immunitaire et enfin la présence de récepteurs chez l'hôte responsables des interactions (du dialogue) hôte-microbiote. L'ingénierie écologique pour l'optimisation du service écosystémique serait alors ciblée sur la manipulation de l'environnement de la communauté microbienne à savoir l'hôte lui-même ou de manière plus proche le biotope.

II. Les outils pour l'ingénierie écologique

L'ingénierie des écosystèmes digestifs suppose l'utilisation d'outils ayant une action validée ou présumée sur l'implantation, sur la diversité et l'équilibre des populations ou le fonctionnement de l'écosystème. Nous envisageons d'utiliser prioritairement l'alimentation, facteur essentiel, influençant l'équilibre des populations microbiennes du tube digestif. C'est un des leviers le plus efficace, rapide et le plus aisé à mettre en œuvre en élevage. Ce levier sera décliné en terme de qualité des fibres et d'utilisation d'additifs (prébiotiques, phéromone). L'ingénierie concernera également l'ensemencement de communautés microbiennes complexes ou le déplacement des équilibres de population en utilisant l'inoculation ou le comportement de coprophagie chez le lapereau. Enfin les leviers génétiques et environnementaux seront également considérés.

II.1. L'alimentation

L'aliment conditionne la fourniture de nutriments et d'énergie à l'écosystème. Au cours de la biodégradation de l'aliment, il agit sur les paramètres physicochimiques du milieu tel que le pH, le potentiel redox, les concentrations en métabolites, la taille et la densité des particules. En retour, ces paramètres conditionnent l'équilibre des communautés microbiennes (Fonty & Chaucheyras-Durand, 2007). Au sein de l'équipe, nous nous sommes dans un premier temps focalisés sur le niveau d'ingestion et l'apport en fibres qui ont largement démontré leur efficacité dans la réduction des troubles digestifs chez le lapin [B5]. La restriction du niveau d'ingestion est un des moyens non-médicamenteux, les plus efficaces pour lutter contre les entéropathies non spécifiques (c'est-à-dire non liées à un pathogène avéré) du lapin [B5]. Bien que les mécanismes d'action de la restriction alimentaire restent à élucider et que l'implication du microbiote digestif n'a pas pu être démontrée (Gidenne et Feugier, 2009 ; [A16 ; A22]) cette pratique est très bien maîtrisée par les professionnels de la filière.

Les fibres

La quantité et la qualité des différentes fractions fibreuses de l'aliment est un outil efficace d'ingénierie du fermenteur digestif du lapin. En effet, l'équipement enzymatique de l'hôte ne permet pas d'hydrolyser les constituants des parois végétales (lignines, celluloses, hémicelluloses, pectines etc). Les fibres alimentaires parviennent ainsi très peu modifiées dans le cæcum et constituent la principale source de carbone pour le microbiote (70 % de la matière sèche en sortie du segment iléal, Gidenne, 1992).

Une réduction du taux de fibres (fraction NDF, ADF et ADL) entraîne des altérations du profil fermentaire (réduction de la concentration en AGV et de la proportion d'acétate) et une modification de la structure de la communauté bactérienne du cæcum [A29]. La qualité des fibres est un facteur prépondérant. Les fractions plus digestibles des fibres (pectines et hémicelluloses) stimulent l'activité fibrolytique et la production d'AGV dans le cæcum (García, *et al.*, 2002) et aurait un effet favorable sur la santé digestive du lapereau (Trocino, *et al.*, 2013). L'inclusion de fibres solubles dans l'eau que l'on peut estimer par le critère NDSF, issues notamment de pulpe de

betterave, stimulent fortement l'activité microbienne cœcale et diminuent également la mortalité et modifieraient favorablement la muqueuse intestinale. Par contre, l'influence du taux de NDSF sur la structure du microbiote cœcal reste controversée (Gómez-Conde, *et al.*, 2007, Gómez-Conde, *et al.*, 2009).

Les prébiotiques

Au sein de l'équipe, les travaux relatifs à l'utilisation de prébiotiques, ingrédient alimentaire non digestible qui affecte positivement l'hôte en stimulant sélectivement la croissance et/ou l'activité d'une ou d'un nombre limité de bactéries intestinales (Gibson & Roberfroid, 1995), sont pour l'instant peu nombreux et résultent d'échanges ponctuels avec l'Espagne (ETSI, Université de Madrid) [C71] et la Hongrie (Université de Kaposvar). En dépit de résultats contradictoires y compris pour un même type de prébiotique (pour revue Falcao-e-Cunha, *et al.*, 2007), attribués aux facteurs expérimentaux très variables, mais également au fait que l'alimentation du lapin riche en fibres peut contenir diverses fractions fibreuses très fermentescibles mal contrôlées lors de la formulation des aliments. De récentes études [C71] montrent un intérêt particulier pour les manno-oligosaccharides (MOS) et les β -glucanes. Récemment, un effet des MOS sur la structure de la muqueuse a été observé avec une augmentation de la taille des villosités iléales (Mourao, *et al.*, 2006). Une modification de la composition du microbiote cœcal et iléal a également été décrite suite à une supplémentation en MOS ou en β -glucane ou une combinaison des deux [C71].

Les probiotiques

Concernant les probiotiques, micro-organismes vivants, utilisés comme additif alimentaire, nos travaux se sont ciblés sur l'utilisation de la levure *Saccharomyces cerevisiae* [A31]. Dans le cæcum, le potentiel redox du milieu cœcal augmente avec la présence de levures vivantes [A31]. En parallèle, ni la concentration en AGV ni le pH cœcal ne varient. La structure de la communauté bactérienne n'est pas significativement modifiée par la présence de levures vivantes. L'indice de biodiversité de la communauté bactérienne cœcale tendrait à s'accroître [A31]. En parallèle, on peut observer une meilleure santé digestive du lapereau selon les conditions initiales d'élevage. C'est actuellement l'un des deux seuls probiotiques autorisés en cuniculture. Globalement, l'intérêt de l'addition de levures vivantes chez le lapin en engraissement reste limité, leur action avant sevrage est une piste d'étude intéressante à envisager.

La phéromone mammaire

La phéromone mammaire est un composé volatil aldéhydique, le 2-méthyl-2-buténal, présent dans le lait (Coureaud, *et al.*, 2003, Schaal, *et al.*, 2003) qui joue un rôle clé dans le succès de tétée du nouveau-né. Elle déclenche immédiatement et sans apprentissage le comportement typique de recherche-saisie orale normalement exprimé pendant l'allaitement. La phéromone mammaire n'est pas qu'un déclencheur du comportement de tétée mais aussi un facilitateur d'apprentissage olfactif chez le nouveau-né (Coureaud, *et al.*, 2010). Dans le contexte d'allaitement, la phéromone mammaire pourrait ainsi permettre au lapereau d'apprendre des odeurs portées par le corps de la mère un jour donné, dans l'optique de se préparer aux choix alimentaires autonomes après sortie du nid et au sevrage. L'odorisation directe des granulés commerciaux avec la phéromone mammaire sans apprentissage n'a pas entraîné d'élévation d'ingestion entre 3 et 21 jours d'âge [C73]. Des essais visant à tester le rôle des apprentissages néonataux sur l'ingestion solide de

granulé enrichi en odeurs préalablement apprises, et ainsi faciliter la transition alimentation lactée–alimentation solide, pourraient être envisagés.

II3. Implantation d'une communauté microbienne complexe ou déplacement d'équilibre des populations

Les outils permettant l'implantation de communauté microbienne complexe ou le déplacement d'équilibre seront également envisagés dans notre équipe. Il s'agit de l'utilisation de l'inoculation *per os* de communautés plus ou moins complexes et contrôlées ou de l'utilisation de la coprophagie mis en évidence récemment par plusieurs auteurs (Moncomble, *et al.*, 2004, Kovács, *et al.*, 2006) et quantifié plus précisément par notre équipe [A36, C74]. En effet, la lapine excrète des fèces dures au moment de l'allaitement qui sont ingérées par les lapereaux au nid. L'ensemble des études s'accordent autour d'une quantité excrétée de 2-3 fèces par jour, sur les 6 premiers jours, qui suivent la mise bas avec toutefois une forte variabilité de l'émission (5 % des femelles n'excrètent aucune crotte tandis que 20% ont une excrétion supérieure à 6 fèces par jour). Parallèlement, l'ingestion de fèces par les lapereaux démarre dès les 2-3 premiers jours (<1 fèces pour une portée de 10), plafonne autour du 10ème jour (1-2 fèces par jour et par portée) et se poursuit jusqu'à 20 jours. Ce comportement naturel semble constituer un vecteur de transmission du microbiote de la mère vers les petits et compenserait ainsi le faible temps de contact entre la mère et les lapereaux (un seul allaitement par jour d'une durée de 3 à 5 minutes ; Zarrow, *et al.*, 1965, González-Mariscal, 2007). Il permettrait un ensemencement dirigé et précoce du tube digestif dès les premiers jours de vie. En effet, la privation de ce comportement retarde la dynamique d'implantation du microbiote et entraîne une augmentation de la mortalité [A36, C68]. Le comportement de coprophagie est un outil prometteur qui devra être validé en condition d'élevage commercial et sera largement utilisé dans les programmes de recherches de notre équipe notamment dans le cadre de l'étude de la rupture de la transmission des gènes bactériens d'antibiorésistance de la mère vers sa descendance par O. Zemb.

III. Hypothèse d'une optimisation de la mise en place et du fonctionnement du système immunitaire par le contrôle de la succession écologique des espèces via une alimentation précoce

L'ingénierie écologique de l'écosystème digestif du lapin constitue un vaste terrain d'investigation qui au sein de l'équipe constitue le programme de recherches de 2 autres chercheurs (T. Gidenne et O. Zemb). Dans le cadre de mon programme de recherche je souhaite prioriser mes actions sur la santé du lapereau autour du sevrage. Dans ce cadre, je focaliserai mon activité de recherche sur l'ingénierie de l'écosystème pour l'optimisation de la maturation du système immunitaire. Sachant que la maturation du système immunitaire digestif est sous la dépendance forte du microbiote digestif, on peut faire l'hypothèse que la stimulation précoce de l'activité microbienne ou l'accélération des processus d'implantation via une alimentation solide précoce pourrait renforcer l'immunité du lapereau ou l'installer plus rapidement. A court terme et en collaboration avec T. Gidenne et G. Coureaud, je souhaite poursuivre les travaux démarrés au laboratoire et qui concernent l'ingestion d'aliment précoce dans le nid [C73]. L'objectif étant de stimuler l'ingéré solide et donc de stimuler ou orienter la maturation de l'écosystème digestif, sans toutefois stopper l'ingestion de lait.

C. Actions d'animations de formation et de valorisation

Aidé de deux collaborateurs, L. Cauquil (AI) et B. Gabinaud (TR), nous réalisons l'ensemble des travaux de recherches sur la qualité de la viande et de la carcasse de lapin. En dépit de la taille restreinte de l'équipe que nous formions avec J.P. Doutreloux (MC, STAPS université de Toulouse), j'ai eu la possibilité de fédérer une équipe de chercheur d'horizons divers autour de notre thématique (figure 14).

Dans le cadre de mon changement thématique associé à la 1^{ère} restructuration de mon unité, en parallèle de ma thématique de recherche, j'ai pris en charge pour l'équipe NED, les développements méthodologiques et j'ai animé le groupe de microbiologie moléculaire (1 MC puis 1CR, 1MC, 1AI, 1TR) associé à l'exploration des microbiotes digestifs (modèle vache et lapin). J'avais en charge les orientations scientifiques et techniques des activités du groupe de microbiologie moléculaire. Les développements méthodologiques que j'ai encadrés ont contribué à une avancée importante de notre équipe au sein de la communauté scientifique s'intéressant aux communautés microbiennes. Ce point a été relevé par la commission AERES lors de la dernière évaluation en 2009-2010. Basées sur les gènes marqueurs de la diversité microbienne (petite sous unité 16S de l'ARN ribosomique), ces techniques concernent les procédures d'extraction de l'ADN par rapport à nos matrices, une technique d'empreinte moléculaire de la communauté bactérienne qui permet d'obtenir une image des espèces dominantes de la communauté bactérienne (CE SSCP), des techniques de quantification ciblées de certaines populations bactériennes ou archées par PCR en temps réel utilisant différents systèmes de détection (SYBR ou TaqMan). Nous avons développé une méthode de pyroséquençage (454 Roche puis MiSeq Illumina) permettant de caractériser la diversité spécifique d'une centaine d'écosystèmes digestifs en parallèle. Le développement de cette technique a nécessité un effort important en bioinformatique et en statistique pour mettre en place un pipeline d'analyse informatique et statistique répondant à nos besoins.

A l'occasion de la 2^{ème} restructuration de notre unité de recherches qui se traduit par son intégration dans l'unité GenPhySE (figure 19), j'ai été sollicitée pour animer l'équipe NED (Nutrition et Ecosystèmes Digestifs) à la suite de T. Gidenne. L'équipe NED a été créée en janvier 2007 (figure 2) et regroupe du personnel localisée sur 3 sites : l'INRA (7 personnes), l'ENSAT (1 personne), et l'ENVT (5 personnes). L'équipe est actuellement composée de 7 chercheurs, IR ou enseignants chercheurs (4,6 ETP), 6 personnels techniques et 2 doctorants (tableau 6). Le travail d'animation de T. Gidenne s'est traduit par une production scientifique de notre unité de haut niveau ainsi qu'une reconnaissance de notre travail par l'AERES et au niveau national. Outre les missions administratives dont je devrai m'acquitter, mon objectif en tant qu'animatrice de l'équipe est de maintenir ce niveau et de stimuler plus encore le travail collaboratif et l'innovation. Cette nouvelle dimension managériale scientifique implique pour ma part de nouvelles activités. Il s'agit d'organiser les réflexions et les discussions au sein de l'équipe, dans le cadre de la politique de l'unité, des départements et des organismes de tutelle. Il s'agira également de porter le projet pour l'équipe d'en assurer la promotion et la valorisation en interne (autres équipes, transversalités, Collège de Direction) et externe (AERES, institutionnel, professionnel, ...). D'un point de vue des ressources humaines, je veillerai à faire progresser et valoriser au mieux les compétences de chacun. Enfin, dans le cadre de la politique budgétaire de l'unité je m'attacherai à

organiser les discussions permettant de définir les priorités pour la gestion des moyens et des besoins de l'équipe.

Tableau 6 : Personnel de l'équipe NED au 1 janvier 2014

Fonction	Effectif et personnes	ETP
Chercheurs	2 : T. Gidenne (DR2), O. Zemb (CR2)	1,5
Enseignants chercheurs	3 : C. Bayourthe (PR2), F. Enjalbert (PR2), A. Troegeler (MC)	1,5
IR et IE	3 : S. Combes (IR1), Y. Farizon (IE), G. Pascal (IR2)	2,6
AI, TR, AGT	5 : L. Cauquil (AI), B. Gabinaud (TR), M.L. Chemit (TR), M. Ségura (AI), JP Vergne (AGT)	3,7
Doctorants	2 : C. Knudsen, V. Jacquier	2
Titulaires de l'HDR	4 : C Bayourthe, F Enjalbert, T Gidenne, G Pascal	2,3

En ce qui concerne la formation par la recherche et le transfert de connaissances, j'ai assuré l'encadrement de stagiaires de premier cycle (4 stagiaires), de second cycle (8 stagiaires) et suis fortement impliquée dans celui de doctorants (co-direction et co-encadrement de thèse, comité de pilotage). Je donne un cours sur la qualité de la viande et de la carcasse dans le cadre d'un cursus de formation continue : Cours Francophone de Cuniculture (3h de cours + 3 h de TP). J'ai organisé des formations internes en réponse aux besoins de l'unité (logiciel de statistique R et de gestion des références bibliographiques WoK et Endnote). Les formations que j'ai organisées pour les collaborateurs de mon unité répondent à des besoins précis et ponctuels.

J'ai à cœur de transférer les connaissances acquises au sein du laboratoire et dans la communauté scientifique en direction des professionnels de la filière cunicole. Je profite ainsi des Journées de la Recherche Cunicole, congrès bisannuels, pour présenter des communications courtes (12 communications en premier auteur) ainsi que des synthèses (4 en premier auteur) sur des sujets en adéquation avec les préoccupations des acteurs de la filière. J'ai par ailleurs été membre du comité scientifique des Journées de la Recherche Cunicole, responsable de la session qualité de la viande et de la carcasse de 2003 à 2007.

Mon investissement pour des actions au niveau du collectif se traduit par ma participation au conseil de gestion de centre en tant que membre élu représentant du personnel. A ce titre, je fais partie du groupe de travail pour la mise en place du Plan de Déplacement d'Administration qui a notamment pour objectif de limiter l'utilisation de véhicule pour les déplacements domicile-travail mais également professionnels. Je suis membre nommé au conseil de gestion de département. Enfin, je suis membre de deux associations scientifiques l'ASFC (Association Scientifique Française de Cuniculture, branche française de la World Rabbit Association) et de l'AFEM (Association Française d'Ecologie Microbienne).

D. Conclusion générale

L'enjeu majeur pour les productions animales est de développer des systèmes d'élevages innovants pour préserver la santé des animaux et limiter, voire s'affranchir, de l'utilisation d'intrants médicamenteux tout en garantissant un niveau et une qualité de production satisfaisantes. Les programmes de recherches que j'ai menés s'inscrivent dans cet enjeu. La première partie de mes activités de recherche était consacrée à la qualité de la viande et de la carcasse de lapin. La seconde avait pour objectif général, la caractérisation de l'écosystème digestif dans le but d'une meilleure maîtrise de la santé. Mon projet actuel a pour ambition de dépasser les approches descriptives, qui étaient un préalable incontournable, pour aller vers de l'ingénierie écologique des écosystèmes digestifs toujours dans le même but d'optimisation des services écosystémiques que sont, la santé et l'efficacité digestive. Au travers de l'ensemble de ces thématiques, je me suis attachée à répondre à des questionnements ou des préoccupations des professionnels de la filière. J'ai mené l'ensemble des mes activités de recherches dans une démarche analytique classique. Toutefois, ma participation à l'axe transversal SYSED (Système et d'Elevage Durable), qui a évolué en équipe dirigée par L. Lamothe au sein de GenPhySE, a contribué à une évolution dans les objectivations de mon travail de recherche. La finalité n'est pas une justification du travail scientifique mais elle le pilote. C'est dans ce sens que ce mémoire a été rédigé.

D'un point de vue méthodologique, mon activité a permis des apports conséquents tant d'un point de vue de la qualité de la viande et de la carcasse (mise au point de mesures rhéologiques objectives, validation de leur pouvoir discriminant et de leur capacité à rendre compte d'un jugement sensoriel) que de la caractérisation de la diversité spécifique des écosystèmes digestifs en utilisant les techniques de microbiologie moléculaire les plus récentes (pyroséquençage en multiplexage sur plateforme Illumina).

Mon activité de recherche sur la qualité de la viande et de la carcasse a apporté de nouvelles connaissances sur la physiologie du muscle et notamment l'adaptation à l'exercice chez le lapin. D'un point de vue appliqué, mes travaux ont permis d'apprécier les conséquences de certaines pratiques d'élevage (rajeunissement de l'âge d'abattage, logement, alimentation) sur la qualité technologique, sensorielle et nutritionnelle de la viande et de la carcasse. L'ensemble des travaux menés sur la caractérisation de l'écosystème cæcal du lapin a permis d'améliorer nos connaissances quant à la diversité, la structuration, la variabilité et la résilience des communautés bactériennes et archées. L'étude de l'implantation du microbiote a permis de décrire la dynamique d'implantation de la communauté bactérienne présente dans le cæcum. Ces connaissances permettent désormais de s'inscrire dans une démarche plus proactive de contrôle de l'écosystème digestif.

Mon activité de recherches a contribué au maintien et au développement de l'expertise de notre unité sur la qualité de la viande de lapin et aux avancées de l'équipe NED. Ces avancées résultent du dynamisme de l'équipe « qualité », puis du groupe microbiologie moléculaire que j'ai animé. Le travail accompli résulte également de l'activité de stagiaires et de doctorants que j'ai pu encadrer ou co-encadrer. D'un point de vue personnel, je pense avoir réussi l'appropriation d'un environnement de travail en écologie microbienne en constante évolution tout en conservant une

certaine expertise sur la qualité des produits. Grâce à la réalisation d'un effort important de formation et la construction d'un réseau de collaboration solide, je suis devenue une physiologiste en expérimentation animale « hybride », capable de passer des prélèvements de contenus digestifs, à l'élaboration de pipeline pour l'exploitation des résultats de séquençage haut débit ; j'analyse et j'interprète aussi bien des données de phénotypage fin que des grands jeux de données NGS (Next Generation Sequencing). Cette mutation me permet entre autre d'être chairman dans un congrès COST de statistique (3rd StatSeq Workshop COST TD0801, 2011) mais également de faire une synthèse bibliographique en direction des professionnels de la filière. Ma nomination en tant qu'animatrice de l'équipe NED au sein de GenPhySE constitue un défi que je souhaite relever. Il s'agira de maintenir le niveau scientifique de l'équipe, et de fédérer l'équipe autour de notre projet commun d'ingénierie des écosystèmes digestifs.

L'obtention de l'HDR intervient dans une période charnière de ma carrière où la part de temps consacrée à l'encadrement de la recherche est de plus en plus importante. Ainsi, mon implication dans l'encadrement des doctorants et post-doctorants, ainsi que ma nomination en tant qu'animatrice de l'équipe NED justifie ma candidature à l'Habilitation à Diriger des Recherches.

E. Références bibliographiques

- Abecia L, Fondevila M, Balcells J & McEwan NR (2007a) The effect of lactating rabbit does on the development of the caecal microbial community in the pups they nurture. *J. Appl. Microbiol.* 103: 557-564.
- Abecia L, Fondevila M, Balcells J, Edwards JE, Newbold CJ & McEwan NR (2005) Molecular profiling of bacterial species in the rabbit caecum. *FEMS Microbiol. Lett.* 244: 111-115.
- Abecia L, Fondevila M, Balcells J, Edwards JE, Newbold CJ & McEwan NR (2007b) Effect of antibiotics on the bacterial population of the rabbit caecum. *FEMS Microbiol. Lett.* 272: 144-153.
- Badiola I, Perez de Rozas AM, Roca M, Carabaño R, Gomez M, Garcia J & Blas Cd (2004) Characterization of the microbial diversity of rabbit intestinal tract by restriction fragment length polymorphism. ed.), p. 746-751. Pueblo, Mexico.
- Belenguer A, Fondevila M, Balcells J, Abecia L, Lachica M & Carro MD (2011) Methanogenesis in rabbit caecum as affected by the fermentation pattern: in vitro and in vivo measurements. *World Rabbit Sci* 19: 75-83.
- Bennegadi N, Fonty G, Millet L, Gidenne T & Licois D (2003) Effects of age and dietary fibre level on caecal microbial communities of conventional and specific pathogen-free rabbits. *Microbial Ecology in Health and Disease* 5: 23-32.
- Blasco A & Ouhayoun J (1993) Harmonization of criteria and terminology in rabbit meat research. *World Rabbit Sci* 4: 93-99.
- Boadi D, Benchaar C, Chiquette J & Masse D (2004) Mitigation strategies to reduce enteric methane emissions from dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* 84: 319-335.
- Boulahrouf A, Fonty G & Gouet P (1991) Establishment, counts and identification of the fibrolytic bacteria in the digestive tract of rabbit. Influence of feed cellulose content. *Curr. Microbiol.* 22: 1-25.
- Braine A (2006) Le marché cunicole français. *Journée Nationale ITAVI sur l'élevage du lapin de chair Proceedings* (ITAVI,ed),pp: 1-13.Pacé (France).
- Cabanes-Roiron A & Ouhayoun J (1994) Précocité de croissance des lapins. Influence de l'âge à l'abattage sur la valeur bouchère et les caractéristiques de la viande de lapins abattus au même poids vif. *6èmes Journ. Rech. Cunicole Fr. Proceedings* 2: pp: 385-391.La Rochelle.
- Cantier J, Vezinhet A & Rouvier R (1969) Allométrie de croissance chez le lapin. I.- Principaux organes et tissus. *Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* 9: 271-292.
- Case RJ, Boucher Y, Dahllorf I, Holmstrom C, Doolittle WF & Kjelleberg S (2007) Use of 16S rRNA and rpoB Genes as Molecular Markers for Microbial Ecology Studies. *Appl. Environ. Microbiol.* 73: 278-288.
- Chevance A & Moulin G (2012) Suivi des ventes de médicaments vétérinaires contenant des antibiotiques en France en 2011. (Ministère de l'Agriculture de l'Alimentation de la Pêche et des Affaires Rurales, ed.), p. 38. Anses - ANMV, Maisons-Alfort, France.<http://www.anses.fr/Documents/ANMV-Ra-Antibiotiques2011.pdf>.
- Coureaud G, Langlois D, Perrier G & Schaal B (2003) A single key-odorant accounts for the pheromonal effect of rabbit milk: further test of the mammary pheromone's activity against a wide sample of volatiles from milk. *Chemoecology* 13: 187-192.
- Coureaud G, Charra R, Datiche F, Sinding C, Thomas-Danguin T, Languille S, Hars B & Schaal B (2010) A pheromone to behave, a pheromone to learn: the rabbit mammary pheromone. *J. Comp. Physiol., A* 196: 779-790.

- Coutelet G (2013) Résultats technico-économiques des éleveurs de lapins de chair en France en 2012. *15èmes Journées de la Recherche Cunicole Proceedings* (Bolet G,ed),pp: 111-114.Le Mans, France.
- Dalle Zotte A (2002) Perception of rabbit meat quality and major factors influencing the rabbit carcass and meat quality. *Livest. Prod. Sci.* 75: 11-32.
- Dalle Zotte A & Ouhayoun J (1995) Post-weaning evolution of muscle energy metabolism and related physico-chemical traits in the rabbit. *Meat Sci.* 39: 395-401.
- Dalle Zotte A, Ouhayoun J, Parigi Bini R & Xiccato G (1996) Effect of age diet and sex on muscle energy metabolism and on related physicochemical traits in rabbit. *Meat Sci.* 43: 15-24.
- Deng W, Xi D, Mao H & Wanapat M (2008) The use of molecular techniques based on ribosomal RNA and DNA for rumen microbial ecosystem studies: a review. *Mol. Biol. Rep.* 35: 265-274.
- Dewrée R, Meulemans L, Lassence C, Desmecht D, Ducatelle R, Mast J, Licois D, Vindevogel H & Marlier D (2007) Experimentally induced epizootic rabbit enteropathy: clinical, histopathological, ultrastructural, bacteriological and haematological findings. *World Rabbit Sci* 15: 91-102.
- Ducluzeau R (1969) Influence de l'espèce zoologique sur la microflore du tractus digestif. *Revue d'Immunologie* 33: 345-384.
- Falcao-e-Cunha L, Castro-Solla L, Maertens L, Marounek M, Pinheiro V, Freire J & Mourao JL (2007) Alternatives to antibiotic growth promoters in rabbit feeding: A review. *World Rabbit Sci* 15: 127-140.
- Fonty G & Chaucheyras-Durand F (2007) *Les écosystèmes digestifs*. Paris, France.
- Forsythe SJ & Parker DS (1985) Nitrogen metabolism by the microbial flora of the rabbit. *J. appl. Bacteriol.* 58: 363-369.
- Franz R, Soliva CR, Kreuzer M, Hummel J & Clauss M (2011) Methane output of rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) and guinea pigs (*Cavia porcellus*) fed a hay-only diet: Implications for the scaling of methane production with body mass in non-ruminant mammalian herbivores. *Comp. Biochem. Physiol., A: Mol. Integr. Physiol.* 158: 177-181.
- Fromin N, Hamelin J, Tarnawski S, Roesti D, Jourdain-Miserez K, Forestier N, Teyssier-Cuvette S, Gillet F, Aragno M & Rossi P (2002) Statistical analysis of denaturing gel electrophoresis (DGE) fingerprinting patterns. *Environ. Microbiol.* 4: 634-643.
- García J, Gidenne T, Falcao-e-Cunha L & Blas Cd (2002) Identification of the main factors that influence caecal fermentation traits in growing rabbits. *Anim. Res.* 51: 165-173.
- Gibson G & Roberfroid M (1995) Dietary modulation of the human colonic microbiota: introducing the concept of prebiotics. *The Journal of Nutrition* 125: 1401-1412.
- Gidenne T (1992) Effect of fibre level, particle size and adaptation period on digestibility and rate of passage as measured at the ileum and in the faeces in the adult rabbit. *Brit J Nutr* 67: 133-146.
- Gidenne T, Aubert C, Drouilhet L & Garreau H (2013) L'efficacité alimentaire en cuniculture: impacts technico-économiques et environnementaux. *15èmes Journées de la Recherche Cunicole Proceedings* (Bolet G,ed),pp: 1-13.Le Mans, France.
- Gittins R (1985) *Canonical Analysis, a review with applications in ecology*. Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- Gómez-Conde MS, de Rozas AP, Badiola I, Pérez-Alba L, de Blas C, Carabaño R & García J (2009) Effect of neutral detergent soluble fibre on digestion, intestinal microbiota and performance in twenty five day old weaned rabbits. *Livest Sci* 125: 192-198.
- Gómez-Conde MS, Garcia J, Chamorro S, Eiras P, Rebollar PG, Perez de Rozas A, Badiola I, de Blas C & Carabaño R (2007) Neutral detergent-soluble fiber improves gut barrier function in twenty-five-day-old weaned rabbits. *J. Anim. Sci.* 85: 3313-3321.

- Gondret F, Mourot J & Bonneau M (1998) Comparison of intramuscular adipose tissue cellularity in muscles differing in their lipid content and fiber type composition during rabbit growth. *Livest. Prod. Sci.* 54: 1-10.
- Gondret F, Lefaucheur L, D'Albis A & Bonneau M (1996) Myosin isoform transitions in four rabbit muscles during postnatal growth. *J. Muscle Res. Cell Motil.* 17: 657-667.
- González-Mariscal G (2007) Mother rabbits and their offspring: Timing is everything. *Dev. Psychobiol.* 49: 71-76.
- Gonzalez I, Déjean S, Martin P & Baccini A (2008) CCA: an R package to extend canonical correlation analysis. *Journal of Statistical Software* 23: 1-14.
- Gouet P & Fonty G (1973) Evolution de la microflore digestive du lapin holoxénique de la naissance au sevrage. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.* 13: 733-735.
- Gouet P & Fonty G (1979) Changes in the digestive microflora of holoxenic rabbits from birth until adulthood. *Ann. Biol. Anim. Bioch. Biophys.* 19: 553-566.
- Hernandez P, Pla M, Oliver MA & Blasco A (2000) Relationships between meat quality measurements in rabbits fed with three diets of different fat type and content. *Meat Sci.* 55: 379-384.
- Honikel KO (1998) Reference methods for the assessment of physical characteristics of meat. *Meat Sci.* 49: 447-457.
- Hooper LV, Littman DR & Macpherson AJ (2012) Interactions Between the Microbiota and the Immune System. *Science* 336: 1268-1273.
- Ives AR & Carpenter SR (2007) Stability and diversity of ecosystems. *Science* 317: 58-62.
- Jehl N & Juin H (1999) Effet de l'âge d'abattage sur les qualités sensorielles de la viande de lapin. *8èmes Journ. Rech. Cunicole Fr. Proceedings* (Perez JM,ed),pp: 85-88.Paris.
- Jones WJ, Nagle DP & Whitman WB (1987) Methanogens and the diversity of archaeobacteria. *Microbiol Rev* 51: 135-177.
- Kimse M (2009) Caractérisation de l'écosystème caecal et santé digestive du lapin : contrôle nutritionnel et interactions avec la levure probiotique *Saccharomyces cerevisiae*. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Kimsé M, Monteils V, Bayourthe C & Gidenne T (2009) A new method to measure the redox potential (Eh) in rabbit caecum: relationship with pH and fermentation pattern. *World Rabbit Sci* 17: 63-70.
- Kovács M, Szendrő Z, Milisits G, Biro-Nemeth E, Radnai I, Posa R, Bónai A, Kovács F & Horn P (2006) Effect of nursing method and faeces consumption on the development of bacteroides, lactobacillus and coliform flora in the caecum of the newborn rabbits. *Reprod Nutr Dev* 46: 205-210.
- Kušar D & Avguštin G (2010) Molecular profiling and identification of methanogenic archaeal species from rabbit caecum. *FEMS Microbiol. Ecol.* 74: 623-630.
- Le Cren D (2006) Analyse de la consommation du lapin en France et Actions de promotion du CLIPP. *Journée Nationale ITAVI sur l'élevage du lapin de chair Proceedings* (ITAVI,ed),pp: 26-35.Pacé (France).
- Lepetit J & Culioli J (1994) Mechanical properties of meat. *Meat Sci.* 36: 203-237.
- Leterrier C & Nys Y (1992) Composition, cortical structure and mechanical properties of chicken tibiotarsi : effect of growth rate. *British Poultry Science* 33: 925-939.
- Licois D & Marlier D (2008) Pathologies ingectieuse du lapin en élevage rationnel. *INRA Prod. Anim.* 21: 257-268.
- Mackie RI (2002) Mutualistic Fermentative Digestion in the Gastrointestinal Tract: Diversity and Evolution. *Integr. Comp. Biol.* 42: 319-326.
- Marshall B, Ochieng D & Levy S (2009) Probing the role of commensals in propagating antibiotic resistance should help preserve the efficacy of these critical drugs. *Microbe Magazine* 4: 231-238.

- Martignon MH, Reperant E & Valat C (2010) Digestive response of young rabbits to an experimental reproduction of colibacillosis according to two feeding strategies. *The Prato Conference on the Pathogenesis of Bacterial Diseases of Animals Proceedings* pp. Monash Prato Campus, Prato, Italy.
- Martin (2001) *Apports nutritionnels conseillés pour la population française*. Paris, France.
- Moncomble AS, Quenedey B, Coureaud G, Langlois D, Perrier G & Schaal B (2004) Newborn rabbit attraction toward maternal faecal pellets. *International Society for Developmental Psychobiology, 37th annual meeting Proceedings* (Barr G,ed),45: pp: 277. Aix-en-Provence, France.
- Mourao JL, Pinheiro V, Alves A, Guedes CM, Pinto L, Saavedra MJ, Spring P & Kocher A (2006) Effect of mannan oligosaccharides on the performance, intestinal morphology and cecal fermentation of fattening rabbits. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126: 107-120.
- Moussa M, Babilé R, Fernandez X & Rémygnon H (2007) Biochemical and biomechanical properties of tendons in two commercial types of chickens. *Animal* 1: 983-988.
- Ouhayoun J (1988) Influence des conditions d'abattage sur la qualité de la viande de lapin. *Cuniculture* 80: 86-91.
- Ouhayoun J (1989) La composition corporelle du lapin : Facteurs de variation. *INRA Prod. Anim.* 2: 215-226.
- Ouhayoun J (1990) Abattage et qualité de la viande de lapin. *5èmes Journées de la Recherche Cunicole Proceedings II*: pp: 1-21. Paris.
- Ouhayoun J & Dalle Zotte A (1996) Harmonization of muscle and meat criteria in rabbit meat research. *World Rabbit Sci* 4: 211-218.
- Ouhayoun J, Delmas D & Poujardieu B (1989) Qualité de la viande de lapin : Effet des conditions de réfrigération et de conservation des carcasses sur le pH musculaire et les pertes de poids. *Cuniculture* 16: 201-203.
- Ouhayoun J, Daudin JD & Raynal H (1990) Technologie de l'abattage du lapin. 2- Influence de la température de l'air de réfrigération sur les pertes d'eau et sur l'acidification musculaire. *Viandes Prod. Carnés* 11: 69-73.
- Padilha MTS, Licois D & Coudert P (1996) Frequency of the carriage and enumeration of *Escherichia coli* in caecal content of 15 to 49 day old rabbits. *6th World Rabbit Congress Proceedings* 3: pp: 99-102. Toulouse, France.
- Peachey BM, Purchas RW & Duizer LM (2002) Relationships between sensory and objective measures of meat tenderness of beef m. longissimus thoracis from bulls and steers. *Meat Sci.* 60: 211-218.
- Penders J, Thijs C, Vink C, Stelma FF, Snijders B, Kummeling I, van den Brandt PA & Stobberingh EE (2006) Factors Influencing the Composition of the Intestinal Microbiota in Early Infancy. *Pediatrics* 118: 511-521.
- Rodriguez-Romero N, Abecia L, Balcells J, Martinez B & Fondevila M (2009) Comparison of bacterial profile from caecal content and caecotrophes in growing rabbits fed on two levels of indigestible fibre. *XXXIX Jornadas de Estudio, XIII Jornadas sobre Produccion Animal, Proceedings* pp: 784-786. Zaragoza, Espana.
- Roiron A, Ouhayoun J & Delmas D (1992) Effet du poids et de l'âge d'abattage sur les carcasses et la viande de lapin. *Cuniculture* 105: 143-146.
- Schaal B, G. Coureaud, D. Langlois, C. Giniès, E. Sémon & Perrier G (2003) Chemical and behavioural characterization of the rabbit mammary pheromone. *Nature* 424: 68-72.
- Suau A, Bonnet R, Sutren M, Godon J-J, Gibson GR, Collins MD & Dore J (1999) Direct Analysis of Genes Encoding 16S rRNA from Complex Communities Reveals Many Novel Molecular Species within the Human Gut. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 4799-4807.
- Trocino A, Garcia J, Carabaño R & Xiccato G (2013) A meta-analysis on the role of soluble fibre in diets for growing rabbits. *World Rabbit Sci* 21: 1-15.

- Vanhoutte T, Huys G, De Brandt E & Swings J (2004) Temporal stability analysis of the microbiota in human feces by denaturing gradient gel electrophoresis using universal and group specific 16S rRNA primers. *FEMS Microbiol. Ecol.* 48: 437-446.
- Wielen PWJJ, Keuzenkamp DA, Lipman LJA, Knapen F & Biesterveld S (2002) Spatial and Temporal Variation of the Intestinal Bacterial Community in Commercially Raised Broiler Chickens During Growth. *Microbial Ecology* 44: 286-293.
- Xiccato G (1999) Feeding and meat quality in rabbits : a review. *World Rabbit Sci* 7: 75-86.
- Yu B & Tsen HY (1993) Lactobacillus cells in the rabbit digestive tract and factors affecting their distribution. *J. Appl. Bact.* 75: 269-275.
- Zarrow MX, Denenberg VH & Anderson CO (1965) Rabbit : Frequency of sulking in the pup. *Science* 150: 1835-1836.
- Zoetendal EG, Akkermans ADL & De Vos WM (1998) Temperature Gradient Gel Electrophoresis Analysis of 16S rRNA from Human Fecal Samples Reveals Stable and Host-Specific Communities of Active Bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 64: 3854-3859.
- Zoetendal EG, von Wright A, Vilpponen-Salmela T, Ben-Amor K, Akkermans ADL & de Vos WM (2002) Mucosa-Associated Bacteria in the Human Gastrointestinal Tract Are Uniformly Distributed along the Colon and Differ from the Community Recovered from Feces. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 3401-3407.

F. Formation par et pour la Recherche

I. Encadrement

Diplôme de premier cycle

- L. Charles (2000) Stage de DUT IUT Auch. Evolution avec l'âge des caractéristiques mécaniques des os de lapin (**encadrement**)
- M. Salvy (2001) stage de BTS production animale LEGTA Pamiers. Le muscle du lapin : collagène et tendreté mécanique en fonction de l'âge (**encadrement**)
- M.A. Corboeuf (2002) Licence option biologie appliquée à l'agro alimentaire IUP de chimie biologie de Nantes. Comparaison des viandes de lapins produites selon le cahier des charge de l'agriculture biologique et celles issues d'élevage standard (**encadrement**)
- A. Clément (2003), .Stage de DUT, IUT Auch. Influence du mode de logement sur les performances d'abattage et la qualité de la viande de lapin (**encadrement**)

Diplôme de deuxième cycle

- L. Aubourg (2003) Stage de 4^{ème} année, ESITPA. Influence du mode de logement sur les performances d'abattage et la qualité de la viande de lapin (**encadrement**)
- A. Zoubai (2004) Aptitudes des méthodes physico-chimiques à évaluer les qualités sensorielles de la viande de lapin. DESS de Statistique et Econométrie. Université Paul Sabatier Toulouse III (**encadrement**)
- V. Soulié (2008) Master 1 Sciences, Technologies, Santé - mention Microbiologie-AgroBioSciences Université Paul Sabatier. Evolution avec l'âge de la structure et la diversité de la communauté bactérienne du cæcum de lapin: approche par CE-SSCP (Capillary Electrophoresis Single-Strand Conformation Polymorphism). (**encadrement**)
- N. U. Tran (2008) Master 2 Recherche Elaboration de la qualité et Sécurité Alimentaire. INP ENSAT - ENVT Mise au point d'une technique de quantification des populations bactériennes et archaea de l'écosystème cæcal du lapin par PCR en temps réel. (**encadrement**)
- F. Nice (2009) Master2P Diagnostic microbiologique : approches innovantes. Université Paul Sabatier Toulouse III Réponse de la communauté bactérienne digestive du lapin après infection expérimentale à l'Entérocolite Epizootique du Lapin. (**encadrement**)

Accueil de doctorant étranger

- A. Bonai (2 mois en 2008 et 1mois 2009) KE-ÁTK, Élettani és Állathigiéniai Tanszék, 7400, Kaposvár, Guba Sándor utca 40, Hungary
- C. Roméro (3 mois 2010) Departamento de Producción Animal, ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain.
- N. El Abed (3 mois 2012) Departamento de Producción Animal, ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, Spain.

Accueil de post-doctorant

- Katia Massip (1 an 2012) ATER INP ENSAT. Impact de l'hygiène du logement et du niveau d'ingestion sur la communauté bactérienne cæcale et la santé du lapin

II. Co-encadrement

Diplôme de deuxième cycle

- M. Moussa (2004) DEA Biologie et Productions Animales Université de Rennes I Effet de l'exercice physique sur le comportement mécanique et les caractéristiques biochimiques du tendon et de la jonction tendino-osseuse chez le lapin (co-encadrement avec H. Rémignon)
- A. Zened (2007) Master2R Elaboration de la Qualité et Sécurité Alimentaire. INP ENSAT - ENVT Caractérisation de la flore bactérienne ruminale par PCR-SSCP. (co-encadrement avec V. Monteils)
- Y. Teissier 2011. Développement et optimisation de programmes de traitement de données de séquençage 454. Master2P Bioinformatique. Université Paul Sabatier Toulouse III. (co-encadrement avec L. Cauquil)

Diplôme de troisième cycle

- R. Michelland (2006-2009) Caractérisation de la biodiversité des écosystèmes digestifs des herbivores modèles vache/lapin (comité de pilotage + encadrement : 30% directeur de thèse L. Fortun-Lamothe et Co-directrice V. Monteils)
- M. Martignon (2007-2010) Régulation de l'ingestion et contrôle de l'activité de l'écosystème cæcal : impact sur la sensibilité aux troubles digestifs chez le lapereau (comité de pilotage + encadrement : 25%, directeur de thèse T. Gidenne et Co-directrice C. Burel)
- M. Rey (2009-2012) Implantation du microbiote et mise en place des fonctions du rumen chez le veau de race laitière et effet de la supplémentation en levures vivantes. (comité de pilotage)
- C. Knudsen (2011- en cours) Régulation de l'ingestion et santé digestive chez le jeune lapin. (co-direction avec T. Gidenne)
- V. Jacquier (2011 en cours) Approches génomiques des interactions entre l'implantation du symbiote chez le lapereau et la maturation du système immunitaire (comité de pilotage directeur de thèse T. Gidenne et Co-directrice C. Rogel)
- T. Read (2013 en cours) Stratégies d'alimentation en élevage cunicole en lien avec le fonctionnement du microbiote cæcal , la santé des lapereaux et les performances de reproduction des femelles (co-encadrement : **30%** directeur de thèse L. Fortun-Lamothe)

G. Listes des travaux

Les noms soulignés correspondent aux stagiaires que j'ai encadrés partiellement ou en totalité.

I. Publications scientifiques

11. Articles primaires dans des périodiques à comité de lecture

1996

- [A1] Louveau I., **Combes S.**, Cochard A., and Bonneau M. 1996. Developmental changes in insulin-like growth factor-I (IGF-I) Receptor levels and plasma IGF-I concentrations in Large White and Meishan pgs. *General and Comparative Endocrinology*, 104:29-36.
- [A2] **Schnoebelen-Combes S.**, Louveau I., Postel-Vinay M.-C., and Bonneau M. 1996. Ontogeny of GH receptor and GH-binding protein in the pig. *Journal of Endocrinology*, 148:249-255.

1997

- [A3] **Combes S.**, Louveau I., and Bonneau M. 1997. Effect of GH administration on GH and IGF-I receptors in porcine skeletal muscle and liver in relation to plasma GH-binding protein. *Journal of Endocrinology*, 155:19-26.
- [A4] **Combes S.**, Louveau I., and Bonneau M. 1997. Moderate food restriction affects skeletal muscle and liver growth hormone receptors differently in pigs. *Journal of Nutrition*, 127:1944-1949.
- [A5] Weiler U., Claus R., **Schnoebelen-Combes S.**, and Louveau I. 1997. Influence of age and genotype on endocrine parameters and growth performance: a comparative study in wild boars, Meishan and Large White boars. *Journal of Endocrinology*, 148:249-255.

2002

- [A6] Gondret F., **Combes S.**, Larzul C., and De Rochambeau H. 2002. Effects of divergent selection for body weight at fixed age on histological, chemical and rheological characteristics of rabbit muscles. *Livestock Production Science*, 76:81-89.

2003

- [A7] **Combes S.**, Lepetit J., Darce B., and Lebas F. 2003. Effect of cooking temperature and cooking time on Warner-Bratzler tenderness measurement and collagen content in rabbit meat. *Meat Science*, 63:91-96.
- [A8] Ducomps C., Mauriege P., Darce B., **Combes S.**, Lebas F., and Doutreloux J. P. 2003. Effects of jump training on passive mechanical stress and stiffness in rabbit skeletal muscle: role of collagen. *Acta Physiologica Scandinavica*, 178, (3):215-224.

2005

- [A9] Gondret F., Larzul C., **Combes S.**, and De Rochambeau H. 2005: Carcass composition, bone mechanical properties, and meat quality traits according to growth rate in rabbits. *Journal of Animal Science*, 83:1526-1535.
- [A10] Larzul C., Gondret F., **Combes S.**, Garreau H., and De Rochambeau H. 2005. Divergent selection on 63-day weight in rabbit: response on growth, carcass and muscle traits. *Genetique Selection Evolution*, 37:105-122.

2006

- [A11] **Combes S.**, and Cauquil L. 2006. Viande de lapin et oméga 3: Une alimentation riche en luzerne permet d'enrichir la viande des lapins en oméga 3. *Viandes et Produits Carnés*, 25:31-35.

2007

- [A12] **Combes S.**, Larzul C., Jehl N., Cauquil L., Gabinaud B., and Lebas F. 2007. Ability of physico-chemical measurements to discriminate rabbit meat from three different productive processes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87:2302-2309. DOI: 10.1002/jsfa.2988

2008

- [A13] **Combes S.**, González I., Déjean S., Baccini A., Jehl N., Juin H., Cauquil L., Gabinaud B., Lebas F., and Larzul C. 2008. Relationships between sensory and physicochemical measurements in meat of rabbit from three different breeding systems using canonical correlation analysis. *Meat Science*, 80:835-841. DOI: 10.1016/j.meatsci.2008.03.033
- [A14] Monteils V., Cauquil L., **Combes S.**, Godon J.-J., and Gidenne T. 2008: Potential core species and satellite species in the bacterial community within the rabbit cæcum. *FEMS Microbiology Ecology*, 66:620-629. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2008.00611.x

2009

- [A15] Fortun-Lamothe L., **Combes S.**, and Gidenne T. 2009. Contribution of intensive rabbit breeding to sustainable development. Analysis production in France. *World Rabbit Science*, 17:1-7.
- [A16] Gidenne T., **Combes S.**, Feugier A., Jehl N., Arveux P., Boisot P., Briens C., Corrent E., Fortune H., Montessuy S., and Verdelhan S. 2009. Feed restriction strategy in the growing rabbit. 2. Impact on digestive health, growth and carcass characteristics. *Animal*, 3:509-515. DOI: 10.1017/S1751731108003790
- [A17] Gondret F., Hernandez P., Remignon H., and **Combes S.** 2009. Skeletal muscle adaptations and biomechanical properties of tendons in response to jump exercise in rabbits. *Journal of Animal Science*, 87:544-553. DOI: 10.2527/jas.2008-1286
- [A18] Michelland R. J., Dejean S., **Combes S.**, Fortun-Lamothe L., and Cauquil L. 2009. StatFingerprints: a friendly graphical interface program for processing and analysis of microbial fingerprint profiles. *Molecular Ecology Resources*, 9(5):1359-1363. DOI: 10.1111/j.1755-0998.2009.02609.x
- [A19] Michelland R. J., Monteils V., Zened A., **Combes S.**, Cauquil L., Gidenne T., Hamelin J., and Fortun-Lamothe L. 2009. Spatial and temporal variations of the bacterial community in the bovine digestive tract. *Journal of Applied Microbiology*, 107:1642-1650. DOI : 10.1111/j.1365-2672.2009.04346.x
- [A20] Michelland R. J., **Combes S.**, Monteils V., Cauquil L., Gidenne T., and Fortun-Lamothe L. 2009: Molecular analysis of the bacterial community in digestive tract of rabbit. *Anaerobe*, 16(2):61-65. DOI : 10.1016/j.anaerobe.2009.05.002

2010

- [A21] **Combes S.**, Postollec G., Cauquil L., and Gidenne T. 2010. Influence of cage or pen housing on carcass traits and meat quality of rabbit. *Animal*, 4:295-302.
- [A22] Martignon M., **Combes S.**, Gidenne T. 2010. Digestive physiology and hindgut bacterial community of the young rabbit (*Oryctolagus cuniculus*): Effects of age and short-term intake limitation. *Comparative Biochemistry and Physiology A Comparative Physiology*, 156, 156-162. DOI : 10.1016/j.cbpa.2010.01.017
- [A23] Michelland R.J., Monteils V., **Combes S.**, Cauquil L., Gidenne T., Fortun-Lamothe L. 2010. Comparison of the archaeal community in the fermentative compartment and faeces of the cow and the rabbit. *Anaerobe*, 16:396-401. DOI : 10.1016/j.anaerobe.2010.04.004
- [A24] Privé F., **Combes S.**, Cauquil L., Farizon Y., Enjalbert F., Troegeler Meynadier A. 2010. Temperature and duration of heating of sunflower oil affect ruminal biohydrogenation of linoleic acid in vitro. *Journal of Dairy Science*, 93:711-722. DOI : 10.3168/jds.2009-2534

2011

- [A25] **Combes S.**, Michelland R., Monteils V., Cauquil L., Soulié V., Tran N. U., Gidenne T., Fortun-Lamothe, L. (2011). Postnatal development of the rabbit cæcal microbiota composition and activity. *FEMS Microbiology Ecology*, 77(3):680-689. DOI : 10.1111/j.1574-6941.2011.01148.x
- [A26] Guardia S., Konsak B., **Combes S.**, Levenez F., Cauquil L., Guillot J.F., Moreau-Vauzelle C., Lessire M., Juin H., Gabriel I. 2011. Effects of stocking density on the growth performance and digestive microbiota of broiler chickens. *Poultry Science*, 90:1878-1889. DOI : 10.3382/ps.2010-01311
- [A27] Monteils V., Rey M., Cauquil L., Troegeler-Meynadier A., Silberberg M., **Combes S.** (2011). Random changes in the heifer rumen in bacterial community structure, physico-chemical and fermentation parameters, and in vitro fiber degradation. *Livestock Science*, 141:(2-3)104-112. DOI : 10.1016/J.LIVSCI.2011.05.008
- [A28] Michelland R., Monteils V., **Combes S.**, Cauquil L., Gidenne T., Fortun-Lamothe L. 2011. Changes over time in the bacterial communities associated with fluid and food particles and the ruminal parameters in

the bovine rumen before and after a dietary change. *Canadian Journal of Microbiology*, 57:629-637. DOI : 10.1139/W11-053

- [A29] Michelland R., **Combes S.**, Monteils V., Cauquil, L., Gidenne T., Fortun-Lamothe L. 2011. Rapid adaptation of the bacterial community in the growing rabbit cæcum after a change in dietary fibre supply. *Animal*, 5:1761-1768. DOI : 10.1017/S1751731111001005
- [A30] Zened A., Troegeler-Meynadier A., Nicot M.-C., **Combes S.**, Cauquil L., Farizon Y., Enjalbert F. 2011. Starch and oil in the donor cow diet and starch in substrate differently affect the in vitro ruminal biohydrogenation of linoleic and linolenic acids. *Journal of Dairy Science*, 9:5634-5645. DOI : 10.3168/jds.2011-4491

2012

- [A31] Kimse M., Bayourthe C., Monteils V., Fortun-Lamothe L., Cauquil L., **Combes S.**, Gidenne T. 2012. Live yeast stability in rabbit digestive tract : Consequences on the cæcal ecosystem, digestion, growth and digestive health. *Animal Feed Science and Technology*, 173:235-243. DOI : 10.1016/j.anifeedsci.2012.01.012
- [A32] Monteils V., Rey M., Silberberg M., Cauquil L., **Combes S.** 2012. Modification of activities of the ruminal ecosystem and its bacterial and protozoan composition during repeated dietary changes in cows. *Journal of animal science*, 90:4431-4440. DOI : 10.2527/jas.2011-4321

2013

- [A33] Zened A., **Combes S.**, Cauquil L., Mariette J., Klopp C., Bouchez O., Troegeler-Meynadier A., Enjalbert, F. 2013. Microbial ecology of the rumen evaluated by 454 GS FLX pyrosequencing is affected by starch and oil supplementation of diets. *FEMS Microbiology Ecology*, 83:504-514. DOI : 10.1111/1574-6941.12011
- [A34] Gidenne T., **Combes S.**, Lamothe L. 2013. Protein replacement by digestible fibre in the diet of growing rabbits. 1: Impact on digestive balance, nitrogen excretion and microbial activity. *Animal Feed Science and Technology*, 183:132-141. DOI : 10.1016/j.anifeedsci.2013.04.022
- [A35] Rey, M., Enjalbert, F., **Combes, S.**, Cauquil, L., Bouchez, O., Monteils, V. 2013. Establishment of ruminal bacterial community in dairy calves from birth to weaning is sequential over three periods. *Journal of Applied Microbiology*. In press. DOI : 10.1111/jam.12405

2014

- [A36] **Combes S.**, Gidenne T., Cauquil L., Fortun-Lamothe 2014. Coprophagous behavior of rabbit pups affects implantation of cecal microbiota and health status. *Journal of Animal Science*. 92:652-665 DOI: 10.2527/jas2013-6394
- [A37] Michelland R. **Combes S.** Cauquil L. 2014. OligoSpecificitySystem: global matching efficiency calculation of oligonucleotide sets taking into account degeneracy and mismatch possibilities. *Int. J. Data Mining and Bioinformatics* 9:417-423
- [A38] Vasai F., Brugirard Ricaud K., Bernadet M.D, Cauquil, L., Bouchez, O., **Combes, S.**, Davail S., 2014. Overfeeding and genetics affect the composition of intestinal microbiota in *Anas platyrhynchos* (Pekin) and *Cairina moschata* (Muscovy) ducks *FEMS Microbiology Ecology*. 87:(1): 204–216. DOI:10.1111/1574-6941.12217
- [A39] Vasai F., Brugirard Ricaud K., Cauquil L., Daniel P., Peillod C., Gontier K., Tizaoui A., Bouchez O., **Combes S.**, Davail S., 2014. *Lactobacillus sakei* modulates mule ducks microbiota in ileum and ceca during overfeeding period. *Poultry Science* 93(4):916-925. DOI:10.3382/ps.2013-03497

12. Synthèses publiées dans des périodiques à comité de lecture

- [B1] Lefaucheur L., Louveau I., **Schoebelen S.**, Ecolan P., and Bonneau M. 1996. Intérêt et limite du modèle Meishan pour l'étude de la croissance musculaire chez le porc. *INRA Productions Animales*, 9:219-223
- [B2] **Combes S.** 2004: Valeur nutritionnelle de la viande de lapin. *INRA Productions Animales*, 15:373-384.
- [B3] Gondret F., **Combes S.**, Lefaucheur L., and Lebret B. 2005. Effects of exercise during growth and alternative rearing systems on muscle fibers and collagen properties. *Reproduction Nutrition Development*, 45:69-86.
- [B4] Gidenne T., **Combes S.**, Licois D., Carabaño R., Badiola I., and Garcia J. 2008. Ecosystème cæcal et nutrition du lapin : interactions avec la santé digestive. *INRA Productions Animales*, 21:239-250.

- [B5] Gidenne T., **Combes S.**, Fortun-Lamothe L. 2012. Feed intake limitation strategies for the growing rabbit: effect on feeding behaviour, welfare, performance, digestive physiology and health: a review. *Animal*, 6 :1407 - 1419. DOI : 10.1017/S1751731112000389
- [B6] Gidenne T., Fortun-Lamothe L., **Combes S.** 2012. Intake restriction for the young rabbit: new strategies to enhance its digestive health and feed efficiency. *INRA Productions Animales*, 25 (4), 323 - 336.
- [B7] Michelland R., **Combes S.**, Monteils V., Bayourthe C., Cauquil L., Enjalbert F., Julien C., **Kimse M.**, Troegeler-Meynadier A., **Zened A.**, Gidenne T., Fortun-Lamothe, L. 2012. Analyse comparée des écosystèmes digestifs du rumen de la vache et du cæcum du lapin. *INRA Productions Animales*, 25:(5)395-406.
- [B8] **Combes S.**, Fortun-Lamothe L., Cauquil L., Gidenne T. 2013. Engineering the rabbit digestive ecosystem to improve digestive health and efficacy. *Animal*, 7:1429–1439. DOI: 10.1017/S1751731113001079

13. Communications présentées en congrès

2000

- [C1] **Combes S.**, Auvergne A., and Lebas F. 2000: Effect of cooking temperature on Warner - Bratzler tenderness measurement in rabbit meat. 7th World Rabbit Congress, Valencia (Spain), 4-7 july, vol A, p. 573-578.
- [C2] **Combes S.**, **Charles L.**, Auvergne A., Darche B., and Lebas F. 2000: Evolution avec l'âge des caractéristiques mécaniques des os en relation avec la qualité des carcasses de lapin. 8ème Journées des Sciences du Muscle et Technologies de la Viande, Paris, (France), 21-22 novembre, p. 39-42.
- [C3] Doutreloux J. P., **Combes S.**, Darche B., Ducomps C., Delage J. P., Watier B., Delmas D., and Lebas F. 2000: Evolution des résistances à l'étirement des muscles squelettiques au cours du développement : effet de l'architecture et du sexe. International congress of myology, Nice (France), March 27-31th, p. 151.
- [C4] Doutreloux J. P., Delmas D., Auvergne F., Delage J. P., Watier B., Jehl N., **Combes S.**, and Lebas F. 2000. Effet de la castration sur l'évolution de la résistance et de la capacité de déformation du muscle au cours du développement. International congress of myology, Nice (France), March 27-31th, p. 152.
- [C5] Ducomps C., Doutreloux J. P., **Combes S.**, Darche B., Remignon H., and Lebas F. 2000: Effets d'un exercice de type pliométrique sur les qualités mécaniques et métaboliques des tissus musculaires et conjonctifs chez le lapin. 8ème Journées des Sciences du Muscle et Technologies de la Viande, Paris, (France), 21-22 novembre, p. 43-46.
- [C6] Gondret F., **Combes S.**, Larzul C., and De Rochambeau H. 2000: Caractéristiques musculaires et qualité de la viande chez deux lignées de lapins sélectionnées de manière divergente sur le poids à 63 jours. 8ème Journées des Sciences du Muscle et Technologies de la Viande, Paris, (France), 21-22 novembre, p. 55-58.
- [C7] Larzul C., Gondret F., **Combes S.**, Garreau H., and De Rochambeau H. 2000: Divergent selection on 63-day weight in rabbit : preliminary results. 7th World Rabbit Congress, Valencia (Spain), 4-7 july, A,443-448.

2001

- [C8] Cauquil L., **Combes S.**, Darche B., and Lebas F. 2001: Caractérisation physico-chimique et rhéologique de la viande de lapin. Application à la comparaison de lapins label et standard. 9èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 28-29 novembre, p.11-13.
- [C9] **Combes S.**, Auvergne A., Darche B., and Lebas F. 2001: Evolution avec l'âge de la résistance mécanique des os chez le lapin. 9èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 28-29 novembre, p.15-18.
- [C10] **Combes S.**, Larzul C., Gondret F., Cauquil L., Darche B., and Lebas F. 2001: Tendreté mécanique du muscle longissimus dorsi de lapin : étude méthodologique. 9èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 28-29 novembre, p.3-6.
- [C11] **Combes S.**, Lepetit J., Darche B., and Lebas F. 2001: Influence de la température et du temps de cuisson sur la tendreté mécanique et la teneur en collagène de la viande de lapin. 9èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 28-29 novembre, p.7-10.
- [C12] Gondret F., **Combes S.**, and Larzul C. 2001: Sélection divergente sur le poids à 63 jours chez le lapin : conséquences sur les caractéristiques histologiques et biochimiques du muscle. 9èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 28-29 novembre, p.47-50.

- [C13] Larzul C., Gondret F., and **Combes S.** 2001: Sélection sur le poids à 63 jours : quelles conséquences pour les caractéristiques bouchères ? 9èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 28-29 novembre, p.43-46.

2002

- [C14] **Combes S.**, Jehl N., Juin H., Cauquil L., and Lebas F. 2002. Comparison between standard and label rabbits: Chemical, rheological and sensory characterization. European Meeting COST848, Athens (Greece), 11-14 April.
- [C15] Gondret F., Larzul C., **Combes S.**, Cauquil L., Darche B., and De Rochambeau H. 2002. Effect of selection on body size at fixed age on muscle characteristics. Congress on Genetics Applied to Livestock Production, Montpellier, (France), 19-23 August
- [C16] Larzul C., Gondret F., **Combes S.**, Cauquil L., and De Rochambeau H. 2002. Sélection sur le poids à 63 jours : quelles conséquences pour la qualité de la viande de lapin ? 9èmes Journées des Sciences du Muscle et Technologie de la Viande, Clermont-Ferrand (France), 15-16 Octobre

2003

- [C17] **Combes S.** 2003. Techniques de mesures des défauts de qualité de la viande et relations avec les tests sensoriels. Journée Recherche et Développement AFRAC, Toulouse (France), 11 juin, p. 31-32.
- [C18] **Combes S.**, Gidenne T., Jehl N., and Feugier A. 2003. Impact of a quantitative feed restriction on meat quality of the rabbit. European Meeting COST848, Praga, (Czech Republic), 25-27 september, p. 45.
- [C19] **Combes S.**, Lebas F., Juin H., Lebreton L., Martin T., Jehl N., Cauquil L., Darche B., and Corboeuf M. A. 2003. Comparaison lapin bio lapin standard : Analyse sensorielle, tendreté mécanique de la viande. 10èmes Journée de la Recherche Cunicol., Paris (France), 19-20 novembre, p. 137-141.
- [C20] **Combes S.**, Lebas F., Lebreton L., Martin T., Jehl N., Cauquil L., Darche B., and Corboeuf M. A. 2003. Comparaison lapin bio lapin standard : Caractéristiques des carcasses et composition chimique de 6 muscles de la cuisse. 10èmes Journée de la Recherche. Cunicole., Paris (France), 19-20 novembre, p. 133-136.
- [C21] **Combes S.**, Postollec G., Jehl N., Cauquil L., and Darche B. 2003. Influence de 3 modes de logements des lapins sur la qualité de la viande. 10èmes Journée Recherche Cunicole, Paris (France), 19-20 novembre, p. 177-180.
- [C22] Gondret F., **Combes S.**, and Larzul C. 2003. Sélection divergente sur le poids à 63 jours : conséquences sur les caractéristiques musculaires à même âge ou à même poids. 10èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris, (France), 19-20 novembre, p.153-156.
- [C23] Jehl N., Meplain E., Mirabito L., and **Combes S.** 2003. Influence de trois modes de logement sur les performances zootechniques et la qualité de la viande de lapin. 10èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 19-20 novembre, p.181-184.
- [C24] Larzul C., Gondret F., **Combes S.**, and De Rochambeau H. 2003. Analyse d'une expérience de sélection sur le poids à 63 jours : I. Déterminisme génétique de la croissance. 10èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 19-20 novembre, p. 145-148.
- [C25] Larzul C., Gondret F., **Combes S.**, and De Rochambeau H. 2003. Analyse d'une expérience de sélection sur le poids à 63 jours : II. Déterminisme génétique de la composition corporelle. 10èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 19-20 novembre, p. 149-152.

2004

- [C26] **Combes S.**, Larzul C., Gondret F., and De Rochambeau H. 2004. Does selection for growth rate impair bone resistance in the rabbit? 8th World Rabbit Congress, Mexico.
- [C27] **Combes S.**, Moussa M., Gondret F., Doutreloux J. P., and Remignon H. 2004. Influence de l'exercice physique chez le lapin : caractéristique de la carcasse, de la viande et du complexe tendino-osseux. JSMTV, Rennes (France), 25-26 octobre.
- [C28] Gondret F., **Combes S.**, and Larzul C. 2004. The influence of divergent selection for body weight at 63 days of age in rabbits, on muscle histological and biochemical characteristics at a same weight or at similar age at slaughter. COST Action, Porto, (Portugal), 4-6 october.
- [C29] Gondret F., El Ramouz R., Fernandez X., and **Combes S.** 2004. Influence de l'exercice physique au cours de l'engraissement sur le métabolisme musculaire chez le lapin. JSMTV, Rennes (France), 25-26 octobre.

2005

- [C30] **Combes S.**, Larzul C., Jehl N., Juin H., Clochard M.-C., Cauquil L., Darche B., Zoubai A., and Lebas F. 2005. Aptitude des méthodes physico-chimiques à décrire les caractéristiques sensorielles perçues par un jury entraîné à la dégustation de la viande de lapin. 11èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 29-30 Novembre, p. 147-150.
- [C31] **Combes S.**, Moussa M., Gondret F., Doutreloux J. P., and Rémignon H. 2005. Influence de l'exercice physique sur les performances de croissance, la qualité des carcasses et les caractéristiques mécaniques de l'attachement de la viande à l'os après cuisson chez le lapin. 11èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 29-30 Novembre, p. 155-158.
- [C32] Gondret F., **Combes S.**, Larzul C., and De Rochambeau H. 2005. The influence of divergent selection for body weight at 63 days of age in rabbits on muscles characteristics at a same age or at a similar weight. Arch. Tiers., Dummerstorf, 48(Special Issue):98-104.
- [C33] Gondret F., Hernandez P., El Ramouz R., Pontrucher F., Fernandez X., and **Combes S.** 2005. Réorientation oxydative dans les muscles de la cuisse en réponse à l'exercice physique chez le lapin. 11èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), p. 159-162.

2006

- [C34] **Combes S.**, et Cauquil L. 2006: La luzerne : un atout pour une viande enrichie en oméga 3. Journée nationale sur l'élevage du lapin de chair, Pacé (France), 28 nov, 36-44.

2007

- [C35] Cauquil L., **Combes S.**, Monteils V., and Gidenne T. 2007. Comparative Molecular Inventory of Two Microbial Digestive Ecosystems: the Rabbit Cæcum and the Dairy Cow Rumen: preliminary results. I reunion científica : Avances metodológicos en el estudio de la microbiología digestiva, Zaragoza (Spain).
- [C36] Cauquil L., Monteils V., Godon J. J., Mastin G., **Combes S.**, and Gidenne T. 2007: Inventaire moléculaire de l'écosystème cæcal du lapin : résultats préliminaires. Congrès de la SFM.
- [C37] Cauquil L., Monteils V., Godon J. J., Mastin G., **Combes S.**, and Gidenne T. 2007: Inventaire des bactéries cæcales du lapin par clonage aléatoire : résultats et perspectives. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), p. 73-76.
- [C38] **Combes S.**, Larzul C., Cauquil L., Gabinaud B., Clochard M.-C., Segura M., Aymard P., and Lebas F. 2007. I. Evaluation de la qualité des carcasses de trois lots de lapins commerciaux (standard, certifié et Label) en abattoir industriel par 41 mesures physico-chimiques simples, rapides et peu coûteuses. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), p. 199-202.
- [C39] **Combes S.**, Larzul C., Cauquil L., Gabinaud B., Clochard M.-C., Segura M., Aymard P., and Lebas F. 2007. II Mise au point d'un système de discrimination simple et rapide de 3 lots commerciaux de lapins: standard, CCP et Label. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), p. 203-208.
- [C40] Gigaud V., et **Combes S.**, Les atouts de la viande de lapin : comparaison avec les autres produits carnés. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), p. 187-190.
- [C41] Gigaud V., et **Combes S.**, Effet d'un apport décroissant en oméga 6 / 3 du régime sur la teneur en acides gras de la viande de lapin et contribution de la viande ainsi produite aux apports nutritionnels conseillés. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), p. 191-194.
- [C42] Michelland R., **Combes S.**, Cauquil L., Gidenne T., Monteils V., and Fortun-Lamothe L. 2007. Caractérisation comparée des communautés bactériennes du contenu cæcal, des caecotrophes et des faeces dures chez le lapin adulte par CE-SSCP des gènes codant pour l'ARN16S. 12èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), p. 77-80.
- [C43] Michelland R., Monteils V., Zened A., **Combes S.**, Cauquil L., and Fortun-Lamothe L. 2007. Etude de la structure et de la diversité des communautés bactériennes dans les compartiments ruminiaux et les fèces par CE-SSCP. 3ème colloque d'écologie microbienne, La Grande Motte (France), 15-18 Octobre, p. 71.

2008

- [C44] **Combes S.**, Cauquil L., and Gidenne T. 2008. Impact of an exclusive milk vs milk and dry feed intake till weaning on intake, growth, and on the cæcal biociverty and fibrolytic activity of the young rabbit. 9th World Rabbit Congress, Verona, Italy, June 10-13, p. 607-611.
- [C45] Déjean S., **Combes S.**, Gonzalez I., Larzul C., Cauquil L., and Baccini A. 2008. Analyse canonique régularisée pour l'étude de relations entre mesures sensorielles et instrumentales de la qualité de la viande de lapin. 10èmes journées Européennes Agro-industrie et Méthodes statistiques, Louvain-la-Neuve, Belgique 23 - 25 Janvier 2008, p. 7

- [C46] Gigaud V., and **Combes S.** 2008. The effect of decreasing the omega 6/omega 3 ratio in feed on fatty acid content of rabbit meat to meet human dietary recommendations. 9th World Rabbit Congress, Verona, Italy, June 10-13, p. 1353-1357.
- [C47] Martignon M., **Combes S.**, and Gidenne T. 2008. Effect of age and feed intake level on structure and diversity of cæcal bacterial community of the young rabbits. 6th INRA-RRI Symposium, Gut Microbiome, Functionality, Interaction with Host and the Impact on the Environment, Clermont-Ferrand (France), June 18-20, P-35.
- [C48] Michelland R., **Combes S.**, Cauquil L., Gidenne T., Monteils V., and Fortun-Lamothe L. 2008. Characterization of bacterial communities in cæcum, hard and soft feces of rabbit using 16S rRNA genes capillary electrophoresis single-strand conformation polymorphisme (CE-SSCP). 9th World Rabbit Congress, Verona, Italy, June 10-13, p. 1025-1028.
- [C49] Michelland R., **Combes S.**, Cauquil L., Gidenne T., Monteils V., and Fortun-Lamothe L. 2008. Comparative community in the digestive ecosystem of the rabbit and cow reveals strong host species and compartment effects. 6th INRA-RRI Symposium, Gut Microbiome, Functionality, Interaction with Host and the Impact on the Environment, Clermont-Ferrand (France), June 18-20, p. 55.

2009

- [C50] **Combes S.**, Nice F., Licois D., Cauquil L., Fortun-Lamothe L., and Gidenne T. 2009. Réponse de l'écosystème digestif de lapins EOPS à une reproduction expérimentale de l'EEL par l'inoculum standard TEC4. 13èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 17-18 novembre, p. 227-230.
- [C51] Gidenne T., Aymard P., Bannelier C., Combes S., and Lamothe L. 2009: Interaction entre la stratégie de restriction et la concentration énergétique de l'aliment: impact sur la croissance et la santé du lapin. Premiers résultats. 13èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 17-18 novembre, p. 63-66.
- [C52] Kimse M., **Combes S.**, Cauquil L., Bayourthe C., Monteils V., and Gidenne T. 2009. Incidence d'une déficience en fibres alimentaires sur l'écosystème cæcal du lapereau. Modulation par l'apport de levures probiotiques. 13èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 17-18 novembre, p. 10-13.
- [C53] Martignon M., **Combes S.**, and Gidenne T. 2009. Rôle du mode de distribution de l'aliment dans une stratégie de rationnement : conséquence sur le profil d'ingestion, la croissance et la santé digestive du lapin. 13èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 17-18 novembre, p. 39-42.

2011

- [C54] Cauquil L., Mariette, J., Rousseau, C., Zened, A., Enjalbert, F., Troegeler-Meynadier, A., Klopp, C., Combes, S. 2011. From high throughput 454 GS FLX data analysis process of 16S RNA gene sequences using barcoding to bacterial community exploration. 4th. Congress of European Microbiologist, FEMS 2011, Genève, Suisse, 26-30 june.
- [C55] Fortun-Lamothe L., Courtadon H., Croisier A., Gidenne T., Combes S., Le Bouquin S., Chauvin C. 2011. L'index de fréquence des traitements par les antibiotiques (IFTA) : un indicateur de durabilité des ateliers d'élevage. 14èmes Journées de la Recherche Cunicole. Le Mans, France 22-23 novembre. p. 135-138.
- [C56] Fortun-Lamothe L., Coutelet G., Litt J., Dejean S., Gourlain S., Chabbert E., Gidenne T., Combes S. 2011. Evaluation de la durabilité des élevages cunicoles français : méthodologie et premiers résultats. 14èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans, France, 22-23 novembre, p. 139-142
- [C57] Gidenne T., Combes S., Briens C., Duperray J., Rebours G., Salaun J.M., Weissmann D., Fortun-Lamothe, L., Combe, Y., Travel, A. 2011. Ingestion restreinte et concentration protéique de l'aliment : impact sur la digestion et les rejets azotés chez le lapin en croissance. 14èmes Journées de la Recherche Cunicole. Le Mans (France), 22-23 novembre, p21-24.
- [C58] Kimse M., **Combes S.**, Fortun-Lamothe L., Cauquil L., Monteils V., Bayourthe C., Gidenne T. 2011. Caractérisation physiopathologique et microbiologique d'entéropathie non spécifique chez le lapin en croissance - premiers résultats. 14èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans, France, 22-23 novembre, p. 157-160
- [C59] Martignon M., Licois D., Cauquil L., Amelot M., **Combes S.**, Reperant E., Postollec G., Gidenne T., Valat, C. 2011. Réponse digestive du lapereau à une inoculation expérimentale colibacillaire (O128:C6) en fonction du niveau d'ingestion. 14èmes. Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans, France, 22-23 novembre, p. 161-164.
- [C60] Rey M., Enjalbert F., Cauquil L., **Combes S.**, Monteils, V. 2011. Evolution of bacterial diversity in the rumen in dairy calves from birth to weaning using a high throughput 454 GS FLX pyrosequencing. 8th.

International Symposium on the Nutrition of Herbivores, Aberystwyth, Wales, (Great Britain), 6-9 september, p. 252-252.

- [C61] Zened A., **Combes S.**, Cauquil L., Mariette J., Rousseau C., Klopp C., Troegeler-Meynadier A., Enjalbert F. 2011. The ruminal level of trans-10 fatty acids of dairy cows is linked to the composition of bacterial community. 4th Congress of European Microbiologists, FEMS, Genève, (Switzerland), 26-30 june.

2012

- [C62] Fortun-Lamothe L., Coutelet G., Litt J., Combes S., Gidenne T., Déjean S. 2012. Sustainability of French rabbit breeding systems. 10th World Rabbit Congress, Sharm El-Sheikh, (Egypte) p. 827-831
- [C63] Garreau H., Brard S., Hurtaud J., Guitton E., Cauquil L., Licois D., Schwartz B., **Combes S.**, Gidenne T. 2012. Divergent selection for digestive disorders in two commercial rabbit lines: response of crossbred young rabbits to an experimental inoculation of *Echerichia coli* 0103. 10th World Rabbit Congress. 10. World Rabbit Congress, Sharm El-Sheikh, (Egypt), 3-6 september, p. 153-157
- [C64] Gidenne T., **Combes S.**, Briens C., Duperray J., Mevel L., Rebours G., Salaun J., Weissman D., Combe Y., Travel A. 2012. Intake limitation strategy and dietary protein concentration: effect on rabbit growth performance and health, from a large-scale study in a french network of experimental units (GEC). 10th World Rabbit Congress, Sharm El-Sheikh, (Egypte).
- [C65] Julien C., Cauquil L., **Combes S.**, Bouchez O., Marden J.P., and Bayourthe C., Study of the effect of Live Yeast *Saccharomyces cerevisiae* (CNCM I-4407) on ruminal bacterial community in lactating dairy cows using 454 GS FLX pyrosequencing. In VIIIth INRA-RRI Symposium on Gut Microbiology. Gut microbiota: friend or foe?, Clermont-Ferrand - France
- [C66] Kimse, M., **Combes S.**, Cauquil L., Fortun-Lamothe, L., Bayourthe, C., Gidenne, T. 2012. Impact of dietary fiber deficiency on the caecal ecosystem of the young rabbit. Modulation by yeast probiotics. 10th World Rabbit Congress, Sharm El-Sheikh, (Egypte)
- [C67] Massip K., **Combes S.**, Cauquil L., Zemb O and Gidenne T. 2012. High throughput 16S-DNA sequencing for phylogenetic affiliation of the caecal bacterial community in the rabbit - Impact of the hygiene of housing and of the intake level. In VIIIth INRA-RRI Symposium on Gut Microbiology. Gut microbiota: friend or foe?, Clermont-Ferrand - France, p. 57.

2013

- [C68] **Combes S.**, Gidenne T., Cauquil L., Balmisse E., Aymard P., Bonnemere JM., Bannelier C., Gabinaud, B., Segura M., Tartie V., Fortun-Lamothe L. 2013. Comportement d'ingestion de fèces dures maternelles par les lapereaux au nid. 2. Influence sur l'implantation du microbiote caecal et la survie des lapereaux. 15èmes. Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p. 79-82
- [C69] **Combes S.**, Gidenne T., Cauquil L., Bouchez O., Fortun-Lamothe L. 2013. Coprophagous behavior of rabbit pups affects dynamic implantation of microbiota and health status. EAAP – 64th Annual Meeting, Nantes (France), 26-30 august, p. 221
- [C70] **Combes S.**, Licois D., Cauquil L., El Abed N., Fortun-Lamothe L., Gidenne T. 2013. Réponse du microbiote commensal de lapins EOPS à une reproduction expérimentale de l'EEL par l'inoculum TEC4 : résultats préliminaires de pyroséquençage 454. 15èmes. Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p. 229-232
- [C71] El Abed N., Badiola I., Trocino A., Tazzoli M., Majolini D., Perez de Rozas A., **Combes S.**, Cauquil L., Acosta N., Heras A., Menoyo D., Garcia J., Xiccato G., Carabaño R. 2013. Efecto dela adición en el pienso de mananoligosacaridos y β -glucanos de levaduras sobre la microbiota intestinal de gazapos. Asociación Interprofesional para le desarrollo Agrario (AIDA), 15 Jornadas sobre Produccion Animal, Zaragoza (Spain), 14–15 may, p. 882-884.
- [C72] Garreau H., Briard S., Hurtaud J., Guitton E., Cauquil L., Licois D., Schwartz B., Balmisse E., Tircazes A., **Combes S.**, Gidenne T. 2013. Sélection divergente pour les troubles digestifs dans deux lignées « sensibles » ou « résistantes » à une inoculation expérimentale de *Escherichia Coli* 0103. 15èmes. Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p. 217-220.
- [C73] Gidenne, T. **Combes S.**, Fortun-Lamothe L., Zemb O. 2013. Capacité d'ingestion d'aliment sec par le lapereau au nid : Interaction avec l'ingestion de fèces dures maternelles. 15èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p93-96.
- [C74] Gidenne T., **Combes S.**, Fidler C. Fortun-Lamothe L. 2013. Comportement d'ingestion de fèces dures maternelles par les lapereaux au nid. 1. Quantification de la production maternelle de fèces et de leur ingestion par les lapereaux. 15èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p89-92.

- [C75] Jacquier. V., Combes S., Oswald I.P., Rogel-Gaillard C., Gidenne T. 2013. Incorporation de fibres rapidement fermentescibles dans un aliment perisevrage : impact sur la digestion, la croissance et l'état sanitaire du lapin. 15èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p. 55-58.
- [C76] Knudsen C., Combes S., Briens C., Duperray J., Rebours G., Salaun J-M., Travel A., Weissman D., and Gidenne T. 2013. Impact of dietary energy and feed level on the digestive efficiency in growing rabbit. EAAP – 64th Annual Meeting, Nantes (France), 26-30 august, p. 592
- [C77] Vasai F. Brugirard Ricaud K., Daniel P., Peillod C., **Combes S.** Cauquil L., Bouchez O., et Davail S. 2013. Effet d'un probiotique sur le microbiote intestinal des canards mulards durant le gavage. 10èmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, La Rochelle (France), 26-28 mars, p. 269-273.
- [C78] Zened, A., Meda B., Ponchant P., Wilfart A., Arroyo J., Gidenne T., Brachet M., **Combes, S.**, Fortun-Lamothe L. 2013. Conséquence d'une restriction alimentaire chez le lapereau sevré sur les impacts environnementaux de la production de viande de lapin. 15èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 19-20 novembre, p. 141-144.

14. Synthèses publiées dans des congrès ou des symposium

- [D1] **Combes S.**, and Lebas F. 2003. Les modes du logement du lapin en engraissement : Influence sur la qualité des carcasses et des viandes. 10èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 19-20 novembre, p. 185-200.
- [D2] Gondret F., **Combes S.**, Lefaucheur L., and Lebret B. 2003. Development of muscle fibers and collagen in non-ruminant mammals. 54th Annual meeting of the European Association for Animal Production, Roma (Italy), August 31st - September 3rd, p 427.
- [D3] **Combes S.**, and Dalle Zotte A. 2005. La viande de lapin : valeur nutritionnelle et particularités technologiques. 11èmes Journées de la Recherche Cunicole, Paris (France), 29-30 Novembre, p. 167-180.
- [D4] **Combes S.**, Fortun-Lamothe, L., Cauquil, L., Gidenne, T. 2011. Piloter l'écosystème digestif du lapin : pourquoi, quand et comment ? 14èmes Journées de la Recherche Cunicole Le Mans (France), 22-23 novembre, p. 33-48.
- [D5] **Combes S.**, Fortun-Lamothe L., Cauquil L., Gidenne T. 2012. Controlling the rabbit digestive ecosystem to improve digestive health and efficacy. 10th World Rabbit Congress, Sharm El-Sheikh (Egypt), 3-6 september, p.475-494.
- [D6] **Combes S.** Fortun-Lamothe L., Cauquil L., Gidenne T. 2013. Controlling the rabbit digestive ecosystem to improve digestive efficacy and health. Giornate Di Coniglicoltura ASIC, Forlì, (Italy), 10-11 avril, p. 23-43
- [D7] **Combes S.** Fortun-Lamothe L., Cauquil L., Gidenne T. 2013. Early manipulation of ceecal microbiota: 454 pyrosequencing methodology and first results. Workshop on gut microbiota – methodologies Kaposvar (Hungary), 24th april, 5pp.
- [D8] **Combes S.**, Gidenne T., Boucher S., Fortun-Lamothe L., Bolet G., Coureaud G. 2013. Lapereaux de la naissance au sevrage : quels outils pour des lapereaux plus robustes ? 15èmes Journées de la Recherche Cunicole, Le Mans (France), 22-23 novembre, p. 63-77

II. Rapports diplômants

- [E1] **Schnoebelen S.** 1992 Etude de la sensibilité à l'insuline chez la truie en gestation Rapport d'ingénieur ENSFA (Ecole Nationale Supérieure Féminine d'Agronomie) Rennes. 34 pp
- [D9] **Schnoebelen S.** 1993 Influence du génotype et de l'âge sur les niveaux circulants d'IGF-I et d'hormone de croissance chez le porc. Rapport de D.E.A. de Biologie et Agronomie, Université de Rennes I 32 pp
- [D10] **Combes S.** 1996 Ontogenèse et régulation du récepteur de l'hormone de croissance (GH) dans le muscle squelettique et le foie en relation avec la protéine de liaison de la GH et l'IGF-I plasmatiques chez le porc. Thèse de Doctorat de l'ENSAR, spécialité Biologie et Agronomie 123 pp.

III. Documents à vocation de transfert

III.1 Travaux personnels dans des périodiques sans comité de lecture

- [F1] Lebas F., and **Combes S.** 2001: Quel mode d'élevage pour un lapin de qualité ? Journée scientifique CRITT Valicentre, Chambray les Tours, France, 27 novembre, p. 29-38.

- [F2] **Combes S.** 2003: Techniques de mesures des défauts de qualité de la viande et relations avec les tests sensoriels. Pages 8-9 in: Le Point Avicole Sud Ouest, A. Dusanter, ed. GIE Midi-Pyrénées ITAVI, Toulouse (France).
- [F3] **Combes S.** 2006: Influence du taux d'incorporation de luzerne déshydratée dans la ration sur la qualité des carcasses et la composition en acides gras de la viande de lapin. Page 1 in: Communication Desialis INRA SRC.
- [F4] **Combes S.,** and Cauquil L. 2006: La luzerne déshydratée : Une source d'acides gras oméga-3 pour le lapin. Cuniculture Magazine, 33:71-77.
- [F5] **Combes S.** 2007: Des mesures physico-chimiques simples pour discriminer les viandes de lapins en fonction du mode de production. En direct des Labos, http://www.inra.fr/les_partenariats/collaborations_et_partenaires/entreprises/en_direct_des_labos/garantir_l_origine_de_la_v viande_de_lapin
- [F6] **Combes S.** 2007: Des mesures physico-chimiques simples pour discriminer les viandes de lapins en fonction du mode de production. Pages n°641 [http:// www.vigie-viande.info](http://www.vigie-viande.info) in: Vigie Viande.
- [F7] Combes 2013, Piloter l'écosystème. Journée de l'Association des Vétérinaire Cunicole Français. L'éleveur de Lapins Février 2013, p28-29

III 2. Rapports écrits

- [G1] **Combes S.** 2003. Rapport final "Convention 99/04" Aptitudes des méthodes physico-chimiques rapides à évaluer les qualités sensorielles de la viande de lapin. 68 p.
- [G2] **Combes S.** 2006. Rapport d'étude : Influence du taux d'incorporation de luzerne déshydratée dans la ration sur la qualité des carcasses et la composition en acides gras de la viande de lapin. Page 15p.

Annexe : Publications choisies (abstract)

Coprophagous behavior of rabbit pups affects implantation of cecal microbiota and health status¹

S. Combes,^{*,†,‡} T. Gidenne,^{*,†,‡} L. Cauquil,^{*,†,‡} O. Bouchez,^{§,#} and L. Fortun-Lamothe^{*,†,‡}

*INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France; †Université de Toulouse INPT ENSAT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France; ‡Université de Toulouse INPT ENVT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31076 Toulouse, France; §INRA, UMR444 Laboratoire de Génétique Cellulaire, INRA Auzeville, F-31326 Castanet-Tolosan, France; and #GeT-PlaGe, Genotoul, INRA Auzeville, F-31326 Castanet-Tolosan, France

ABSTRACT: During the first few weeks after delivery, female rabbits excrete fecal pellets, which are ingested by their pups. We hypothesized that maternal excretion of hard fecal pellets and the coprophagous behavior of their pups were involved in cecal microbiota implantation. Four groups were compared: in 1 group (FM), pups had free access to maternal fecal pellets; in a second group, ingestion of feces was prevented (NF); and in 2 additional groups, pups had access only to fecal pellets excreted by foreign females receiving either no antibiotic (FF) or tiamulin and tetracycline (FFab). A total of 109 litters in 3 batches were used to quantify excretion and ingestion of feces and mortality. Bacterial composition was assessed by 454 pyrosequencing of the V3 to V4 region of 16S RNA genes and fermentative measurements in 128 rabbits of 1 batch at age 14, 35, 49, and 80 d with 8 rabbits per group for each age with 2 rabbits per litter. The number of fecal pellets excreted by does from 2 to 20 d after delivery ranged widely, but was similar among groups (16.1 ± 12.6 fecal pellets/doe). The excretion peaked during the first 6 d after delivery. Foreign fecal ingestion (FF and FFab groups) was 3 times greater ($P < 0.001$) than ingestion of maternal

feces (9.9 ± 7.8). Ingestion of feces in the FF group was greater than in the FFab groups (35.6 ± 9.3 vs. 29.5 ± 9.7 ; $P < 0.05$). Compared with the FM group, ingestion of feces in the FF and FFab groups began later (6 to 7 d vs. 2 to 3 d after birth) and peaked at 14 to 17 d (4.0 ± 1.8 hard fecal pellets·litter⁻¹·d⁻¹) and 13 to 15 d (3.5 ± 1.7 hard fecal pellets litter⁻¹ d⁻¹), respectively. During the 36 to 49 d period, the FF and NF groups exhibited the least (2.8%) and greatest (9.5%) mortality, respectively ($P = 0.03$). At age 14 d, the cecal bacterial community was dominated by Bacteroidetes phyla (63.3 \pm 15.1%), Bacteroidaceae family (36.0 \pm 18.8%), and *Bacteroides* genus (36.0 \pm 2.3%). With increasing age, Firmicutes phyla, Lachnospiraceae, and Ruminococcaceae families became the dominant taxa (92.0 \pm 4.7, 44.0 \pm 13.7, 37.9 \pm 11.6% at age 80 d, respectively). Impairment of fecal ingestion delayed this ecological succession, with greater and lower relative abundance of Bacteroidaceae and Ruminococcaceae, respectively, than in the other 3 groups at age 35 d ($P < 0.10$). In conclusion, although excretion of hard fecal pellets by does ranged widely, the coprophagous behavior of their pups affected the implantation of cecal bacterial microbiota.

Key words: bacterial community, cecal microbiota implantation, coprophagy, health, pyrosequencing, neonate

© 2014 American Society of Animal Science. All rights reserved.

J. Anim. Sci. 2014.92:652–665
doi:10.2527/jas2013-6394

ORIGINAL ARTICLE

Establishment of ruminal bacterial community in dairy calves from birth to weaning is sequential

M. Rey^{1,2,3}, F. Enjalbert^{3,1,2}, S. Combes^{1,2,3}, L. Cauquil^{1,2,3}, O. Bouchez^{4,5} and V. Monteils^{2,1,3,*}

1 INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, Castanet-Tolosan, France

2 Université de Toulouse INPT ENSAT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, Castanet-Tolosan, France

3 Université de Toulouse INPT ENVT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, Toulouse, France

4 INRA, UMR444 Laboratoire de Génétique Cellulaire, INRA Auzeville, Castanet-Tolosan, France

5 GeT-PlaGe, Genotoul, INRA Auzeville, Castanet-Tolosan, France

Keywords

454 pyrosequencing, bacteria, dairy calves, neonate, rumen, taxonomy.

Correspondence

Frans Enjalbert, ENVT, UMR1289, 23 chemin des Capelles, BP 87614, F-31076 Toulouse, France.

E-mail: f.enjalbert@envt.fr

*Present address: Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000, Clermont-Ferrand, France

2014/1350: received 5 July 2013, revised 29 October 2013 and accepted 30 October 2013

doi:10.1111/jam.12405

Abstract

Aim: Establishment of ruminal bacterial community in dairy calves.

Methods and Results: Rumen bacterial community was analysed on 6 calves bred according to commercial practices from day one to weaning at day 83 of age, using 454 16S rRNA-based pyrosequencing. Samples taken at day 1 did not produce amplicons. Analysis of data revealed a three-stage implantation process with a progressive but important shift of composition. At day 2, the bacterial community was mainly composed of *Proteobacteria* (70%) and *Bacteroidetes* (14%), and *Pasteurellaceae* was the dominant family (58%). The bacterial community abruptly changed between days 2 and 3, and until day 12, dominant genera were *Bacteroides* (21%), *Prevotella* (11%), *Fusobacterium* (5%) and *Streptococcus* (4%). From 15 to 83 days, when solid food intake rapidly increased, *Prevotella* became dominant (42%) and many genera strongly decreased or were no longer detected. A limited number of bacteria genera correlated with feed intake, rumen volatile fatty acids and enzymatic activities.

Conclusion: The ruminal bacterial community is established before intake of solid food, but solid food arrival in turn shapes this community.

Significance and Impact of the Study: This study provides insight into the establishment of calves' rumen bacterial community and suggests a strong effect of diet.

Engineering the rabbit digestive ecosystem to improve digestive health and efficacy

S. Combes^{1,2,3†}, L. Fortun-Lamothe^{1,2,3}, L. Cauquil^{1,2,3} and T. Gidenne^{1,2,3}

¹INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France; ²Université de Toulouse INPT ENSAT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France; ³Université de Toulouse INPT ENVT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31076 Toulouse, France

(Received 14 August 2012; Accepted 12 April 2013; First published online 17 June 2013)

In rabbits, the bacterial and archaeal community of caecal ecosystem is composed mostly of species not yet described and very specific to that species. In mammals, the digestive ecosystem plays important physiological roles: hydrolysis and fermentation of nutrients, immune system regulation, angiogenesis, gut development and acting as a barrier against pathogens. Understanding the functioning of the digestive ecosystem and how to control its functional and specific diversity is a priority, as this could provide new strategies to improve the resistance of the young rabbit to digestive disorders and improve feed efficiency. This review first recalls some facts about the specificity of rabbit digestive microbiota composition in the main fermentation compartment, and its variability with some new insights based on recent molecular approaches. The main functions of the digestive microbiota will then be explained. Finally, some possible ways to control rabbit caecal microbiota will be proposed and a suitable timing for action will be defined.

Keyword: microbiota, implantation, digestive efficacy, digestive health, rabbit



RESEARCH ARTICLE

Microbial ecology of the rumen evaluated by 454 GS FLX pyrosequencing is affected by starch and oil supplementation of diets

Asma Zened^{1,2,3}, Sylvie Combes^{1,2,3}, Laurent Cauquil^{1,2,3}, Jérôme Mariette⁴, Christophe Klopp⁴, Olivier Bouchez^{5,6}, Annabelle Troegeler-Meynadier^{1,2,3} & Francis Enjalbert^{1,2,3}

¹Université de Toulouse INPT ENVT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, Toulouse, France; ²INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, Castanet-Tolosan, France; ³Université de Toulouse INPT ENSAT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, Castanet-Tolosan, France; ⁴INRA Plateforme bio-informatique Genotoul, Biométrie et Intelligence Artificielle, Castanet-Tolosan, France; ⁵INRA, UMR444 Laboratoire de Génétique Cellulaire, INRA Auzeville, Castanet-Tolosan, France; and ⁶GeT-PlaGe, Genotoul, INRA Auzeville, Castanet-Tolosan, France

Correspondence: Francis Enjalbert, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, UMR 1289, 23 chemin des Capelles, BP 87614, 31076 Toulouse Cedex 3, France.
Tel.: +33 5 61 19 39 10;
fax: +33 5 61 19 38 87;
e-mail: f.enjalbert@envt.fr

Received 14 March 2012; revised 31 August 2012; accepted 5 September 2012.
Final version published online 8 October 2012.

DOI: 10.1111/1574-6941.12011

Editor: Julian Marchesi

Keywords: rumen bacteria; diversity; dietary starch; dietary oil; 454 pyrosequencing; taxonomy.

Abstract

To provide a comprehensive examination of the bacterial diversity in the rumen content of cows fed different diets, high-throughput 16S rRNA gene-based pyrosequencing was used. Four rumen fistulated nonlactating Holstein cows received 12 kg of dry matter per day of four diets based on maize silage during four periods: the low-starch diet (22% starch, 3% fat); the high-starch diet, supplemented with wheat plus barley (35% starch, 3% fat); the low-starch plus oil diet, supplemented with 5% of sunflower oil (20% starch, 7.6% fat) and the high-starch plus oil diet (33% starch, 7.3% fat). Samples were taken after 12 days of adaptation, 5 h postfeeding. Whatever the diet, bacterial community of sieved rumen contents was dominated by *Firmicutes* and *Bacteroidetes*. *Lachnospiraceae*, *Ruminococcaceae*, *Prevotellaceae*, and *Rikenellaceae* families were highly present and were clearly affected by cow diet. The highest abundance of *Prevotellaceae* and the lowest abundance of *Ruminococcaceae* and *Rikenellaceae* were found with the high-starch plus oil diet. Dietary starch increased the relative abundance of only three genera: *Barnesiella*, *Oribacterium* and *Olsenella*, but decreased the relative abundances of several genera, with very significant effects for *Rikenellaceae_RC9* and *Butyrivibrio-Pseudobutyrvibrio*. Oil alone had a limited effect, but interestingly, starch plus oil addition differently affected the bacterial populations compared to starch addition without oil.



RESEARCH ARTICLE

Postnatal development of the rabbit caecal microbiota composition and activity

Sylvie Combes^{1,2,3}, Rory Julien Michelland^{1,2,3}, Valérie Monteils^{1,2,3}, Laurent Cauquil^{1,2,3}, Vincent Soulié^{1,2,3}, Ngoc Uyen Tran^{1,2,3}, Thierry Gidenne^{1,2,3} & Laurence Fortun-Lamothe^{1,2,3}

¹INRA, UMR 1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme (TANDEM), Castanet-Tolosan, France; ²Université de Toulouse, INPT-ENSAT, UMR 1289, TANDEM, Castanet-Tolosan, France; and ³ENVT, UMR 1289, TANDEM, Toulouse, France

Correspondence: Sylvie Combes, INRA, UMR 1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme (TANDEM), BP 32607, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France. Tel.: +33 5 61 28 51 06; fax: +33 5 61 28 53 19; e-mail: sylvie.combes@toulouse.inra.fr

Received 10 February 2011; revised 24 May 2011; accepted 1 June 2011.
Final version published online 13 July 2011.

DOI:10.1111/j.1574-6941.2011.01148.x

Editor: Julian Marchesi

Keywords

gut microbiota; postnatal development; CE-SSCP; real-time PCR; rabbit.

Abstract

This study describes the development of the rabbit caecum microbiota and its metabolic activities from the neonatal (day 2) until the subadult period (day 70). The caecal microbiota was analysed using 16S rRNA gene approaches coupled with capillary electrophoresis single-stranded conformation polymorphism (CE-SSCP) and qPCR. At day 2, rabbits harboured population levels up to 8.4, 7.2 and 7.4 log₁₀ copy number g⁻¹ full caecum of the total bacteria, *Bacteroides-Prevotella* and *Firmicutes* groups, respectively. These populations reached their maximum levels from day 14 for *Firmicutes* groups (10.8 log₁₀ copy number g⁻¹ caecal content) and day 21 (11.4 and 10.7 log₁₀ copy number g⁻¹ caecal content of the total bacteria and the *Bacteroides-Prevotella* group, respectively). The archaeal population could be detected only from day 7 onwards (5.5 log₁₀ copy number g⁻¹ full caecum) and reached its maximum level at day 35 (7.4 log₁₀ copy number g⁻¹ caecal content). Similarity analysis, diversity calculation and quantitative evaluation of the stability of bacterial community CE-SSCP profiles provided some evidence that the caecal microbiota develops progressively from a simple and unstable community after birth into a complex and climax community in subadult rabbits. Meanwhile, the microbial activity evolved with the progressive decrease of the propionate/butyrate ratio towards a rabbit-specific value < 1.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Anaerobe

journal homepage: www.elsevier.com/locate/anaerobe

Ecology/environmental microbiology

Molecular analysis of the bacterial community in digestive tract of rabbit

Rory J. Michelland^{a,b,c}, Sylvie Combes^{a,b,c}, Valérie Monteils^{a,b,c}, Laurent Cauquil^{a,b,c},
Thierry Gidenne^{a,b,c}, Laurence Fortun-Lamothe^{a,b,c,*}^aINRA, UMR1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Écosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France^bUniversité de Toulouse, INPT ENSAT, UMR1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Écosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France^cENVT, UMR1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Écosystème et Métabolisme, F-31076 Toulouse, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 December 2008

Received in revised form

5 May 2009

Accepted 7 May 2009

Available online 19 May 2009

Keywords:

Bacteria

Cæcum

Fæces

Diversity index

Structure

ABSTRACT

This work aimed to study the stability over time of the bacterial community in cæcum and fæces of the rabbit (diversity index and structure) without experimental disturbance and to evaluate its relationships with environmental parameters. Soft and hard fæces of 14 rabbits were sampled for 5 weeks while cæcal content was sampled on the 3rd week (by surgery) and the 5th week (at slaughter). Bacterial communities were assessed by studying CE-SSCP profiles of 16S rRNA genes fragments. Redox potential, pH, NH₃-N concentration and volatile fatty acid concentrations were measured in the cæcum. Data showed that bacterial communities of soft and hard fæces barely differed from that of the cæcum (ANOSIM-R < 0.25; *p* < 0.05). Without disturbance, the bacterial communities of fæces were stable over time (ANOSIM-R < 0.25; *p* < 0.001). However, the bacterial communities of cæcum and fæces were affected by the surgery (ANOSIM-R = 0.22–0.33; *p* < 0.001). The cæcal content was an acidic (pH = 6.03 ± 0.33) and an anaerobic environment (redox potential = −160 ± 43 mV). Only the redox potential was correlated with the diversity index of the bacterial community of the cæcum (*R*² = 0.35; *p* < 0.05) and no environmental parameters were correlated to its structure.

© 2009 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Influence of cage or pen housing on carcass traits and meat quality of rabbit

S. Combes^{1,2,3†}, G. Postollec⁴, L. Cauquil^{1,2,3} and T. Gidenne^{1,2,3}

¹INRA, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France; ²Université de Toulouse, INPT ENSAT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31326 Castanet-Tolosan, France; ³ENVT, UMR1289 Tissus Animaux Nutrition Digestion Ecosystème et Métabolisme, F-31076 Toulouse, France; ⁴AFSSA, BP 53, 22440 Ploufragan, France

(Received 12 June 2009; Accepted 9 September 2009; First published online 5 October 2009)

Carcass traits and meat quality of rabbits reared in conventional cages (0.385 m²), small pens (0.662 m²) or large pens (4.052 m²) at a similar stock density of 15 rabbits/m² were compared (n = 30 per group). Pens contained an elevated platform. Slaughter weight (SW; P < 0.01) and cold carcass weight (P < 0.05) decreased in the order of Cage < Small pen < Large pen groups. SW and cold carcass weight were 7% lower in rabbits housed in large pens than in cages. Dressing out and meat-to-bone ratio were not influenced by the housing system. Percentage of fat deposits was highest in caged rabbits (+0.15 point for scapular fat and +0.26 point for perirenal fat compared to rabbits reared in large pens P < 0.05). Rabbits housed in large pens had a bigger proportion of hind part (+1 point), and meat colour was shifted towards greater a values (P < 0.01) compared to caged rabbits. Water holding capacity and shear test parameters in longissimus lumborum muscle, lipid content and shear test parameters of abductor cruralis cranialis, biceps femoris and semitendinosus muscles were not affected by the housing system. Tibia and femur bone moment of inertia increased in the order of Cage < Small pen < Large pen groups (P < 0.05), whereas elastic modulus, which is a measure of intrinsic stiffness, was highest in caged rabbits. This study showed that large pen housing altered carcass traits independently and increased meat redness and fracture resistance of tibia and femur.*

Keywords: rabbits, housing conditions, meat quality, carcass quality

Skeletal muscle adaptations and biomechanical properties of tendons in response to jump exercise in rabbits¹

F. Gondret,*² P. Hernandez,† H. Rémygnon,‡ and S. Combes‡

*Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Unité Mixte de Recherche (UMR) 1079 Systèmes d'Élevage Nutrition Animale et Humaine (SENAH), 35590 Saint Gilles, France; †Institute for Animal Science and Technology, Polytechnic University of Valencia, PO Box 22012, 46022 Valencia, Spain; and ‡INRA, Université de Toulouse, UMR 1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Écosystème et Métabolisme (TANDEM), Chemin de Borde-Rouge, Auzeville, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

ABSTRACT: Pen housing has been proposed in rabbits as an alternative to standard-sized cages. Rabbits reared in pens show greater physical activity. This study investigated whether jump exercise could modify body composition, muscle biochemical and histological characteristics, and some meat quality traits, including the biomechanical properties of tendons. Male weaned rabbits of similar BW (793 ± 11 g) were either reared in giant collective cages and had to jump over obstacles to get food and water for 35 consecutive days (EXE), or confined in small isolated cages (SEDN). Rabbits were weighed weekly to determine ADG ($n = 79$ EXE; $n = 46$ SEDN) and ADFI ($n = 9$ cages in EXE; $n = 46$ cages in SEDN). At approximately 10 wk of age, rabbits were slaughtered in 2 series. After overnight chilling, carcasses in the first series ($n = 30$ EXE; $n = 27$ SEDN) were divided into fore, intermediate, and hind parts. Color and ultimate pH were recorded in the biceps femoris (BF) and LM. The Achilles tendon and patellar ligament were dissected from the legs and cooked. Muscles [semimembranosus proprius, semimembranosus accessorius (SMA), and BF] were harvested from the legs in a subset of animals from the second series ($n = 10$ in EXE; $n = 9$ in SEDN). Both ADG and ADFI were slightly reduced ($P < 0.10$) in EXE rabbits compared

with SEDN rabbits. Exercised rabbits showed a greater ($P = 0.01$) proportion of hind parts than SEDN rabbits. Enzyme activities of 3-hydroxyacyl-CoA dehydrogenase and citrate synthase, which play key roles in fatty acid oxidation and the terminal oxidative degradation of nutrients, respectively, were increased in the semimembranosus proprius, SMA (except citrate synthase), and BF muscles of EXE rabbits compared with SEDN rabbits. Only SMA exhibited a decreased ($P = 0.05$) activity of the glycolytic enzyme, lactate dehydrogenase, in EXE rabbits compared with SEDN animals. Total lipid content, mean diameter of perimysial adipocytes, and activities of core lipogenic enzymes in the SMA and BF muscles did not differ between EXE and SEDN rabbits. Meat color in BF was shifted toward greater a^* (red; $P = 0.001$) and b^* (yellow; $P = 0.02$) values in EXE rabbits compared with SEDN rabbits. Cooked Achilles tendon and patellar ligaments in the legs had greater stiffness ($P \leq 0.05$) in EXE rabbits compared with SEDN rabbits. This experiment demonstrates that rabbit muscles turn to a more oxidative metabolic pattern in response to jump exercise. The quality of attachment of cooked meat to bone is also improved in active rabbits.

Key words: fiber type composition, intramuscular lipid, jump exercise, meat quality, oxidative enzyme, tendon



Contents lists available at ScienceDirect

Meat Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/meatsci



Relationships between sensory and physicochemical measurements in meat of rabbit from three different breeding systems using canonical correlation analysis

Sylvie Combes^{a,b,c,*}, Ignacio González^d, Sébastien Déjean^d, Alain Baccini^d, Nathalie Jehl^e, Hervé Juin^f, Laurent Cauquil^{a,b,c}, Béatrice Gabinaud^{a,b,c}, François Lebas^{a,b,c}, Catherine Larzul^g

^aINRA, Université de Toulouse, UMR 1289, Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème et Métabolisme, Chemin de Borde-Rouge, Auzeville, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

^bINPT-ENSAT, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

^cENVT, F-31076 Toulouse Cedex 3, France

^dInstitut de Mathématiques de Toulouse, UMR 5219, Université Paul Sabatier (Toulouse III), 31062 Toulouse, Cedex 9, France

^eITAVI 28, rue du Rocher, 75008 Paris, France

^fINRA, EASM, Le Magneraud Saint-Pierre-d'Amilly - BP 52, 17700 Surgères, France

^gINRA, Station d'Amélioration Génétique des Animaux, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 January 2008

Received in revised form 4 March 2008

Accepted 31 March 2008

Keywords:

Rabbit meat quality

Canonical correlation analysis

Sensory attributes

ABSTRACT

Meat from rabbits reared either according to a standard (STAND) or a high quality norm (LABEL) or a low growth breeding (RUSSE) system were submitted to a sensory evaluation and to a large set of physicochemical measurements (weight of retail cuts, colour parameters, ultimate pH, femur flexure test, Warner-Bratzler shear test, water holding capacities and cooking losses). STAND rabbit meat exhibited the most juicy meat in back and in leg ($p < 0.01$). Leg tenderness significantly decreased ($p < 0.001$) in the rank order STAND > LABEL > RUSSE. Canonical correlation analysis showed strong correlations between physicochemical and sensory variables ($R^2 = 0.73$ and 0.68 between the two first pairs of canonical variates). Especially, sensory tenderness and WB shear test variables assessed on raw longissimus muscle (LL) were correlated. Fibrous attribute in back was correlated with cooking loss in LL. When analysed separately only RUSSE rabbits exhibited the same relations between variables as those calculated in whole dataset.

© 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Ability of physico-chemical measurements to discriminate rabbit meat from three different productive processes

Sylvie Combes,^{1*} Catherine Larzul,² Nathalie Jehl,³ Laurent Cauquil,¹ Béatrice Gabinaud¹ and François Lebas¹

¹INRA, UMR1289 Tissus Animaux, Nutrition, Digestion, Ecosystème, Métabolisme, Chemin de Borde-Rouge-Auzeville, BP 52627, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France; INP-ENSAT, F-31326 Castanet-Tolosan Cedex, France, ENVT, F-31076 Toulouse Cedex 3, France

²INRA, Station d'Amélioration Génétique des Animaux, BP 52627, 31326 Castanet-Tolosan, France

³ITAVI 28, rue du Rocher, 75008 Paris, France

Abstract

BACKGROUND: To fulfil consumers' requirements for food traceability, it is necessary to have effective tools to differentiate food products according to their origin. The aim of the study was to identify a limited number of physico-chemical measurements that could differentiate rabbit meat from three different rearing systems: standard production system or a high quality norm system or a very low growth breeding system.

RESULTS: The stepwise linear discriminant analysis (LDA) provided 14 physico-chemical variables, then combined into two discriminant factors. Most of them ($n = 8$) were related to bone traits, and especially ($n = 5$) to mechanical femur assessments. Mechanical characteristics of meat were also relevant in this analysis. Decision tree analysis (DTA) selected two variables only (femur stiffness, and ratio of femur weight to chilled carcass weight) to discriminate the three groups. A total of 96% and 90% of rabbits were correctly assigned to their original group according to LDA and DTA, respectively.

CONCLUSION: This work demonstrated that simple physico-chemical traits recorded in carcasses and meat were efficient to discriminate rabbits from three different rearing systems using LDA or DTA procedures. These systems could have further implications for future traceability of breeding origin.

© 2007 Society of Chemical Industry

Keywords: rabbit; meat quality; rearing system; discriminant analysis; decision tree

Valeur nutritionnelle de la viande de lapin

Dans l'esprit du consommateur, les aliments ne doivent plus uniquement couvrir les besoins nutritionnels, mais ils ont depuis peu acquis une valeur santé : « Manger mieux, pour vivre mieux », telle est la nouvelle devise de notre société. Face à ce constat, les industriels du secteur de l'agro-alimentaire redoublent d'arguments pour vendre les produits. Il est désormais nécessaire d'affiner les connaissances relatives à la valeur nutritionnelle des aliments. Quelle est dans ce contexte la valeur nutritionnelle de la viande de lapin ? Sa consommation peut-elle contribuer à améliorer les équilibres alimentaires ?

Résumé

Les aliments pour l'homme, outre leurs aspects nutritionnels de couverture des besoins, ont acquis depuis peu une valeur santé. Face à ce phénomène, de nouveaux besoins de connaissances concernant les constituants des aliments sont apparus. Cet article a pour objet de montrer les points forts et les lacunes dans les connaissances relatives à la valeur nutritionnelle de la viande de lapin. 50 publications ont été sélectionnées. Pour des lapins aux âges et poids commerciaux d'abattage, les teneurs en protéines ($21 \pm 1,5$ % de viande fraîche), eau ($72,5 \pm 2,5$ % de viande fraîche) et minéraux totaux ($1,2 \pm 0,1$ % de viande fraîche) sont similaires dans les différents travaux et ne nécessitent pas d'autres investigations. Les principales causes de variations de la teneur en lipides ($5 \pm 3,3$ % de viande fraîche) sont connues et bien décrites (région anatomique et alimentation principalement). La viande de lapin est pauvre en sodium (49 mg/100 g) mais riche en phosphore (277 mg/100 g). Les teneurs en certains éléments tels le fer (1,4 mg/100 g), le cuivre ou le sélénium ne sont pas suffisamment bien établies. Par ailleurs les teneurs d'autres oligo-éléments n'ont à notre connaissance jamais été évaluées. Enfin, les données disponibles semblent indiquer que la viande de lapin montre un profil global en vitamines proche de celui observé chez le poulet. Il est cependant nécessaire de confirmer ces observations. La viande de lapin présente une teneur en cholestérol relativement basse comparativement aux autres viandes de 59 mg/100g et un ratio en acides gras oméga 6 / oméga 3 avantageux de 5,9. L'équilibre en acide gras de la viande de lapin, animal monogastrique et herbivore, montre par ailleurs une remarquable plasticité en fonction de l'équilibre en acide gras de la ration.

Effect of cooking temperature and cooking time on Warner–Bratzler tenderness measurement and collagen content in rabbit meat

S. Combes^{a,*}, J. Lepetit^b, B. Darche^a, F. Lebas^a

^aStation de Recherches Cunicoles, INRA, 31326 Castanet-Tolosan cedex, France

^bStation de Recherches sur la Viande, INRA, 63122 St-Genes Champanelle, France

Received 15 October 2002; received in revised form 16 December 2002; accepted 17 December 2002

Abstract

The effects of cooking temperature (50–90 °C) and time (10–120 min) on Warner–Bratzler (WB) tenderness measurement of *longissimus lumborum* (LL) muscle in 70-day-old rabbits were investigated. Cooking losses, total collagen content and collagen solubility of LL muscle were measured in parallel. Increasing cooking temperature caused a four-phase effect on WB measurement. Stress and total energy were significantly increased between raw meat and cooked meat at 50 °C, then they dramatically decreased to a minimum observed at 60–65 °C, and increased again to reach a maximum at 80–90 °C. Cooking losses exhibited an 83% increase between 50 and 80 °C. At 80 °C, stress and total energy values remained constant after 20 and 40 min respectively. LL muscle collagen content was 16.4 ± 2.3 mg/g of dried muscle. Collagen solubility at 77 °C for 1 h was high: $75.3 \pm 8.1\%$.

© 2003 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Rabbit; Meat; Cooking; Warner–Bratzler measurement; Mechanical properties
