



HAL
open science

Effets de l'alimentation sans fibre longue chez l'agneau à l'engraissement

Lucie Sarramia

► **To cite this version:**

Lucie Sarramia. Effets de l'alimentation sans fibre longue chez l'agneau à l'engraissement. Médecine vétérinaire et santé animale. 2018. dumas-04906601

HAL Id: dumas-04906601

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04906601v1>

Submitted on 22 Jan 2025

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.

EFFETS DE L'ALIMENTATION SANS FIBRE LONGUE CHEZ L'AGNEAU A L'ENGRAISSEMENT

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

SARRAMIA Lucie

Directeur de thèse : Mme Annabelle MEYNADIER

JURY

PRESIDENT :

M. Claude MOULIS

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :

Mme Annabelle MEYNADIER

M. Francis ENJALBERT

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRES INVITES :

M. Philippe LAMY

M. Alexis VERMEIL

Directeur général de la société Ovi plateau Central

Chef Produit Herbivores à la RAGT

REPARTITION DES ENSEIGNANTS PAR GRADE

(Mise à jour : 07/09/2018)

DIRECTRICE : ISABELLE CHMITELIN

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE (6)

Mme	CLAUW Martine.....	SECTION C.N.E.C.A. N°8	
M.	CONCORDET Didier.....		3
M.	DELVERDIER Maxence.....		7
M.	ENJALBERT Francis.....		6
M.	PETIT Claude.....		1
M.	SHELCHER François.....		8

PROFESSEURS 1° CLASSE (17)

M	BAILLY Jean-Denis.....		4
M.	BERTAGNOLI Stéphane.....		1
M.	BERTHELOT Xavier.....		6
M.	BOUSQUET-MELOU Alain.....		7
M.	BRUGERE Hubert.....		10
Mme	CADIERGUES Marie-Christine.....		8
Mme	CHASTANT-MAILLARD Sylvie.....		6
M.	DUCOS Alain.....		6
M.	FOUCRAS Gilles.....		8
Mme	GAYRARD-TROY Véronique.....		7
M	GUERIN Jean-Luc.....		6
Mme	HAGEN-PICARD Nicole.....		6
M.	JACQUIET Philippe.....		8
M.	LEFEBVRE Hervé.....		7
M.	MEYER Gilles.....		8
M.	SANS Pierre.....		6
Mme	TRUMEL Catherine.....		7

PROFESSEURS 2° CLASSE (7)

Mme	BOULLIER Séverine.....		1
Mme	BOURGES-ABELLA Nathalie.....		7
M.	GUERRE Philippe.....		7
Mme	LACROUX Caroline.....		7
M.	MAILLARD Renaud.....		8
M	MOGICATO Giovanni.....		7
Mme	LETRON-RAYMOND Isabelle.....		7

PROFESSEUR CERTIFIÉ (P.C.E.A.)

Mme	MICHAUD Françoise, Professeur d'Anglais
M.	SEVERAC Benoît, Professeur d'Anglais

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE (11)

M.	BERGONIER Dominique.....		6
Mme	DIQUELOU Armelle.....		8
M.	JAEG Jean-Philippe.....		7
M.	JOUGLAR Jean-Yves.....		8
M.	LYAZRHI Faouzi.....		3
M.	MATHON Didier.....		8
Mme	MEYNADIER Annabelle.....		6
Mme	PRIYMENKO Nathalie.....		6
M.	RABOISSON Didier.....		6
M	VERWAERDE Patrick.....		8
M.	VOLMER Romain.....		1

MAITRES DE CONFERENCES classe normale (24)

M.	ASIMUS Erik.....		8
Mme	BENNIS-BRET Lydie.....		7
Mme	BIBBAL Delphine.....		4
Mme	BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle.....		1
Mme	BOUHSIRA Emilie.....		8
M	CONCHOU Fabrice.....		8
M	CORBIERE Fabien.....		8
M.	CUEVAS RAMOS Gabriel.....		8
Mme	DANIELS Hélène.....		1
Mme	DAVID Laure.....		4
Mlle	DEVIERS Alexandra.....		7
M.	DOUET Jean-Yves.....		8
Mme	FERRAN Aude.....		7
Mme	LALLEMAND Elodie.....		8
Mme	LAVOUE Rachel.....		8
M.	LE LOC'H Guillaume.....		8
M	LIENARD Emmanuel.....		8
Mme	MILA Hanna.....		6
Mme	MEYNAUD-COLLARD Patricia.....		8
M.	NOUVEL Laurent.....		6
Mme	PALIERNE Sophie.....		8
Mme	PAUL Mathilde.....		6
M.	VERGNE Timothée.....		7
Mme	WASET-SZKUTA Agnès.....		6

A.E.R.C. (6)

Mme	BLONDEL Margaux.....		8
M.	CARTIAUX Benjamin.....		7
M.	COMBARROS-GARCIA Daniel.....		8
Mme	COSTES Laura.....		4
M.	GAIDE Nicolas.....		7
M.	JOUSSERAND Nicolas.....		8

MAITRES DE CONFERENCES CONTRACTUEL (2)

Mme	DORE-BORDE Laura.....		8
M.	LEYNAUD Vincent.....		8

Remerciements au jury de thèse

A Monsieur le Professeur Claude MOULIS

Professeur de l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE en Sciences Pharmaceutiques et Praticien hospitalier,

Pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse,

Hommages respectueux.

A Madame le Docteur Annabelle MEYNADIER

Maître de conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE en alimentation,

Pour m'avoir proposé ce travail, pour votre disponibilité, votre patience, votre soutien et votre gentillesse,

Sincères remerciements.

A Monsieur le Professeur Francis ENJALBERT

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE en alimentation,

Pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de cette thèse,

Sincères remerciements.

Remerciements aux membres invités

A Monsieur Philippe LAMY

Directeur général de la société Ovi Plateau Central

Pour avoir accepté de m'inclure dans le Projet Peau'Lux, pour le temps et l'aide que vous m'avez consacrés et pour vos encouragements,

Sincères remerciements.

A Monsieur Alexis VERMEIL

Chef Produit Herbivores à la RAGT

Pour toutes les informations et l'aide que vous m'avez fournis,

Sincères remerciements.

Table des matières

Table des illustrations	11
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	12
Liste des graphiques	15
Introduction.....	17
Première partie : étude bibliographique.....	19
I. Engraissement des agneaux de Roquefort.....	19
A. Roquefort, un grand bassin de production laitière.....	19
B. Le déroulement de l'engraissement des agneaux de Roquefort	21
1. Présentation de l'agneau de Roquefort	21
2. Des sociétés spécialisées dans l'engraissement des agneaux.....	22
3. Logement des agneaux au cours de l'engraissement	23
4. Alimentation au cours de l'engraissement	23
5. Résultats techniques de l'engraissement	26
6. Une activité fortement dépendante du marché	28
C. Les débouchés de l'engraissement des agneaux	30
1. La carcasse	30
2. Le cuir	34
II. Attentes des consommateurs de viande d'agneau.....	38
A. Qualités organoleptiques de la viande d'agneau	40
B. Caractéristiques recherchées du gras d'agneau	42
C. Recommandations nutritionnelles en termes de composition lipidique de la viande ..	44
1. Lien entre AG longs et risque de maladie cardiovasculaire	44
2. Lien entre AG longs et survenue de cancers.....	45
3. Effets bénéfiques des acides conjugués de l'acide linoléique.....	46
D. Influence de l'alimentation sur la valeur nutritionnelle du gras de la viande d'agneau	49
III. L'acidose ruminale : de la sub-acidose à la pathologie.....	55
A. L'acidose subaiguë du rumen	55
1. Systèmes nécessaires au maintien de l'homéostasie du milieu ruminal	56
2. Effets d'une diminution du ratio fourrages-concentrés et de la disparition des fibres longues sur la muqueuse ruminale.....	63

3.	Effets d'une diminution du ratio fourrages-concentrés et de la disparition des fibres longues sur le microbiote ruminal.....	69
B.	L'acidose clinique.....	79
1.	Méthodes de détection des animaux en subacidose.....	79
2.	Manifestations cliniques liées aux modifications fermentaires.....	79
3.	Manifestations cliniques liées à l'inflammation de la paroi ruminale.....	80
	Seconde partie : étude expérimentale.....	82
	Etude expérimentale des effets de rations sans fibres longues chez des agneaux de Roquefort à l'engraissement.....	82
I.	Présentation de l'étude.....	82
A.	Projet Peau'Lux.....	82
B.	Essais alimentaires.....	83
II.	Matériel et méthodes.....	84
A.	Animaux, conditions de logement et rations distribuées.....	84
B.	Evaluation du GMQ.....	87
C.	Evaluation de la concentration en AGV dans le rumen.....	87
D.	Evaluation du profil en AG longs du rumen.....	87
E.	Extraction de l'ADN bactérien et analyse du microbiote.....	87
F.	Analyse des données.....	88
G.	Scanner d'agneaux.....	88
III.	Résultats.....	90
A.	Expérimentation conduite en 2017.....	90
1.	GMQ des agneaux.....	90
2.	Teneur en AGV et AG longs du rumen.....	90
3.	Microbiote ruminal.....	95
4.	Lien entre GMQ, teneur du rumen en AG et microbiote ruminal.....	100
B.	Expérimentation conduite en 2018.....	103
1.	GMQ des agneaux.....	103
2.	Teneur en AGV et AG longs du rumen.....	103
3.	Microbiote ruminal.....	107
4.	Lien entre GMQ, teneur du rumen en AG et microbiote ruminal.....	110
C.	Comparaison des essais de 2017 et 2018.....	112
D.	Bilan technico-économique des essais alimentaires du projet Peau'Lux.....	114
IV.	Discussion.....	116
A.	Effets des rations sans fibres longues sur le milieu ruminal.....	116
1.	AGV totaux.....	117

2. Rapport C2/C3.....	118
3. Iso-acides.....	119
4. AG longs et ratio t10/t11	120
5. Microbiote ruminal	122
B. Corrélations mises en évidence entre le poids et le GMQ des agneaux, les AG ruminiaux et certaines espèces bactériennes.....	127
C. Effets des rations sans fibres longues sur les performances zootechniques	129
D. Bilan des essais alimentaires dans le cadre du projet Peau’Lux.....	130
Conclusion	133
Bibliographie.....	135
Annexe 1 : Mode opératoire du dosage des AGV dans le jus de rumen.....	149
Annexe 2 : Mode opératoire du dosage des AG longs.....	153
Annexe 3 : Mode opératoire d’extraction du microbiote.....	157
Annexe 4 : Etude économique du coût lié au changement de litière et de ration	160

Table des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Bassin de Roquefort	19
Figure 2 : Représentation schématique du devenir des agneaux sevrés du bassin de Roquefort.....	22
Figure 3 : Composition de l'aliment médicamenteux utilisé par Ovi Plateau Central pendant le démarrage de l'engraissement	25
Figure 4 : Composition de l'aliment complémentaire utilisé par Ovi Plateau Central pendant la phase de finition engraissement	26
Figure 5 : Schématisation des étapes d'obtention de la viande d'agneau.....	30
Figure 6 : Photographies des différentes classes de conformation	32
Figure 7 : Photographies des différentes classes d'état d'engraissement.....	33
Figure 8 : Schématisation de la répartition des lésions de buissonné-pailleux sur la peau des agneaux.....	36
Figure 9 : Exemple de râtelier en V sans auge	36
Figure 10 : Principales voies possibles de biohydrogénation des acides linoléique et linoléique	46
Figure 11 : Représentation schématique des voies métaboliques à l'origine du dépôt d'acide ruménique au niveau tissulaire.....	51
Figure 12 : Représentation schématique des principaux mécanismes conduisant à la formation de CLA au niveau musculaire selon la ration.....	52
Figure 13 : Représentation schématique des voies métaboliques à l'origine du dépôt d'acide ruménique au niveau tissulaire.....	53
Figure 14 : Illustration des trois tamis constitutifs du Penn State Separator	58
Figure 15 : Représentation schématique des différents mécanismes de transport d'AGV au niveau d'une cellule épithéliale ruminale	62
Figure 16 : Papilles ruminales observées au microscope électronique. A) Papilles du sac ventral, en forme de langue et rainurées en surface x22. B) Papilles du sac dorsal, davantage souples et moins densément réparties x70.....	63
Figure 17 : Epaisseur de la couche kératinisée de l'épithélium des papilles ruminales des agneaux nourris avec du foin de luzerne (A) ou avec des concentrés (B) x100	66
Figure 18 : Exemple de délimitation des différents compartiments digestifs sur trois coupes de scanner d'un agneau à l'aide du logiciel Horos®	89
Figure 19 : Représentation graphique du volume de chaque compartiment par superposition des délimitations réalisées sur chaque coupe.....	89

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison de la production laitière des différentes races de brebis en France.....	20
Tableau 2 : Décomposition du produit de l'atelier ovin lait, élevages livreurs conventionnels	21
Tableau 3 : Comparaison de la valeur alimentaire de l'aliment distribué pendant la phase de démarrage et de finition aux recommandations nutritionnelles	26
Tableau 4 : Comparaison de l'IC d'animaux de production de filières industrielles	27
Tableau 5 : Grille E.U.R.O.P de classement selon la conformation	31
Tableau 6 : Grille de classement selon l'état d'engraissement	33
Tableau 7 : Importance relative des différents critères de choix de viande d'agneau chez les consommateurs français et valeur utilitaire de chaque niveau	39
Tableau 8 : Influence du système d'alimentation sur l'évaluation sensorielle du muscle longissimus lumborum d'agneau	41
Tableau 9 : Comparaison de la composition lipidique de morceaux de viande de bœuf et d'agneau.....	48
Tableau 10 : Profil des acides gras présents dans les triglycérides du muscle longissimus thoracis d'agneaux nourris à l'herbe ou avec une ration concentrés (85%)/paille (15%), à vitesse de croissance identique	50
Tableau 11 : Profil des acides gras présents dans les triglycérides du muscle longissimus thoracis d'agneaux nourris à l'herbe ou avec une ration à base de concentrés	50
Tableau 12 : Conséquences de la teneur en pNDF>8 sur le pH ruminal, la quantité d'AGV et les durées de mastication et salivation chez des chèvres.....	59
Tableau 13 : Influence du système alimentaire sur la couleur de l'épithélium du sac ventral du rumen d'agneaux	66
Tableau 14 : Effets de l'induction d'une ARSA modérée ou sévère par l'ajout de concentrés chez des vaches laitières sur la durée pendant laquelle le pH est inférieur à 5,6 ainsi que sur la concentration en LPS ruminal et en Haptoglobine sérique	68
Tableau 15 : Effets de l'induction d'une ARSA par le remplacement du foin de luzerne par des granulés de luzerne chez des vaches laitières sur la durée pendant laquelle le pH est inférieur à 5,6, la concentration en LPS ruminal et en Haptoglobine sérique	68
Tableau 16 : Substrats utilisés (+) ou non (-) par les principales espèces bactériennes du rumen	72
Tableau 17 : Détail de la nature de la litière, de l'aliment dans le râtelier ainsi que de l'aliment finition pour les trois lots lors de l'essai de 2017	86
Tableau 18 : Détail de la nature de la litière, de l'aliment dans le râtelier ainsi que de l'aliment finition pour les trois lots lors de l'essai de 2018.....	86

Tableau 19 : GMQ des agneaux au sein des différents lots en 2017.....	90
Tableau 20 : Quantité totale en AGV et pourcentage des différents AGV dans le jus de rumen selon les différents essais en 2017.	90
Tableau 21 : Quantité totale en AG, pourcentage individuel des différents AG et rapport t10/t11 dans le rumen selon les différents essais en 2017.....	91
Tableau 22 : Corrélations majeures entre certains AG et AGV et les deux composantes et p-value de l'ANOVA testant l'effet lot sur chaque variable. Les AGV et AG présentés ont été choisis d'après le cercle de corrélations	93
Tableau 23 : Valeur moyenne des index de richesse et diversité alpha selon les lots de 2017.....	96
Tableau 24 : Nomenclature des clusters bactériens constituant les composantes	98
Tableau 25 : Part des principaux clusters intervenant dans les deux composantes discriminant les agneaux selon leur microbiote.....	99
Tableau 26 : Moyenne des abondances relatives de certaines bactéries dont l'espèce a été identifiée dans les différents lots en 2017 et rapport moyen des deux principaux phyla	100
Tableau 27 : Affiliation taxonomique des clusters bactériens impliqués dans les sPLS	102
Tableau 28 : GMQ des agneaux au sein des différents lots en 2018.....	103
Tableau 29 : Quantité totale en AGV et pourcentage des différents AGV dans le jus de rumen selon les différents essais en 2018.	103
Tableau 30 : Quantité totale en AG, pourcentage individuel des différents AG et rapport t10/t11 dans le rumen selon les différents essais en 2018.....	104
Tableau 31 : Corrélations majeures entre certains AG et AGV et les deux composantes et p-value de l'ANOVA testant l'effet lot sur chaque variable. Les AGV et AG présentés ont été choisis d'après le cercle de corrélations	106
Tableau 32 : Valeur moyenne des index de richesse et de diversité alpha selon les lots de 2018.....	107
Tableau 33 : Nomenclature des clusters bactériens constituant les composantes	108
Tableau 34 : Part des principaux clusters intervenant dans les deux composantes discriminant les agneaux selon leur microbiote.....	109
Tableau 35 : Moyenne des abondances relatives de certaines bactéries dont l'espèce a été identifiée dans les différents lots en 2018 et rapport moyen des deux principaux phyla	109
Tableau 36 : Affiliation taxonomique des clusters bactériens impliqués dans les sPLS	111
Tableau 37 : Influence de l'année de réalisation des expériences sur le GMQ, la quantité de certains acides gras volatils et acides gras	113

Tableau 38 : Solde par agneau de l'engraissement pour chacun des trois lots de 2017	115
Tableau 39 : Solde par agneau de l'engraissement pour chacun des trois lots de 2018	115
Tableau 40 : Mortalité dans les différents lots d'agneaux au cours de l'engraissement	115
Tableau 41 : Perte réelle par agneau sorti en prenant en compte les variations de mortalité, de rendement carcasse, de coût alimentaire et de litière.....	116

Liste des graphiques

Graphique 1 : Répartition de la production de lait de brebis en France selon les races	20
Graphique 2 : Evolution du prix des agneaux sous la mère de conformation R et de poids vif compris entre 32 et 38 kg sur le marché de Réquista (12) entre janvier et juin 2018.....	29
Graphique 3 : Evolution en fonction du poids des animaux des quantités de protéines et de lipides fixées chez les ovins.....	34
Graphique 4 : Répartition en volume des achats de viande d'agneau des ménages français par classe d'âge en 2016	38
Graphique 5 : Clarté de la viande d'agneaux nourris avec de l'herbe ou des concentrés au cours des 6 jours de mesure obtenue par spectrocolorimétrie	41
Graphique 6 : Influence du rationnement du concentré sur la couleur du gras.....	43
Graphique 7 : Variation individuelle du ratio t10/t11 18:1 dans la viande d'agneaux.....	54
Graphique 8 : Relation entre le nombre de papilles et la concentration molaire ruminale en propionate chez des taureaux Holstein	64
Graphique 9 : Structure de la communauté bactérienne par séquençage basé sur l'ARNr 16S de quatre agneaux dans des mêmes conditions environnementales et consommant la même ration.....	70
Graphique 10 : Profil phylogénétique du microbiote ruminal de mouton obtenu par séquençage shotgun.....	71
Graphique 11 : Variations (log2) des principaux micro-organismes ruminiaux avant le repas chez des animaux présentant une ARSA sévère (barres noires) ou modérée (barres grises) provoquée par l'ajout de concentrés ou une ARSA induite par le retrait des fibres longues (barres blanches) par rapport à la situation contrôle	75
Graphique 12 : Conséquences des variations de pH sur les flores microbiennes actives et les fermentations associées	77
Graphique 13 : Variations de la concentration en acides organiques totaux, AGV et acide lactique selon le pH ruminal lors d'acidose aiguë (A) ou d'acidose subaiguë (B)	78
Graphique 14 : Projection des individus dans un plan selon la teneur en AGV et AG longs de leur rumen.....	92
Graphique 15 : Cercle des corrélations des différents AGV et AG avec les deux composantes.....	93
Graphique 16 : Box-plots du ratio t10/t11 pour les trois lots de 2017.....	94
Graphique 17 : Box-plot des estimateurs de richesse et diversité alpha pour les agneaux du lot témoin, de l'essai 1 et de l'essai 2 en 2017	96
Graphique 18 : Représentation des individus dont le microbiote est représenté par deux coordonnées, d'après une nMDS	97

Graphique 19 : Projection des individus dans un plan selon la composition de leur microbiote	98
Graphique 20 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le poids et le GMQ des agneaux et la teneur en AGV et AG longs du rumen.....	101
Graphique 21 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le poids des agneaux et leur GMQ et la richesse des principaux clusters bactériens	102
Graphique 22 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre la teneur en AG du rumen et la richesse des principaux clusters bactériens.....	102
Graphique 23 : Projection des individus dans un plan selon la teneur en AGV et AG longs de leur rumen.....	105
Graphique 24 : Projection des individus dans un plan selon la composition de leur microbiote	108
Graphique 25 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le GMQ, le poids des agneaux et la teneur de leur rumen en AGV et AG longs.....	110
Graphique 26 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre les AGV et AG longs ruminiaux et le microbiote ruminal	111
Graphique 27 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le poids, le GMQ des agneaux et le microbiote ruminal.....	112

Introduction

Les modes de consommation ne cessent d'évoluer et subissent de profonds changements depuis quelques années. La viande qui autrefois était un produit noble et apprécié revêt de plus en plus une image négative auprès des consommateurs français. La médiatisation de certaines conditions d'élevage ou d'abattage contraires au bien-être animal confère tout d'abord au milieu de l'élevage une image fortement négative. Le réchauffement climatique est lui aussi une préoccupation majeure et l'une des solutions pour réduire la pollution est de favoriser les productions végétales face aux productions animales. Enfin les consommateurs sont davantage vigilants aux propriétés nutritionnelles des aliments qu'ils ingèrent. La consommation de viande étant associée à des risques accrus de maladie cardiovasculaire ou de cancer, ils privilégient les produits végétaux. Ces raisons peuvent expliquer la diminution de la consommation de viande par les ménages français. Dans ce contexte il semble important pour les filières d'élevage de redorer l'image de leur production, de diversifier leur activité et trouver des débouchés annexes.

La filière agneaux de Roquefort, dont l'objectif premier est l'engraissement des agneaux issus des troupeaux laitiers Lacaune, s'intéresse ainsi à l'utilisation de la peau des agneaux pour en faire du cuir comme source de revenus annexe. Le cuir d'agneau qui est de grande qualité est particulièrement recherché par l'industrie de la maroquinerie de luxe. Cependant jusqu'à présent les peaux issues des agneaux Lacaune présentaient un nombre de défauts trop important pour qu'elles puissent être valorisées et étaient délaissées au profit des peaux espagnoles. Une partie des altérations de la peau survient au moment de l'élevage en raison de l'utilisation de paille comme litière et comme fourrage grossier. Diverses pistes ont été envisagées par les professionnels de la filière pour améliorer la qualité des peaux, notamment la modification du type de râteliers utilisés afin que la paille ne puisse pas tomber sur le dos des agneaux couchés. Une autre piste d'amélioration consiste à retirer la paille sous forme de fibres longues et à utiliser des copeaux végétaux comme litière et des granulés de paille broyée comme fourrage. Il est cependant nécessaire de se demander si le retrait des fibres longues ne modifie pas les performances zootechniques, la digestion ainsi que la qualité de la viande obtenue et serait pénalisant pour la filière malgré l'amélioration de la qualité des peaux.

La partie bibliographique de ce travail présentera dans un premier temps le déroulement de l'engraissement des agneaux dans le cas particulier des agneaux de Roquefort avant de s'intéresser à l'objectif principal de l'engraissement qui est de répondre aux attentes des consommateurs de viande. La troisième partie abordera un trouble digestif fréquent qui peut se mettre en place lors d'une diminution de la quantité de fourrages ou de la disparition des fibres longues dans la ration, l'acidose ruminale. Enfin la partie expérimentale exposera les résultats d'une étude menée dans le cadre du projet PeauLux et dont l'objectif

final est d'améliorer la qualité des peaux Lacaune pour en faire du cuir de luxe. Dans cette étude nous déterminerons les conséquences du remplacement des fibres longues de paille par des granulés de paille broyée dans la ration d'agneaux Lacaune à l'engraissement sur la croissance, le microbiote ruminal et les fermentations associées.

Première partie : étude bibliographique

I. Engraissement des agneaux de Roquefort

A. Roquefort, un grand bassin de production laitière

Le rayon de Roquefort est situé au sud du Massif-Central et regroupe les départements de l'Aude (11), de l'Aveyron (12), du Gard (30), de l'Hérault (34), de la Lozère (48) et du Tarn (81) (Figure 1).

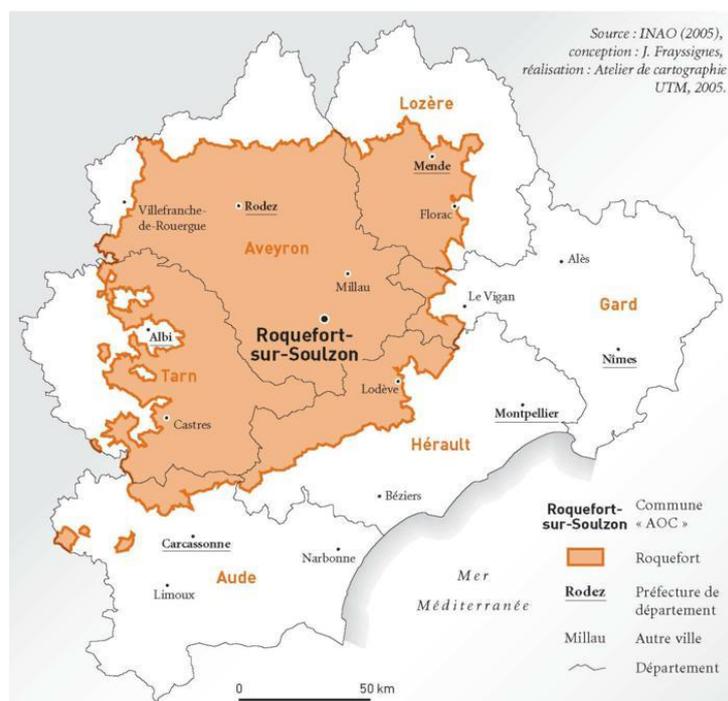
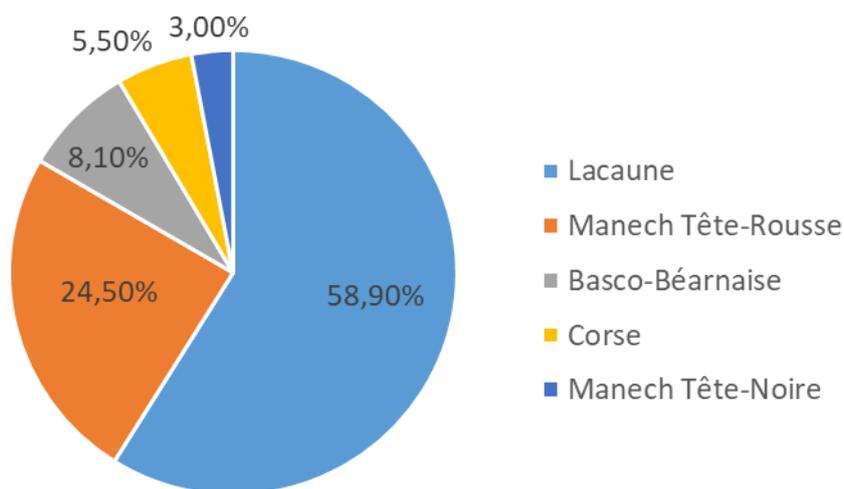


Figure 1 : Bassin de Roquefort (Frayssignes 2007)

Grâce à la présence d'environ 800 000 brebis de race Lacaune Lait dont 157 710 sont au contrôle laitier officiel (CLO), le bassin de Roquefort représente le principal bassin de production de lait de brebis en France. Comme on peut le voir sur le graphique 1, 58,90% du lait de brebis produit en France est issu des brebis de race Lacaune (Institut de l'Élevage 2017, résultats du CLO 2016).

Les brebis de race Lacaune Lait possèdent des aptitudes laitières remarquables comme le montre le tableau 1 présentant les résultats du CLO 2016, elles produisent 317,9 L de lait en 170 jours de traite (Institut de l'Élevage 2017a). Le lait récolté de décembre à juillet est principalement utilisé pour la production de 19 000 tonnes annuelles de fromages AOC et AOP Roquefort (INAO 2017).



Graphique 1 : Répartition de la production de lait de brebis en France selon les races (Institut de l'Élevage 2017a, résultats du CLO 2016)

Tableau 1 : Comparaison de la production laitière des différentes races de brebis en France (Institut de l'Élevage 2017a)

Race	Production laitière (L)	Ecart type de la production (L)	Durée de traite (j)	Ecart type de la durée de traite (j)
Lacaune	317,9	99,7	170	41
Manech Tête-Rousse	228,8	87,7	160	49
Basco-Béarnaise	204,8	77,6	150	49
Corse	162,3	71,2	185	57
Manech Tête-Noire	167,7	70,1	147	47
Autres races traites	147,4	116,3	115	51

Outre le lait, d'autres produits issus de cet élevage ovin laitier de brebis Lacaune Lait sont valorisés. C'est le cas des agneaux de Roquefort, sevrés à quatre semaines et engraisés jusqu'à environ 110 jours, âge auquel ils sont alors abattus (Poncelet 2010). Ces agneaux sont qualifiés de primeurs car premiers de l'année mis en vente sur le marché français. Ce sont ainsi 800 000 agneaux issus des brebis laitières Lacaune qui sont engraisés dans le bassin de Roquefort et vendus chaque année. La viande des brebis de réforme, la laine (toison de 1,5 kg par brebis) et le cuir des agneaux sont eux aussi valorisés.

Le bassin comporte également 280 000 brebis Lacaune Viande, permettant de vendre chaque année des agneaux élevés sous la mère, essentiellement dans des démarches de labellisation comme le Label Rouge « Agneau fermier » (Institut de l'Élevage et Races de France 2015).

Les agneaux de Roquefort ont la particularité de provenir exclusivement du troupeau laitier. Leur valorisation permet d'assurer un complément de revenu aux éleveurs, notamment lors des périodes creuses de récolte du lait. Si on s'intéresse à l'importance de la vente d'agneaux de Roquefort pour leur viande dans la trésorerie des éleveurs laitiers, comme le présente le tableau 2, on remarque que 25% en moyenne de l'apport financier total des élevages laitiers est assuré par ces agneaux. L'agneau ne représente alors pas un sous-produit mais un co-produit de la production laitière dans le bassin de Roquefort.

Tableau 2 : Décomposition du produit de l'atelier ovin lait, élevages livreurs conventionnels (Source : INOSYS Réseaux d'élevage, campagnes 2013, 2014 et 2015) (FranceAgriMer 2018))

		Roquefort
€/1000 litres	Produit lait	919
	Co-produit viande	302
	Dont produit agneaux	256
	Produit ovin hors aides	1 220
	Aides couplées	96
	Produit ovin, avec les aides couplées	1 316
Part du co-produit viande / produit ovin, hors aides	Moyenne	25 %
	Variabilité	20 – 30 %

B. Le déroulement de l'engraissement des agneaux de Roquefort

1. Présentation de l'agneau de Roquefort

Les agneaux de Roquefort naissent en bergerie entre novembre et avril et sont élevés une vingtaine de jours avec leur mère. Vers 25-27 jours, lorsqu'ils font en moyenne 14 kg de poids vif, ils en sont séparés. Un poids minimal de 10 kg est nécessaire au sevrage. Un tiers des agnelles est conservé pour le renouvellement du troupeau laitier.

Les mâles ainsi que les femelles non conservées par les éleveurs laitiers sont soit engraisés soit exportés vivants vers l'Italie ou l'Espagne où ils sont abattus maigres à 12-14 kg de poids vif pour la consommation d'agneaux de lait. L'exportation à l'étranger de ces agneaux de Roquefort tout juste sevrés est de plus en plus rare et ne concerne aujourd'hui plus que 150 000 animaux au maximum (Figure 2).

Deux autres possibilités d'exportation existent pour les agneaux engraisés, en milieu et en fin d'engraissement. En cours d'engraissement, alors que les agneaux font 20-25 kg,

quelques individus étaient dans le passé exportés vers l'Espagne où l'Italie qui avaient l'habitude de consommer des agneaux de ce gabarit. Actuellement plus aucun agneau n'est exporté à ce stade d'engraissement. Une autre pratique est l'export des agneaux lourds, dont l'engraissement est terminé, vers des pays tiers comme le Liban, la Lybie... Ces agneaux sont utilisés lors des fêtes religieuses (musulmanes, juives...). Ce marché varie considérablement selon les années car il est fortement dépendant des possibilités d'obtention de devises et des garanties de paiement des pays acheteurs.

La majorité des agneaux nés dans le bassin de Roquefort, soit environ 85% d'entre eux, est engraisée dans cette zone et abattue vers 110 jours. Ce sont ces agneaux dont la viande est destinée au marché français qui sont véritablement qualifiés d'agneaux de Roquefort.

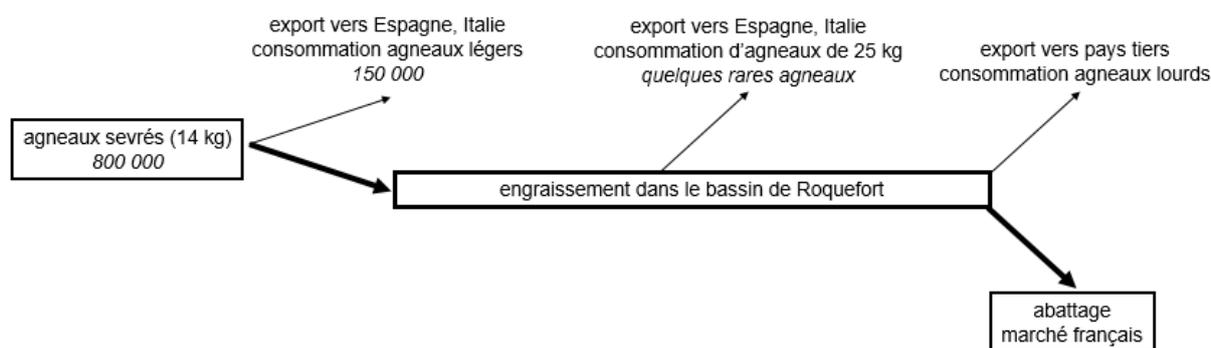


Figure 2 : Représentation schématique du devenir des agneaux sevrés du bassin de Roquefort (Lamy 2018)

2. Des sociétés spécialisées dans l'engraissement des agneaux

Les agneaux de Roquefort, contrairement aux autres agneaux français, ne sont pas engraisés sur leur exploitation de naissance. Lorsque les éleveurs laitiers remettent leurs brebis à la traite au moment du sevrage, ils conservent leurs agnelles pour le renouvellement et vendent le reste des agneaux à des sociétés spécialisées dans l'engraissement des agneaux de Roquefort. Ces sociétés sont des coopératives comme UNICOR et ARTERRIS ou des sociétés de statut juridique différent comme Ovi Plateau Central (Société anonyme), la Métairie du Rouergue (Société à responsabilité limitée), GRIMAL (Société à responsabilité limitée) ou encore Aprovia (Société anonyme mixte d'intérêt collectif agricole à conseil d'administration) (Lamy 2018).

Les engraisseurs achètent les agneaux aux éleveurs laitiers et les transportent vers des bergeries d'engraissement. Deux possibilités existent selon la société propriétaire de l'agneau. Dans certains cas, comme avec Ovi Plateau Central ou GRIMAL, l'engraissement est réalisé par leur personnel salarié dans des bergeries dont ils sont propriétaires. L'autre

possibilité, le façonnage, correspond à la situation dans laquelle des éleveurs-engraisseurs particuliers exercent une prestation de service pour la société qui reste propriétaire des agneaux. Cette dernière fournit l'aliment complet et les produits vétérinaires autorisés dans le Plan Sanitaire d'Elevage. L'amortissement du bâtiment, l'électricité, l'eau, la paille et la main d'œuvre sont quant à eux à la charge de l'éleveur-engraisseur. La prestation de service est payée à l'éleveur sur la base du nombre d'agneaux sortis : ce dernier est rémunéré autour de 6,50€ par agneau sorti en fin d'engraissement (Lamy 2018).

Une fois que les agneaux présentent un poids et un état d'engraissement correspondant aux attentes, ils sont transportés vers l'abattoir. Chaque société travaille avec des abatteurs spécifiques, il s'agit de Bigard, SVA/Intermarché, Bichon et Destrel pour Ovi Plateau Central. Les agneaux appartenant à cette société sont ainsi conduits vers les abattoirs détenus par ces opérateurs.

3. Logement des agneaux au cours de l'engraissement

A leur arrivée en bergerie d'engraissement, les agneaux reçoivent une injection de sélénium et vitamine E afin de prévenir l'apparition de la maladie du raide, une myopathie due à une carence en ces deux nutriments. Ils sont également sexés pour faire des loges distinctes entre mâles et femelles. Les femelles déposent du gras plus tôt que les mâles, elles ont par conséquent un engraissement plus court et un poids vif final moindre que les mâles. Sexer et séparer les agneaux permet de mieux gérer ces différences.

Les agneaux sont ensuite répartis dans des loges d'environ 150-200 animaux (Lamy 2018), dans des bâtiments de dimension variable selon s'il s'agit d'un élevage particulier ou du site possédé par une société d'engraissement. Les normes d'élevage sont de 0,25 m² par agneau lorsqu'ils sont âgés de moins de 2 mois et de 0,5 m² par agneau au-delà. Une aire ne doit pas contenir plus de 200 agneaux (Institut de l'Elevage 2018a). Les animaux sont logés sur une litière de paille qui s'accumule tout au long de l'engraissement. L'ajout de paille est effectué régulièrement. Entre deux lots les loges sont curées mais les enchainements de bandes rendent impossible la réalisation d'un vide sanitaire. Celui-ci est réalisé au moment de la période estivale, période pendant laquelle le nombre d'agneau engraisés est fortement diminué.

4. Alimentation au cours de l'engraissement

Tout au long de l'engraissement les agneaux disposent d'eau, d'aliment concentré et de paille à volonté. Un principe essentiel à l'alimentation et à l'abreuvement des agneaux consiste en ce qu'ils aient toujours à boire et à manger à disposition. Les conséquences d'un arrêt de la distribution d'eau ou d'aliment pendant plusieurs heures peuvent être dramatiques :

au moment du réapprovisionnement, les agneaux se précipitent vers les abreuvoirs et les mangeoires et peuvent se monter les uns sur les autres pour constituer des montagnes jusqu'à trois mètres de haut. Un nombre non négligeable d'agneaux peut ainsi mourir étouffé.

La paille est distribuée sous forme de fibres longues dans des râteliers afin que sa consommation stimule la rumination des agneaux. Il s'agit de paille de blé dont la valeur alimentaire importe peu. Les qualités recherchées sont surtout une fibrosité importante, une bonne appétence et l'absence de moisissure. Lorsque les râteliers sont vidés pour renouveler la paille, celle qui est enlevée est jetée dans les loges au-dessus des agneaux pour servir de litière.

La valeur alimentaire de l'aliment distribué aux agneaux reste constante tout au long de l'engraissement, elle est de l'ordre de 0,85-1 UF et 100-120g de PDI/kg MB (Institut de l'Élevage 2017b). La nature de cet aliment diffère cependant entre le début et la fin de l'engraissement ce qui permet de distinguer deux phases.

- 0 – 3 semaines : **aliment médicamenteux**

A leur arrivée en bergerie d'engraissement, des agneaux issus d'une dizaine d'élevages en moyenne, avec leur microbisme propre, sont mélangés. A cela s'ajoute le stress du sevrage, du transport, du changement d'environnement et du mélange avec d'autres individus. Un traitement prophylactique au moyen d'un aliment médicamenteux est réalisé afin de prévenir la survenue de coccidiose et de pathologies pulmonaires. A l'aliment classique sont alors ajoutés des antibiotiques (des sulfamides pour prévenir la coccidiose et des tétracyclines et du triméthoprime pour prévenir les troubles pulmonaires) et éventuellement des anticoccidiens spécifiques (Décoquinate notamment). La composition de l'aliment médicamenteux utilisé lors de la phase de démarrage chez Ovi Plateau Central est présentée sur la figure 3. Dans cet aliment-là, de l'oxytétracycline et du décoquinate sont utilisés.

ETIQUETTE PRODUIT

COMPOSITION

Orge / Maïs / Blé / Tourteau d'extraction de Colza/ Tourteau Feed de Tournesol décortiqué/ Pulpes de betterave sucrières/ Pellicules de graines de Soja/ Drèche de Maïs/ Tourteau d'extraction de Soja/ Luzerne déshydratée agglomérée/ Son fin de Blé / Prémélange médicamenteux/ Carbonate de Calcium/ Mélasse de Betterave/ Ecart de triage de Maïs/ Ecart de triage Céréales à paille/ Tourteau de germes de Maïs/ Chlorure de Sodium

CONSTITUANTS ANALYTIQUES

Protéine brute	16,50 %
Matières grasses brutes	2,30 %
Cellulose brute	9,00 %
Cendres brutes	7,40 %
Calcium	1,30 %
Phosphore	0,44 %
Magnésium	0,30 %
Sodium	0,20 %

ADDITIFS

ANTI-AGGLOMERANTS ET LIANTS

Sepiolite (E532) : 3000 mg/kg

SUBSTANCES AROMATIQUES

Substances aromatiques et apéritives

VITAMINES

Vitamine A (3a672A) : 7000 UI/kg / Vitamine B1 : 10 mg/kg / Vitamine D3 (3a671) : 1500 UI/kg / Vitamine E (3A700) : 20 mg/kg

OLIGO-ELEMENTS

Cobalt (Carbonate basique de Cobalt monohydraté) E3 : 0,5 mg/kg/ Iode (Iodate de calcium anhydre) E2 : 0,6 mg/kg / Manganèse (Oxyde manganèse) E5 : 40 mg/kg / Molybdate de sodium E7 : 0,5 mg/kg / Sélénium (Sélénite de sodium) E8 : 0,4 mg/kg / Zinc (Sulfate de Zinc) E6 : 48 mg/kg

STABILISATEURS DE LA FLORE INTESTINALE

Saccharomyces Cerevisiae CNCM I-1077 (E1711) : 800000000 UFC/kg

AUTRES ADDITIFS D'ORIGINE ZOOTECNIQUE : réduction du pH urinaire

Chlorure d'Ammonium (4d7) : 5000 mg/kg

SUBSTANCES MEDICAMENTEUSES

Décoquinat : 60 mg/kg / Oxytétracycline : 1200 mg/kg

Figure 3 : Composition de l'aliment médicamenteux utilisé par Ovi Plateau Central pendant le démarrage de l'engraissement (Lamy 2018)

- 3 semaines – fin d'engraissement : **aliment finition**

Cet aliment se compose de 20% de céréales entières et de 80% de granulés d'aliment complémentaire. Un agneau en consomme en moyenne 1,2 kg par jour. L'utilisation de céréales sous forme entière et non concassée permet de retarder la libération d'amidon et donc sa digestion enzymatique. La société Ovi Plateau Central emploie de l'orge comme céréale entière ainsi qu'un aliment complémentaire dont la composition est détaillée sur la figure 4. Différents additifs sont employés dont notamment le chlorure d'ammonium qui est un acidifiant urinaire. Les rations d'engraissement constituées de céréales sont riches en phosphore ce qui favorise la formation de cristaux dans les urines (phosphates ammoniacomagnésiens). L'agrégation de ces cristaux peut conduire à l'apparition de lithiases urinaires (calculs obstruant l'urètre). L'emploi de chlorure d'ammonium permet d'acidifier les urines et de limiter la formation des calculs (Sagot 2017).

La valeur alimentaire de l'aliment médicamenteux distribué aux agneaux pendant la phase de démarrage ainsi que celle de l'aliment finition (orge + aliment complémentaire) donné ensuite est présentée sur le tableau 3. On constate un léger déficit protéique au cours de la finition. Ceci est toutefois à moduler car les recommandations énoncées dans le tableau ne sont pas spécifiques aux agneaux Lacaune pour lesquels les essais terrain ont montré qu'une augmentation de la teneur énergétique de l'aliment par rapport aux normes permettait

d'abaisser son taux protéique et d'obtenir une croissance satisfaisante. Par ailleurs, même si peu de paille est consommée, celle-ci module les valeurs énoncées.

ETIQUETTE PRODUIT		
COMPOSITION		
Orge / Maïs / Blé / Particules de graines de Soja / Tourteau Feed d'extraction de Soja / Drèche de Maïs / Drèche de Blé / Son fin de Blé / Ecart de triage de Maïs / Ecart triage Céréales à paille / Carbonate de Calcium / Mélasse de Betterave / Tourteau de Tournesol Décortiqué / Bicarbonate de Sodium / Chlorure de Sodium		
CONSTITUANTS ANALYTIQUES		ADDITIFS
Protéine brute	16,00 %	VITAMINES
Matières grasses brutes	2,70 %	Vitamine A (3a672A) : 7560 UI/kg / Vitamine B1 : 12 mg/kg / Vitamine D3 (3a671) : 1800 UI/kg / Vitamine E (3A700) : 12 mg/kg
Cellulose brute	8,00 %	OLIGO-ELEMENTS
Cendres brutes	7,20 %	Cobalt (Carbonate basique de Cobalt monohydraté) E3 : 0,6 mg/kg/ Iode (Iodate de calcium anhydre) E2 : 0,8 mg/kg / Manganèse (Oxyde manganèse) E5 : 48 mg/kg / Molybdate de sodium E7 : 0,6 mg/kg / Sélénium (Sélénite de sodium) E8 : 0,5 mg/kg
Calcium	1,20 %	AUTRES ADDITIFS D'ORIGINE ZOOTECHNIQUE : réduction du pH urinaire
Phosphore	0,36 %	Chlorure d'Ammonium (4d7) : 10000 mg/kg
Magnésium	0,30 %	ANTI-AGGLOMERANTS ET LIANTS
Sodium	0,30 %	Sepiolite (E532) : 3600 mg/kg

Figure 4 : Composition de l'aliment complémentaire utilisé par Ovi Plateau Central pendant la phase de finition engraissement (Lamy 2018)

Tableau 3 : Comparaison de la valeur alimentaire de l'aliment distribué pendant la phase de démarrage et de finition aux recommandations nutritionnelles (* Institut de l'Elevage 2017b et ** National Research Council of the National Academies 2007)

/kg MB	Aliment démarrage	Aliment finition distribué (80% aliment complémentaire + 20% orge)	Recommandations
UF	0,92	0,94	0,85 – 1 *
MAT	165 g	148 g	165 - 175 g *
CB	90 g	73 g	
Ca	13 g	9,7 g	5,3 g **
P	4,4 g	3,6 g	3,8 g **

5. Résultats techniques de l'engraissement

L'alimentation fortement énergétique apportée aux agneaux grâce aux concentrés permet d'obtenir un poids et un état d'engraissement souhaités pour les agneaux en un minimum de temps, à savoir moins de trois mois. En fin d'engraissement le poids vif final attendu des agneaux est de 30 à 32 kg pour les femelles et de 36 à 38 kg pour les mâles (Poncelet 2010).

Les données qui suivent correspondent aux résultats des agneaux à l'engraissement de la société Ovi Plateau Central (Lamy 2018), elles sont relativement similaires pour l'ensemble des agneaux de Roquefort.

La durée d'engraissement pour parvenir à de tels objectifs de poids est d'environ 85 jours (Lamy 2018). Le départ à l'abattoir est décidé selon une évaluation de l'état d'engraissement des agneaux au moyen de la palpation de trois points de repère : le dos, la queue et les côtes (Institut de l'Elevage 2018). L'objectif de cette palpation est d'estimer la quantité de gras déposé et d'éviter qu'il y en ait en excès. Selon les agneaux la croissance est plus ou moins rapide. Les premiers à partir le font après 55-60 jours d'engraissement alors que les plus chétifs au sevrage peuvent être engraisés jusqu'à 90 jours (Lamy 2018).

La vitesse de croissance moyenne de l'agneau sur la période d'engraissement est traduite par le gain moyen quotidien (GMQ) exprimé en g/j. Il est de l'ordre de 300 g/j (Lamy 2018).

Un autre paramètre intéressant à évaluer est l'indice de consommation (IC). L'IC correspond à la quantité d'aliment consommée par l'agneau (en kg) pour obtenir un kg de croissance. L'IC des agneaux de Roquefort est compris entre 3,9 et 4 (Lamy 2018). En comparaison avec d'autres animaux de production comme le poulet standard ou le porc, cet IC est élevé (Tableau 4). Il est cependant bien inférieur à celui des taurillons Holstein, eux aussi issus d'un troupeau laitier. L'alimentation étant le poste de dépenses majeurs pendant l'engraissement, il est souhaitable que les agneaux grandissent un maximum en consommant le moins d'aliment possible, ce qui se traduit par un IC bas. L'utilisation de rations énergétiques à base de concentrés répond à cet objectif.

Tableau 4 : Comparaison de l'IC d'animaux de production de filières industrielles (IFIP 2015 ; Chambre d'Agriculture de la Manche 2009 ; ENITA de Bordeaux, Chinzi 2002)

Production	IC
Poulet standard	1,9
Poulet label	≥ 3
Porc	2,69
Taurillon Holstein 385 kg	6,9
Agneau de Roquefort	3,9 - 4

La mortalité au cours de l'engraissement est en moyenne de 4% (Lamy 2018). Les principales causes de mortalité regroupent la coccidiose (mortalité liée à de la diarrhée avec surinfections dans 70-75% des cas ou mortalité directe), les troubles pulmonaires (accentués par l'humidité lors de conditions climatiques défavorables et la chaleur et l'ammoniac dans les bergeries) et surtout la Border Disease. Ce virus encore bien présent dans le bassin de Roquefort pose de réels soucis pour les éleveurs et les engraisseurs. Il est à l'origine d'un affaiblissement, d'un amaigrissement, de l'apparition de diarrhées, de bronchopneumonies, de retards de croissance et peut causer de la mortalité chez les agneaux à l'engraissement. Un suivi sérologique est réalisé au moment de la prophylaxie afin de détecter les élevages infectés et alloter les agneaux en début d'engraissement selon leur statut d'origine. Dans les

lots infectés la mortalité peut atteindre les 10%. Les conséquences sont non négligeables car 1% de mortalité correspond à 100 000€ de résultats en moins pour une structure de la taille d'Ovi Plateau Central (Lamy 2018).

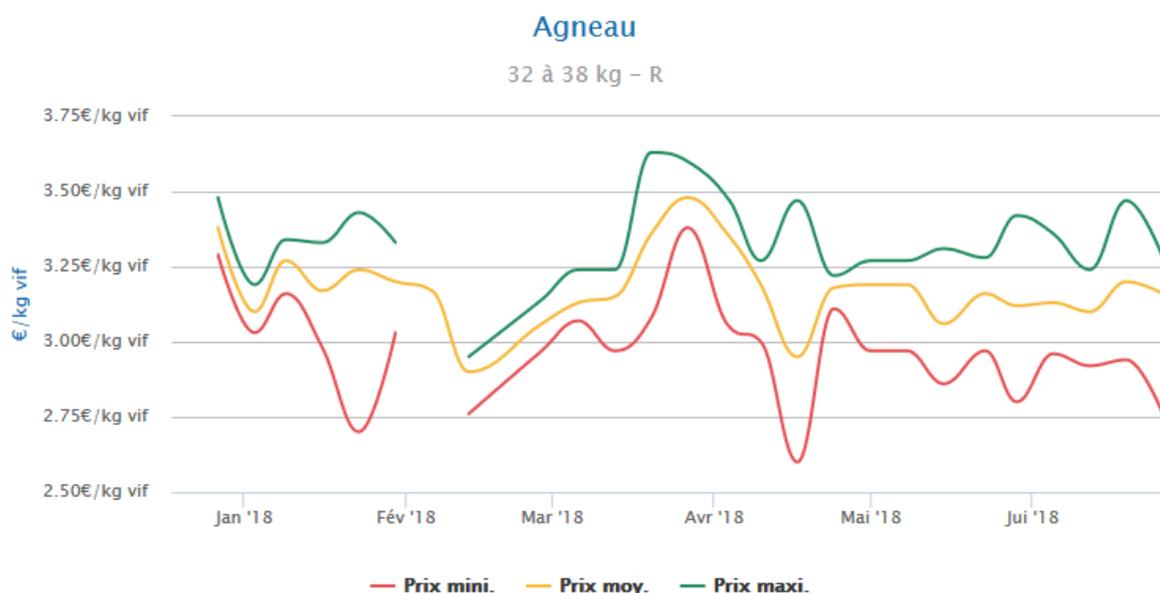
6. Une activité fortement dépendante du marché

Du sevrage à l'abattage, les agneaux de Roquefort sont sous la propriété de la société d'engraissement qui les a achetés à l'éleveur laitier et qui les vend ensuite en fin d'engraissement à l'abatteur.

Le prix d'achat des agnelets tout juste sevrés par les engraisseurs dépend principalement de l'offre et de la demande mais aussi du prix des agneaux d'importation. L'offre varie selon la saison car elle est conditionnée par les besoins en lait des industriels laitiers Lacaune. L'essentiel de la collecte de lait, soit 75%, est réalisée au cours du premier semestre de l'année (FranceAgriMer 2018). Cette saisonnalité tend à diminuer mais est encore bien présente. C'est ainsi qu'en été peu d'agneaux sont engraisés et abattus, faisant augmenter les prix jusqu'à 5€/kg (soit 70€ un agneau de 14kg). En hiver le marché est beaucoup plus fourni et les prix peuvent diminuer jusqu'à 3,50€/kg (soit 45-50€ l'agneau). La quantité d'agneaux exportés vers l'Espagne, l'Italie (marché en forte diminution) et surtout les pays tiers modifie également le nombre d'agneaux présents sur le marché et par conséquent les prix. Par ailleurs la France est un pays déficitaire, sa consommation de viande ovine est supérieure à sa production. Elle a ainsi besoin d'importer 55% de la viande qu'elle consomme (FranceAgriMer 2018). Des agneaux sont importés du Royaume-Uni, d'Espagne et de Nouvelle-Zélande principalement. Le prix d'achat des agneaux Lacaune tout juste sevrés se cale sur le prix de ces agneaux d'importation.

En fin d'engraissement la société propriétaire de l'agneau est payée selon le poids vif de l'animal. Il n'existe pas de cours officiel au moment de l'abattage pour les agneaux sevrés et engraisés de Roquefort. Les prix de vente peuvent être évalués à partir du prix des agneaux sous la mère sur le marché de Réquista, présentés sur le graphique 2. Les prix fluctuent eux aussi beaucoup selon la période de l'année. Par comparaison avec le cours des agneaux sur le marché de Réquista, la valorisation des agneaux sevrés de Roquefort en fin d'engraissement correspondrait à 0,30€/kg en moins que le prix de vente d'un agneau sous la mère (soit environ 10€ par agneau) (Lamy 2018). En 2018, entre le 15 janvier et le 15 juillet (période de sortie de l'engraissement des agneaux sevrés) les prix des agneaux sous la mère ont atteint au maximum 3,63€/kg à la fin du mois de mars et au minimum 2,6€/kg au mois d'avril. Pour les agneaux de Roquefort cela correspond alors à une fluctuation des prix entre 2,3€/kg et 3,3€/kg. Ainsi une agnelle achetée sevrée environ 50€ peut être revendue aux alentours 70€ au minimum et 105€ au maximum. S'il s'agit un mâle (poids vif supérieur au

moment de l'abattage), les prix de revente peuvent s'échelonner de 85€ au minimum à 125€ au maximum. La marge brute varie ainsi entre 20 et 55€ pour une agnelle et 35-75€ pour un mâle. L'Agneau de Roquefort étant un agneau issu d'une brebis laitière Lacaune, il est standardisé et n'est pas payé au classement de la carcasse comme le sont les agneaux issus des troupeaux viande. Un lot avec une quantité importante d'animaux trop gras ou trop lourds peut cependant être déclassé.



Graphique 2 : Evolution du prix des agneaux sous la mère de conformation R et de poids vif compris entre 32 et 38 kg sur le marché de Réquista (12) entre janvier et juin 2018. Une élévation des prix est survenue à la fin du mois de mars en raison de la forte demande d'agneaux pour les fêtes Pascales et les prix ont fortement chuté suite à cela au début du mois d'avril (Terre – Net 2018)

L'ensemble des coûts de production (alimentation, salaires, frais vétérinaires...) s'élève à environ 40€ par agneau. Ainsi la marge nette réalisée par les engraisseurs n'est pas toujours positive. Pour une femelle elle peut aller de - 20€ à + 15€ et pour un mâle de - 5€ à + 35€.

C'est le volume important d'agneaux engraisés (avec davantage de mâles) qui permet d'avoir un système à l'équilibre. Par ailleurs les prix fluctuent beaucoup entre les années ce qui augmente la variabilité de la marge nette réalisée par les engraisseurs. Elle ne représente en général que 0,5 -1% du chiffre d'affaires mais selon les années elle peut être de -3% ou encore de +3%. (Lamy 2018). Finalement l'engraissement des agneaux est une activité qui ne dégage que peu de marges et dont la réussite économique est incertaine et variable selon les années.

Ainsi les agneaux de Roquefort constituent un véritable moteur économique et d'emploi dans le bassin : ils assurent aux éleveurs laitiers une source de revenus complémentaire notamment lors des périodes creuses de récolte du lait, mais aussi de nombreux emplois pour les sociétés d'engraissement et d'abattage.

C. Les débouchés de l'engraissement des agneaux

Les agneaux de Roquefort engraisés sont surtout achetés par les abattoirs pour leur carcasse qui constitue le principal élément valorisé. La peau des agneaux peut cependant être récupérée et revendue à des sociétés spécialisées pour la transformer en cuir. Cela peut constituer une source de revenus annexe pour l'abatteur.

1. La carcasse

Lorsque les agneaux sont âgés d'environ 110 jours et ont atteint leur objectif de poids et l'état d'engraissement souhaité, ils sont dirigés vers les abattoirs. Le principal produit valorisé suite à l'abattage est alors la carcasse. Selon l'article 2 de l'arrêté ministériel du 17 mars 1992, la carcasse se définit comme « le corps entier d'un animal de boucherie après saignée, éviscération, ablation des extrémités des membres au niveau du carpe et du tarse, de la tête, de la queue et de la mamelle, et après dépouillement » (Guthmann 2017). La figure 5 présente les différentes étapes permettant d'aboutir à partir de l'agneau à la carcasse commercialisée.

Le poids de la carcasse, sa conformation et son état d'engraissement sont trois éléments notifiés par les abattoirs. Seul le poids intervient dans la fixation du prix des carcasses. La conformation et l'état d'engraissement peuvent cependant entraîner des pénalités économiques auprès des sociétés d'engraissement s'ils ne correspondent pas aux attentes concernant les agneaux Lacaune, et si cela concerne un nombre important d'agneaux.

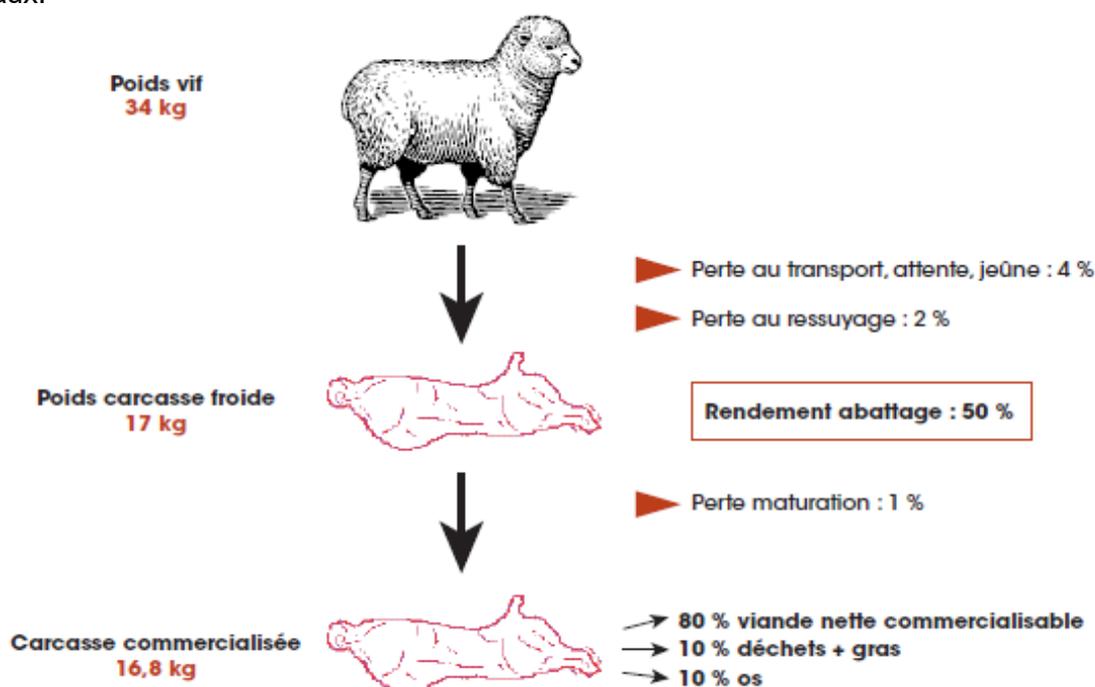


Figure 5 : Schématisation des étapes d'obtention de la viande d'agneau (IDELE, CNE 2017)

- **Le poids de la carcasse**

Le poids dépend de la race et des habitudes commerciales. Dans le cadre d'agneau Lacaune du rayon de Roquefort, les carcasses ont un poids de l'ordre de 15 kg pour les femelles (rendement carcasse* de 50%) et de 18-19 kg pour les mâles (rendement de 48-51%) (Poncelet 2010).

$$* \text{ rendement carcasse (\%)} = \frac{\text{poids vif avant abattage}}{\text{poids de carcasse froide}} \times 100$$

- **La conformation de la carcasse**

La conformation de la carcasse traduit le développement musculaire de l'animal. La grille communautaire EUROP présentée dans le tableau 5 et la figure 6 permet un classement officiel des carcasses selon ce critère. La classe E correspond à une conformation excellente et est la mieux payée, la classe P est qualifiée de médiocre.

Les agneaux Lacaune de Roquefort ont majoritairement une conformation R dite bonne (Terre - Net 2018).

Tableau 5 : Grille E.U.R.O.P de classement selon la conformation (Commission Européenne 2008)

Classe de conformation	Description
E Excellente	Tous les profils convexes à extrêmement convexes Développement musculaire exceptionnel
U Très bonne	Profils convexes dans l'ensemble Fort développement musculaire
R Bonne	Profils rectilignes dans l'ensemble Bon développement musculaire
O Assez Bonne	Profils rectilignes à concaves Développement musculaire moyen
P Médiocre	Profils concaves à très concaves Développement musculaire réduit

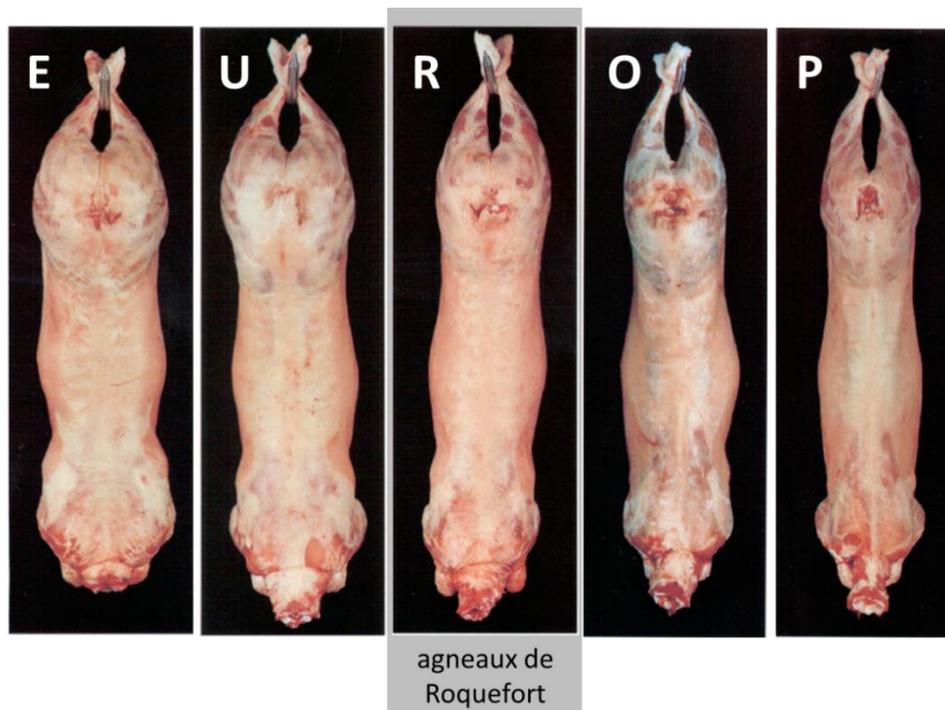


Figure 6 : Photographies des différentes classes de conformation (Office des Publications Officielles des Communautés Européennes 1993)

- **L'état d'engraissement de la carcasse**

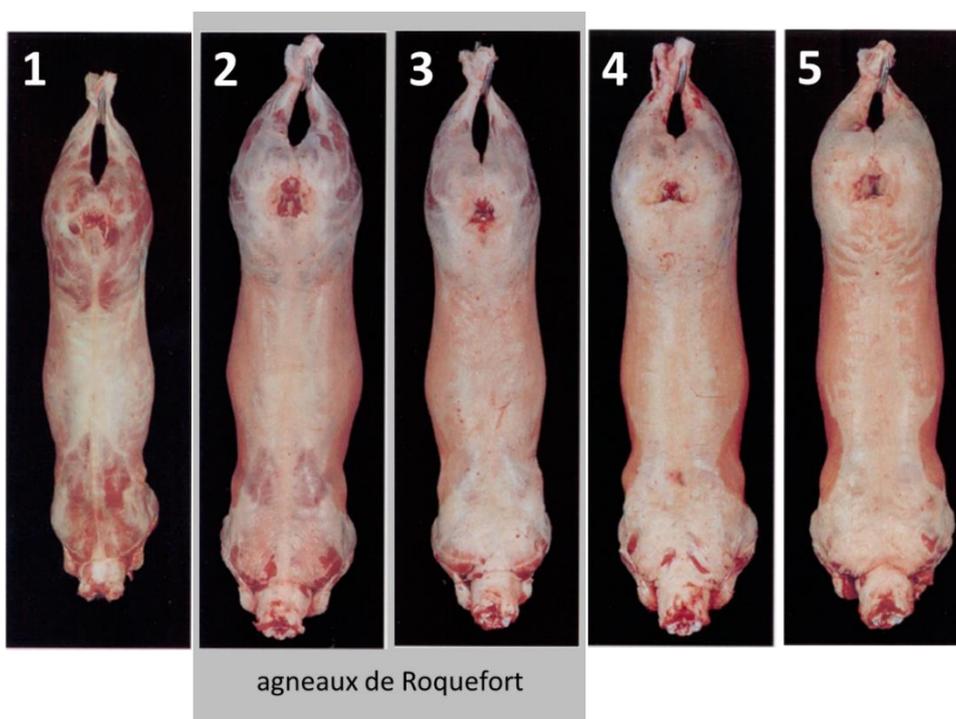
L'état d'engraissement est défini selon l'observation visuelle de la quantité de tissu adipeux et de sa répartition (à l'extérieur de la carcasse et sur la face interne de la cage thoracique). Un classement en 5 niveaux est défini selon les caractéristiques exposées dans le tableau 6 ci-dessous et illustrées sur la figure 7.

Les agneaux de Roquefort doivent avoir un état d'engraissement suffisant mais non excessif, de ce fait la filière ne commercialise que les carcasses cirées ou couvertes (classes 2 et 3). Les carcasses cirées (classe 2) sont les mieux payées car les consommateurs sont à la recherche de viande peu grasse.

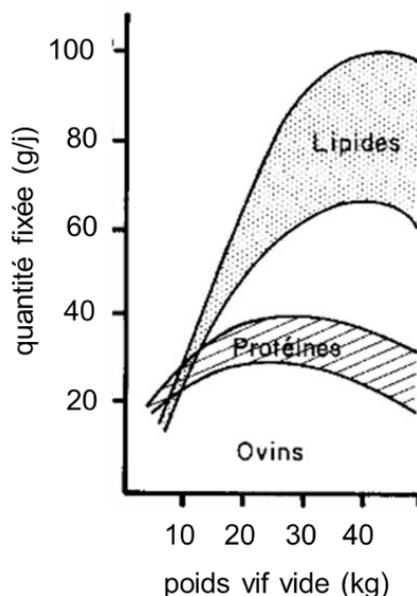
Tableau 6 : Grille de classement selon l'état d'engraissement (Commission Européenne 2008)

Niveau d'état d'engraissement	Description
1 Très faible Agneau maigre	Couverture de graisse inexistante à très faible
2 Faible Agneau ciré	Légère couverture de graisse, muscles presque partout apparents
3 Moyen Agneau gras	Muscles, à l'exception du quartier arrière et de l'épaule, presque partout couverts de graisse ; faibles dépôts de graisse à l'intérieur de la cage thoracique
4 Fort Agneau très gras	Muscles couverts de graisse, mais encore partiellement visibles au niveau du quartier arrière et de l'épaule ; quelques dépôts de graisse à l'intérieur de la cage thoracique
5 Très fort	Toute la carcasse recouverte d'une graisse épaisse ; dépôts importants de graisse à l'intérieur de la cage thoracique

Figure 7 : Photographies des différentes classes d'état d'engraissement (Office des Publications Officielles des Communautés Européennes 1993)



L'état d'engraissement est conditionné par le degré de maturité de l'agneau, c'est-à-dire le rapport entre le poids de l'agneau au moment de l'abattage et son poids potentiel à l'âge adulte. En effet les proportions relatives des différents tissus constitutifs de l'agneau évoluent au cours de sa croissance. Le graphique 3 présente la quantité de protéines et de lipides fixée selon le poids vif vide des agneaux (le poids vif vide correspond au poids vif auquel est soustrait le poids du contenu du tube digestif et de la vessie). On remarque qu'à partir d'un poids vif vide de 10-15 kg, le dépôt de lipides devient supérieur au dépôt protéique. Alors que ce dernier augmente jusqu'à ce que les agneaux atteignent environ 30kg puis décroît, le dépôt de matière grasse continue quant à lui d'augmenter pour atteindre 65-100 g/j chez des agneaux de 40 kg. Au-delà d'un poids vif de 30kg, l'essentiel des concentrés consommés par les agneaux est utilisé pour produire non pas du muscle mais du gras plus léger. Ainsi, plus l'abattage des agneaux est réalisé tard, plus le pourcentage de la carcasse représenté par le gras est important et plus l'IC se détériore. Un bon état d'engraissement pour la carcasse correspond à un degré de maturité d'environ 30-40% au moment de l'abattage, des degrés plus importants entraînent des carcasses excessivement grasses car le dépôt de gras devient excessif par rapport au dépôt musculaire.



Graphique 3 : Evolution en fonction du poids des animaux des quantités de protéines et de lipides fixées chez les ovins (Robelin, Thériez 1981)

2. Le cuir

L'intégralité du solde reversé aux éleveurs d'agneaux lors de la vente en fin d'engraissement est liée à la carcasse. La peau, revendue à des négociants de peaux brutes ou directement à des mégissiers pour la travailler en cuir, n'est que peu valorisée. Les sociétés d'engraissement n'en retirent aucun bénéfice, son prix permet seulement aux abatteurs d'amortir leurs frais d'abattage.

- **La fabrication du cuir**

Le travail de transformation en cuir, c'est-à-dire en peau animale devenue imputrescible, est réalisé par des mégissiers. Récupérées à l'abattoir lors du déshabillage, les peaux d'agneau sont entassées et salées pour permettre leur conservation, elles sont ensuite triées selon leur épaisseur, leur poids, leur surface, leur nombre de défauts et de cicatrices. Vient alors le travail de rivière qui comprend cinq étapes, la trempe pour réhydrater la peau et la nettoyer de ses souillures et impuretés, l'épilage consistant au retrait chimique des poils, l'écharnage qui correspond au retrait du tissu sous-cutané, le confitage permettant d'assouplir le cuir et enfin le picklage qui est une acidification de la peau préparant aux étapes suivantes. Le tannage permet ensuite, grâce à l'utilisation de tanins, de rendre la peau imputrescible et d'obtenir du cuir. Les dernières étapes consistent en des traitements chimiques et physiques pour donner au cuir toutes les caractéristiques recherchées, un séchage, puis un finissage conférant la texture et l'aspect souhaités (Fédération Française de la Tannerie Mégisserie 2017).

- **La problématique d'une bonne qualité**

Le cuir d'agneau de race Lacaune est particulièrement apprécié et recherché pour la souplesse de sa peau, sa finesse, sa légèreté et sa douceur au toucher. Il s'agit d'un cuir très noble utilisé pour la ganterie, la maroquinerie mais également la fabrication de vêtements ou de chaussures, et dont la renommée est internationale. Ce produit est particulièrement recherché par les grandes industries de maroquinerie de Luxe comme Chanel, Dior, Hermès...

L'ensemble de ces propriétés est étroitement relié à la qualité des peaux récupérées suite au déshabillage des carcasses. Des peaux indemnes de défaut permettent la réalisation de cuir de grande qualité particulièrement prisé alors que celles présentant de nombreux défauts ne peuvent pas être utilisées pour la réalisation de pièces de luxe. Les mégisseries et industries de luxe ne s'intéressent ainsi qu'aux peaux de qualité et délaissent les autres.

La qualité du cuir peut être compromise par la survenue d'altérations de la peau, essentiellement pendant la période d'élevage de l'agneau, au moment de l'abattage ou encore pendant la conservation. Au cours de la période d'engraissement, de nombreuses affections qu'elles soient bactériennes, virales, mycosiques ou parasitaires peuvent altérer la peau en surface (Syndicat Général des Cuirs et Peaux 2017). Outre ces phénomènes infectieux, des phénomènes mécaniques comme l'impact de la paille contenue dans la litière ou la ration peuvent endommager la peau. Le buissonné-pailleux notamment est un problème fréquent chez les agneaux de race Lacaune et dont l'importance économique est majeure.

- **Le buissonné-pailleux**

Le buissonné-pailleux est une lésion qui correspond à la présence de débris végétaux dans l'épaisseur du derme, responsables de perforations. Il s'agit principalement de barbes de triticale, d'orge ou de blé dont les aiguillons se sont fixés à la peau (Syndicat Général des Cuirs et Peaux 2017). Les zones de l'animal touchées, représentées sur la figure 8, sont exclusivement les parties dorsales à savoir le collet (partie de peau recouvrant la tête, le cou et les épaules), les flancs de part et d'autre de la ligne blanche, et la culée (partie de peau recouvrant le bas de la croupe et les fesses de l'animal) (Groupe permanent d'étude des marchés d'articles textiles, cuirs et produits connexes 2002). La paille incriminée n'est par conséquent pas celle constituant la litière mais bien celle utilisée pour l'alimentation. D'après des essais terrains réalisés sur des agneaux Lacaune à l'engraissement, il a pu être montré que le problème était lié au type de râtelier utilisé, et notamment aux râteliers traditionnels en V sans auge (Figure 9). Avec de tels râteliers les agneaux peuvent se coucher dessous, la paille leur tombe sur le dos et s'y fixe (Personne, Destoop 2001).

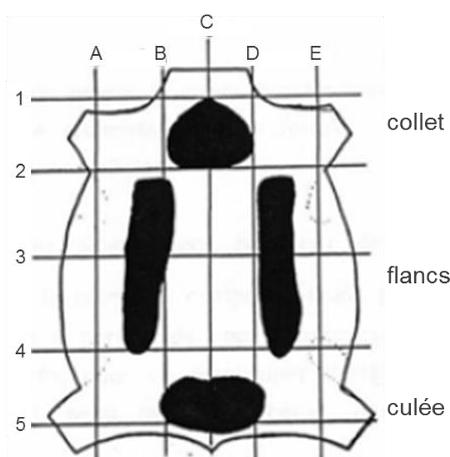


Figure 8 : Schématisation de la répartition des lésions de buissonné-pailleux sur la peau des agneaux (Chambre syndicale de la mégisserie lainière 1991)



Figure 9 : Exemple de râtelier en V sans auge (Jacques 2007)

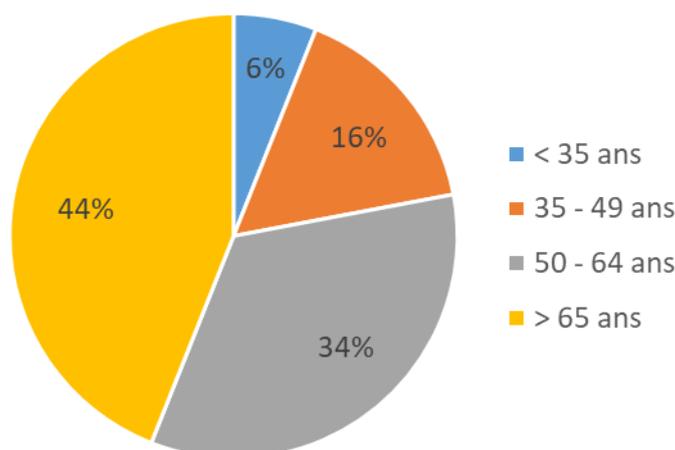
Les altérations causées par le buissonné-pailleux sont considérables et limitent la valorisation des peaux d'agneaux de race Lacaune. Certains industriels comme Chanel préfèrent acheter des peaux d'agneaux à l'étranger plutôt que les peaux d'agneau Lacaune car celles-ci présentent trop de défauts pour permettre d'obtenir du cuir de qualité. Depuis quelques années des recherches sont ainsi réalisées afin de réduire la fréquence de cette anomalie. La coopérative UNICOR a notamment mené des essais terrains avec l'utilisation d'autres types de râteliers. La Chambre Syndicale de la mégisserie lainière travaille aussi sur le sujet pour éradiquer ce défaut. D'autres options qui ont été envisagées et testées seront développées dans la partie expérimentale de ce travail.

Nous avons ainsi vu que l'engraissement des agneaux de Roquefort fait intervenir différents acteurs dont les attentes et exigences sont spécifiques mais étroitement liées les unes aux autres. Les sociétés d'engraissement s'attachent à conduire les agneaux au poids et à l'état d'engraissement souhaités par les abatteurs en un minimum de temps, avec le GMQ le plus important possible et au contraire l'IC minimal. Les sociétés d'abattage recherchent pour leur part des agneaux avec une conformation musculaire spécifique et un état d'engraissement faible et n'hésitent pas à pénaliser économiquement les engraisseurs en cas de non-respect. Ces exigences ne sont pas infondées, elles reposent sur les attentes qu'ont les consommateurs de viande d'agneau. Que serait la filière sans les consommateurs en aval ? Ces derniers recherchent dans la viande d'agneau un aspect de la viande et du gras particuliers et des saveurs caractéristiques. Ils sont également attentifs aux propriétés nutritionnelles de cette viande et aux effets qu'elle peut avoir sur leur santé. Ces propriétés sont étroitement corrélées à la ration que consomment les animaux tout au long de l'engraissement, et notamment à la teneur en concentrés et à la présence de fibres de paille.

II. Attentes des consommateurs de viande d'agneau

La viande d'agneau est un mets prisé par certains foyers pour sa saveur et ses multiples possibilités de cuisson sous forme de souris, gigot, côtes... Cependant la consommation de viande ovine décline en France au fur et à mesure des années. Alors qu'elle était de 3,7 kg équivalent carcasse/habitant/an en 2006, elle n'était plus que de 2,5 kg/habitant/an en 2016 (IDELE, CNE 2017).

On peut par ailleurs remarquer sur le graphique 4 que la consommation est très différente selon les classes d'âge. Plus des trois quarts de l'achat de viande d'agneau est réalisé par les plus de 50 ans. Les moins de 35 ans au contraire délaissent cette viande.



Graphique 4 : Répartition en volume des achats de viande d'agneau des ménages français par classe d'âge en 2016 (IDELE, CNE 2017)

Lors de l'achat de viande d'agneau, différents critères de choix sont pris en compte par le consommateur. La notion de valeur utilitaire permet de caractériser et percevoir l'orientation du choix des consommateurs. Cette notion traduit l'évaluation par le consommateur d'un achat selon l'utilité qu'il lui attribue, selon ce qu'il peut en retirer comme bénéfice. D'après une étude de Font-i-Furnols et al. en 2011 et dont les résultats sont présentés sur le tableau 7, le pays d'origine de la viande est la caractéristique la plus importante orientant le choix des Français (importance relative de 67,8%), la viande locale étant privilégiée face à une viande originaire de pays lointains comme l'Argentine ou l'Uruguay (valeur utilitaire de 4,43 vs. -1,83 et -3,11 respectivement). Le deuxième critère de choix, avec une importance relative de 17,3%, est le système d'alimentation des agneaux. Des alimentations à base d'herbe et de concentrés ou seulement d'herbe sont préférées à une alimentation exclusivement à base de concentrés (valeurs utilitaires de 0,67 et 0,58 vs. -1,25 respectivement). Le prix de vente vient en dernière position dans le classement des critères de choix avec une importance relative de seulement 14,9%. La viande proposée au prix le plus bas est privilégiée (valeur utilitaire de 0,60 pour une viande à 22€/kg). On voit ainsi que les consommateurs français privilégient avant tout des

viandes d'agneau locales telles que l'agneau de Roquefort à des viandes importées du Royaume-Uni ou de Nouvelle Zélande principalement. On remarque également qu'une attention de plus en plus grandissante est portée aux conditions d'élevage et au bien-être animal. Ainsi les consommateurs semblent privilégier au sein d'animaux de même origine des agneaux nourris à l'herbe, associant cet élevage à un système plus sain, plus naturel, plus respectueux de l'animal et de l'environnement. Il semblerait par ailleurs que la sécurité alimentaire, à savoir l'absence de résidus de produits chimiques ou d'antibiotiques, préoccupe elle aussi de plus en plus les consommateurs, ces derniers étant attentifs à davantage de transparence et de traçabilité sur l'ensemble des filières de production (Montossi et al. 2013).

Tableau 7 : Importance relative des différents critères de choix de viande d'agneau chez les consommateurs français et valeur utilitaire de chaque niveau (Font-i-Furnols et al. 2011)

Echantillon total	
n	99
intercept	8,00
<i>Origine</i>	
Argentine	- 1,83
France	4,43
Suède	0,51
Uruguay	- 3,11
Importance relative (%)	67,81
<i>Système d'alimentation</i>	
Herbe et concentrés	0,67
Herbe	0,58
Concentrés	- 1,25
Importance relative (%)	17,27
<i>Prix du kg de viande</i>	
22 €	0,60
26 €	0,45
31 €	- 1,05
Importance relative (%)	14,92
RMSE	2,81
R²	0,58

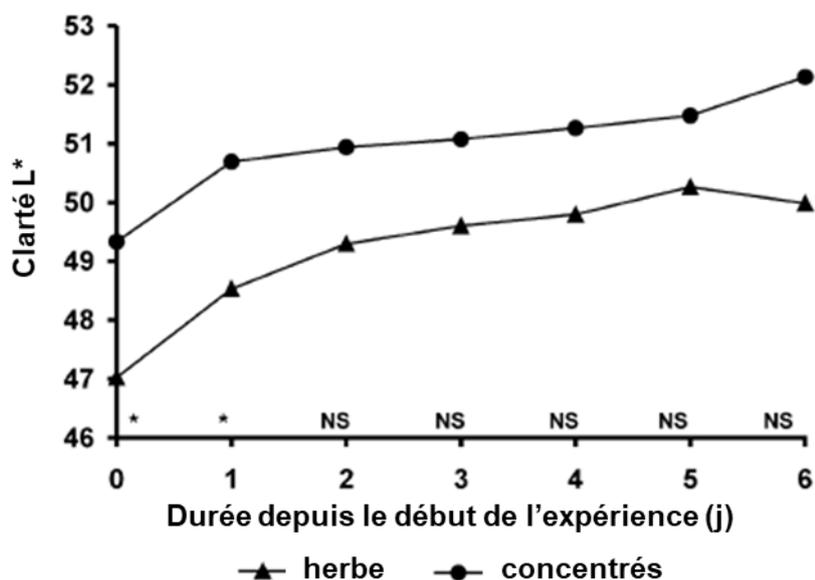
En plus des aspects évoqués précédemment, la vente de viande d'agneau est conditionnée par les attentes qu'en ont les consommateurs en termes de qualités organoleptiques et nutritionnelles. Celles-ci sont étroitement liées au système d'élevage des agneaux (herbe vs. concentrés). Il est alors possible de jouer sur l'alimentation et notamment la teneur en concentrés et la présence de fibres longues dans les rations pour se rapprocher au maximum des caractéristiques recherchées.

A. Qualités organoleptiques de la viande d'agneau

L'agneau est une viande que les consommateurs apprécient consommer en raison de ses qualités organoleptiques particulières à savoir sa couleur, sa tendreté, sa jutosité et sa saveur. Ces qualités dépendent de facteurs liés à l'animal (race, âge, sexe...) mais également de facteurs environnementaux parmi lesquels l'alimentation joue un rôle essentiel.

Dans une étude portant sur 37 agneaux Ile de France, Priolo et al. (2002) se sont intéressés à l'influence de l'alimentation (herbe vs concentrés) sur les qualités sensorielles de la viande d'agneau (la vitesse de croissance des agneaux étant identique). Leurs résultats, présentés sur le graphique 5 et le tableau 8, montrent que les agneaux nourris avec de l'herbe présentent une viande de couleur plus sombre en raison de son pH plus important au moment de l'abattage, ainsi qu'une tendreté et une jutosité moins importantes, la quantité de gras intramusculaire étant diminuée. La saveur, c'est-à-dire la perception olfacto-gustative, est elle aussi différente selon l'alimentation. Elle est plus prononcée et plus proche d'une saveur de foie chez les animaux nourris à l'herbe et au contraire plus caractéristique de la viande d'agneau et plus grasse chez ceux nourris avec des concentrés (Tableau 8). Le goût et l'odeur prononcés qui peuvent paraître désagréables lors de la consommation de viande d'agneaux nourris à l'herbe sont liés à la présence de 4-heptanal, un produit d'oxydation du C18:3n-3 présent en quantité plus importante (Elmore et al. 2000). La saveur caractéristique de viande d'agneau est quant à elle liée à la présence d'AG à courte chaîne ramifiés, le 4-methyloctanoïque et le 4-methylnonanoïque (Priolo, Micol, Agabriel 2001). Ces deux AG synthétisés par les bactéries ruminales dérivent du propionate, un des trois acides gras volatils (AGV) synthétisés dans le rumen. L'ingestion de concentrés entraîne la formation de propionate majoritairement alors que l'AGV principal lors de la consommation de fourrages est l'acétate. Les AG 4-methyloctanoïque et 4-methylnonanoïque se retrouvent ainsi en quantité plus importante dans la viande d'animaux nourris avec des concentrés.

La viande d'agneau de bergerie, comme les agneaux de Roquefort, semble alors présenter des caractéristiques et saveurs plus proches des qualités recherchées par les consommateurs français (Font i Furnols et al. 2009).



* Un échantillon dont la clarté est proche de 0 (noir) est désigné comme foncé alors qu'un autre dont la valeur de clarté est proche de 100 (blanc de référence) est désigné comme clair

Graphique 5 : Clarté de la viande d'agneaux nourris avec de l'herbe ou des concentrés au cours des 6 jours de mesure obtenue par spectrocolorimétrie (Priolo et al. 2002)

Tableau 8 : Influence du système d'alimentation sur l'évaluation sensorielle du muscle longissimus lumborum d'agneau (Priolo et al. 2002)

	Système d'alimentation		SEM	P-value
	Herbe	Concentrés		
Nombre d'agneaux	16	16		
Tendreté	4,52	5,07	0,486	0,006
Jutosité	3,79	4,43	0,403	0,000
<i>Attributs de flaveur</i>				
Typique de l'agneau	3,99	4,58	0,449	0,001
Rance	0,54	0,46	0,232	0,396 (NS)
De foie	1,05	0,74	0,302	0,012
Laiteuse	0,42	0,51	0,197	0,293 (NS)
Grasse	0,59	0,84	0,212	0,004
Fermière	1,47	1,48	0,383	0,289 (NS)

Les nombres présentés dans le tableau traduisent la distance en cm de la note attribuée par les testeurs par rapport à l'extrémité gauche d'une échelle non structurée de 10 cm sur laquelle l'extrémité gauche correspond à une viande extrêmement sèche, non juteuse et avec un attribut de flaveur évalué totalement absent. Plus la note présentée dans le tableau est élevée, plus le morceau de viande est qualifié de tendre, juteux, et présente des attributs de flaveur extrêmement marqués

B. Caractéristiques recherchées du gras d'agneau

Les consommateurs de viande d'agneau sont attentifs aux saveurs de la viande mais aussi aux caractéristiques du gras, notamment sa couleur et sa texture.

Le gras présent sur la carcasse d'agneau se retrouve en position sous-cutanée, inter-musculaire et intra-musculaire. Comme nous l'avons vu précédemment, la quantité de tissu adipeux en position sous-cutanée détermine la classification de la carcasse selon son état d'engraissement. La quantité de gras intra-musculaire, aussi appelé persillé, influence pour sa part la tendreté et la jutosité de la viande.

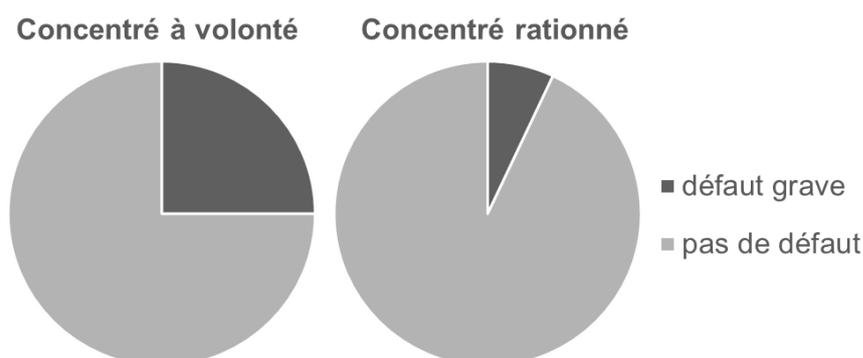
Dans l'idéal le gras de couverture doit être ferme et de couleur blanche. Une mauvaise texture mais surtout une mauvaise couleur peuvent entraîner une dépréciation commerciale (car moins attrayant pour le consommateur) voire une saisie de la carcasse. Le classement des carcasses selon la fermeté du gras de couverture et sa couleur est effectué à froid, au moins 12 heures après l'abattage sur des carcasses ressuées.

La fermeté du tissu adipeux dépend de sa teneur en lipides (inversement proportionnelle à la teneur en eau) et de sa composition en acides gras (AG). Plus le gras de couverture est riche en eau et en AG à faible point de fusion (AG impairs ramifiés, AG insaturés), plus il est de consistance molle (Sagot, Pottier 2012). Il est alors davantage sensible à l'oxydation (AG polyinsaturés surtout) dont les produits sont dangereux pour la santé, responsables de l'apparition d'un goût et d'une odeur rance, et d'un aspect moins attrayant pour le consommateur (gras jaune et mou).

Le défaut de couleur est quant à lui lié à la présence de pigments. La coloration naturelle du gras des ruminants est liée à sa teneur en caroténoïdes, des pigments alimentaires de couleur jaune-orangé précurseurs de la vitamine A contenus dans certains aliments. Au niveau des cellules épithéliales de la muqueuse intestinale des ovins, le β -carotène est clivé par la β -carotène 15,15-dioxygénase puis réduit en rétinol qui est ensuite métabolisé en vitamine A. Très peu de pigments s'accumulent dans la graisse qui revêt une couleur blanche. Chez les bovins au contraire cette activité enzymatique est très faible et le β -carotène qui est un pigment lipophile s'accumule dans les graisses qui prennent alors une couleur jaune-orangée (Mora et al. 2000). Pour des agneaux nourris à l'herbe, celle-ci étant riche en caroténoïdes, la graisse peut parfois présenter une couleur jaune-orangé. Dans d'autres très rares cas, cette couleur jaune peut être liée à l'accumulation de bilirubine, un autre pigment qui apparaît pour sa part dans un contexte pathologique d'ictère (Prache et al. 1990). Dans de tels cas la carcasse est saisie. Beaucoup plus fréquemment, le tissu adipeux peut revêtir une couleur brun-rouge qui n'a rien de pathologique et de dangereux pour le consommateur ce qui ne conduit pas à une saisie mais à une dépréciation commerciale

coûteuse pour l'éleveur. Cette coloration particulière serait liée à l'accumulation de pigments héminiques et de produits de la peroxydation des AG insaturés (Prache et al. 1990). En effet, il a été remarqué que les agneaux présentant une telle coloration comportaient des modifications de composition des AG formant les triglycérides et phospholipides (diminution du taux d'AG saturés ou polyinsaturés n-3, augmentation du taux d'AG polyinsaturés n-6 et d'AG impairs ou ramifiés, présence d'isomères *trans*-C18:1). Ces modifications de composition des acides gras sont liées aux conditions d'élevage, et notamment à l'utilisation de régimes à base de concentrés. L'incorporation d'isomères *trans*-C18:1 dans les phospholipides et la richesse des phospholipides en AG polyinsaturés fragiliseraient les membranes des globules rouges qui seraient alors plus facilement détruits, conduisant à une accumulation excessive de pigments héminiques (Wahle 1983). Les pigments héminiques libérés, riches en fer, favoriseraient l'oxydation des nombreux AG insaturés et conduiraient alors à la libération de produits colorés.

Les anomalies correspondant à un tissu adipeux mou et brun-rouge sont souvent associées. Les agneaux mâles, en raison de la teneur plus élevée en AG insaturés et ramifiés de leur tissu adipeux par rapport à celui des femelles, sont davantage prédisposés à ces deux anomalies. Les agneaux engraisés en bergerie y sont également plus sujets que les agneaux à l'herbe en raison de l'ingestion de rations riches en concentrés donc riches en AGPI n-6 et à l'origine de la formation et de l'accumulation de *trans*-C18:1 dans les graisses. La nature du fourrage, des céréales ainsi que de la source de protéines ne semblerait quant à elle pas avoir d'influence (Sagot, Pottier 2012). Chez les agneaux nourris avec des concentrés, le procédé qui semble être le plus efficace pour limiter le nombre d'animaux présentant un problème de couleur ou de fermeté du tissu adipeux est la distribution d'une quantité définie de concentrés comme le présente le graphique 6. Diminuer l'énergie apportée en ne laissant pas les concentrés à volonté mais en en distribuant une quantité limitée permettrait une plus grande ingestion de fourrages et favoriserait la rumination afin d'obtenir une composition lipidique plus éloignée de celle responsable de tels défauts.



Graphique 6 : Influence du rationnement du concentré sur la couleur du gras (Sagot, Pottier 2012)

C. Recommandations nutritionnelles en termes de composition lipidique de la viande

Les apports nutritifs de la viande d'agneau en font un aliment particulièrement intéressant, cette viande rouge constitue une excellente source de protéines de grande qualité mais plus encore de micronutriments. En effet, 100 g de viande d'agneau couvrent 10 à 20 % des apports journaliers recommandés par l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) en Fe, Zn, Se et vitamine B6, 40 % des apports en vitamine B3 et 100 à 200 % de ceux en vitamine B12 (Gandemer et al. 2008)

La viande d'agneau est cependant une viande rouge. Elle est alors associée à des risques accrus de cancer et de maladie cardiovasculaire (MCV) et revêt une image négative auprès des consommateurs. Cette relation entre la composition lipidique des aliments et les bienfaits et risques pour la santé du consommateur est un sujet de préoccupation majeur de ces dernières années.

Tous les acides gras ne possèdent pas les mêmes propriétés biologiques et certains contribuent plus que d'autres à l'apparition de MCV ou de cancer. Au sein des AG il faut distinguer les AG saturés (AGS) qui ont leur chaîne carbonée entièrement saturée en hydrogène, et les AG mono insaturés (AGMI) ou polyinsaturés (AGPI) qui possèdent une ou plusieurs doubles liaisons. Au sein des AGPI, les recommandations nutritionnelles concernent essentiellement les AGPI des familles n-3 et n-6 qualifiés d'AGPI essentiels, et dérivés respectivement de l'acide α -linoléique C18:3n-3 et de l'acide linoléique C18:2n-6. Ces deux AG sont des AG indispensables car nécessaires à une croissance normale et au fonctionnement de l'organisme, mais non synthétisés par l'Homme ou les animaux.

1. Lien entre AG longs et risque de maladie cardiovasculaire

Les AGS, le C18:2n-6 et le C18:3n-3 sont les principaux AG dont les effets ont été reliés à des problèmes d'athérosclérose ou de maladie cardiaque. Les propriétés des AGS sont à considérer de manière individuelle, en effet certains AGS comme le C18:0 ont un effet bénéfique sur le risque thrombogénique et athérogénique (Kelly et al. 2001) alors que d'autres comme le C12:0, C14:0 ou le C16:0 semblent fortement hypercholestérolémiants (Yu et al. 1995). Afin de réduire tout risque d'athérosclérose, l'AFSSA conseillait en 2001 de limiter l'apport total en AGS à 8% de l'apport énergétique (CNERMA-CNRS 2001). Les données plus récentes incitent plutôt à séparer les GS athérogènes en cas d'excès (C12:0, C14:0 et C16:0) des autres AGS qui auraient un effet bénéfique (le C18:0 notamment). Les dernières recommandations émises par l'ANSES en 2010 fixent alors une teneur limite en AGS totaux de 12% et une teneur en AGS athérogènes (C12:0, C14:0 et C16:0) de 8% de l'apport énergétique total (Anses 2011). Aucune limite ne semble nécessaire et n'est fixée pour les

autres AGS n'ayant pas d'effet délétère. Concernant les AGPI, le C18:2n-6 entraînerait une diminution du taux de cholestérol-LDL (« mauvais cholestérol » car favorisant le dépôt de lipides sur les parois des artères), sans effet significatif sur le cholestérol-HDL (« bon cholestérol » empêchant la formation de plaques d'athérome en apportant au foie le surplus de cholestérol) (Iacono, Dougherty 1991) et aurait un effet bénéfique vis-à-vis de la prévention du risque de MCV lorsqu'il est incorporé à hauteur de 3 à 5% de l'apport énergétique total dans le régime alimentaire (Anses 2011). Une teneur supérieure à 5% serait délétère. Le C18:3n-3 aurait lui aussi un effet protecteur vis-à-vis du développement des MCV comme l'ont montré De Lorgeril, Salen, Martin 1998. Cette étude se déroulant à Lyon s'est intéressée à l'influence d'un régime alimentaire crétois, riche en C18:3n-3, sur le risque de maladie cardiaque. Au sein du groupe consommant le régime crétois, seuls trois décès d'origine cardiaque et aucune mort subite n'ont été observés. Le groupe témoin a pour sa part présenté seize décès d'origine cardiaque et dix morts subites. Les AG à longue chaîne obtenus par élongation et désaturation du C18:3n-3, l'acide eicosapentanoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA) auraient eux aussi une action bénéfique à l'égard des MCV, notamment en diminuant les complications fatales des infarctus du myocarde (Mozaffarian, Rimm 2006).

2. Lien entre AG longs et survenue de cancers

Ces dernières années les chercheurs se sont également intéressés au lien entre certains AGPI et la survenue de cancers. Il a été montré que des régimes riches en AGPI n-6 et notamment en C18:2n-6 favoriseraient la croissance tumorale (Cannizzo, Broitman 1989; Rose et al. 1995) et accroîtraient la carcinogenèse et la formation de métastases (Carroll 1997). A contrario Schloss et al. 1997 ou encore Norrish et al. 1999 ont observé que des régimes riches en AGPI n-3 diminueraient la fréquence de certains types de cancers (sein, côlon...) et freineraient le développement tumoral (Nakayama et al. 1993; Kamano et al. 1989; Bougnoux, Chajès 2003). Le mécanisme à l'origine de ces observations ferait intervenir les prostaglandines E2 (PGE2). Un régime riche en C18:2n-6 serait responsable d'une forte teneur plasmatique en acide arachidonique à l'origine d'une synthèse importante de PGE2. Ces dernières stimuleraient l'expression de l'oncogène *c-myc* responsable de la prolifération tumorale. Les dérivés des AGPI n-3 au contraire inhiberaient la synthèse d'acide arachidonique et donc celle de PGE2 (Bougnoux, Chajès 2003). Ainsi l'AFSSA recommande de limiter la consommation d'AGPI n-6 qui favorisent la croissance tumorale et de privilégier la consommation d'AGPI n-3 qui s'y opposent, tout en gardant une proportion équilibrée entre ces deux familles.

3. Effets bénéfiques des acides conjugués de l'acide linoléique

En dehors de ces recommandations générales, il a été montré que certains AG particuliers présents dans la viande de ruminants, les acides conjugués de l'acide linoléique (CLA), exercent une action bénéfique sur la santé humaine (Zhang et al. 2010).

Lorsque des AG insaturés tels que le C18:2n-6 ou C18:3n-3 sont ingérés et se retrouvent dans le rumen, ils subissent de la part des bactéries ruminales des réactions d'isomérisation et d'hydrogénation. Ces réactions métaboliques sont regroupées sous le nom de biohydrogénation. Les CLA et les acides conjugués de l'acide α -linoléique (CLnA), présentés sur la figure 10, sont les intermédiaires obtenus suite à la première réaction d'isomérisation.

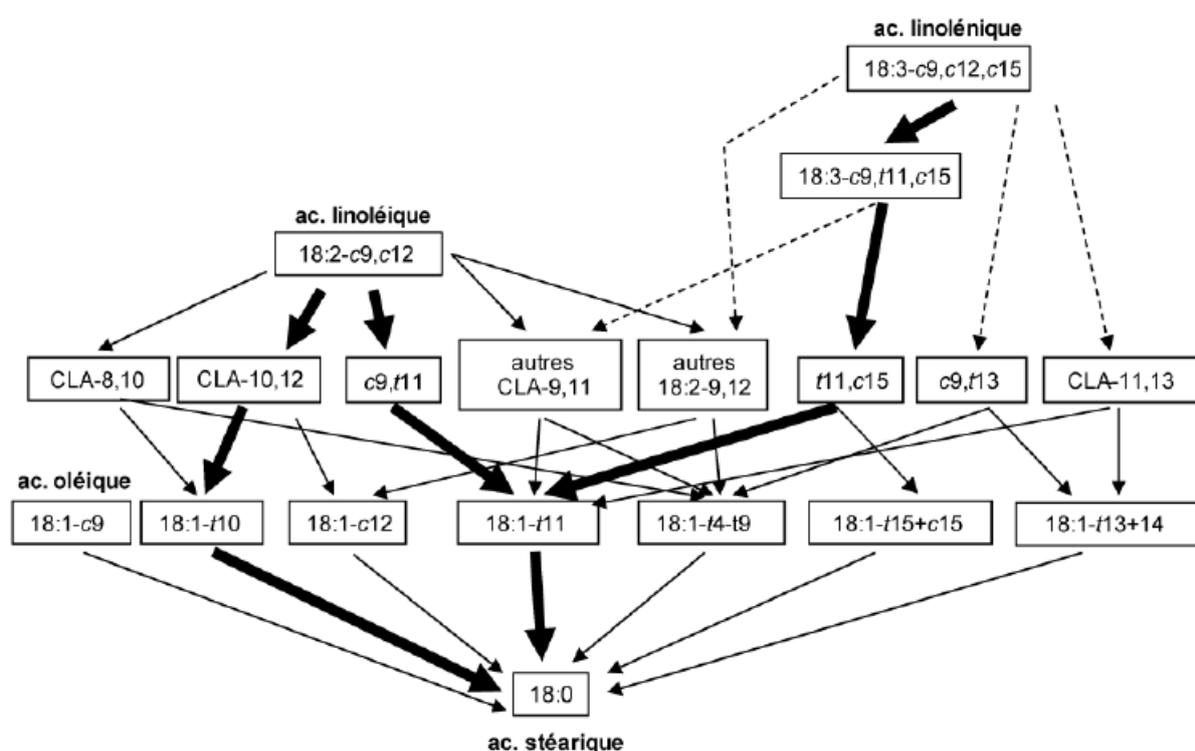


Figure 10 : Principales voies possibles de biohydrogénation des acides linoléique et linoléique, schéma adapté de Chilliard et al. 2007

Ces acides conjugués exerceraient des effets anticarcinogéniques, anti-obésité, antioxydants et anti-inflammatoires (Kim et al. 2016; Ip et al. 1994). L'acide ruménique *cis*-9,*trans*-11-18:2 est le CLA majoritaire chez les bovins en conditions normales (Lourenço, Ramos-Morales, Wallace 2010).

De nombreuses études se sont intéressées aux effets biologiques des AG-*trans* sur la santé humaine. Les *trans*-C18:1 ont tout d'abord été qualifiés de néfastes pour la santé (MCV) mais les études portaient sur le μ -C18:1, l'acide élaïdique, présent non pas dans la viande de ruminants mais dans les graisses végétales hydrogénées. Ces effets n'ont pas été démontrés

pour les AG-*trans*11, et notamment l'acide vacénique τ 11-C18:1, qui sont les AG-*trans* majeurs contenus dans les produits issus des ruminants, (Stender, Astrup, Dyerberg 2008; Field et al. 2009). Dans certaines conditions décrites ci-après, le τ 10-c12-CLA et le τ 10-C18:1 deviennent majoritaires chez les ruminants. Il a été montré que ces AG-*trans*10 ont un effet néfaste sur la santé, ils sont notamment responsables de modifications de métabolisme lipidique à l'origine de diabètes lipoatrogènes (Roche et al. 2002).

Le groupe de travail de l'ANSES qui a décidé des apports recommandés pour les différents AG en 2010 a considéré qu'il ne fallait pas que la consommation en AG-*trans* dépasse 2% de l'apport énergétique total pour minimiser le risque de développement de MCV (Anses 2011). Toutefois ces recommandations visent essentiellement les AG-*trans* contenus dans les produits transformés (viennoiseries, pâtisseries...). Les AG-*trans* de ruminants (CLA et C18:1 avec une double liaison de conformation *trans*) ne représentent que 0,5 à 0,7% de l'apport énergétique total. A ce niveau-là ils ne seraient pas associés à des risques accrus de MCV (Anses 2011). Il est même conseillé de consommer de la viande de ruminant riche en τ 11-C18:1. Une fois dans l'organisme humain, une partie de cet acide vacénique (19%) est désaturée en *cis*-9,*trans*-11-18:2 qui semblerait présenter des propriétés intéressantes sans être à l'origine d'effets secondaires. Une teneur en τ 11-C18:1 dans l'alimentation de 0,1% de protégerait de la carcinogénèse (Ip et al. 1994). Cela correspond à une ingestion moyenne de 530 mg/j par humain (Ritzenthaler et al. 2001). Ces résultats sont toutefois extrapolés à partir de modèles animaux et sont à manipuler avec précaution.

C'est ainsi que le profil des AG présents dans le gras intramusculaire confère à la viande d'agneau ses qualités nutritionnelles à l'égard de la prévention des MCV et de la survenue de cancer. L'AFSSA conseille de ne pas consommer un régime trop riche en C18:2n-6 afin qu'il n'exerce pas d'effet compétitif avec le C18:3n-3 ce qui serait préjudiciable à la synthèse d'AGPI n-3 à longue chaîne et donc délétère à l'égard du risque de maladie cardiovasculaire. Cela se traduit par un rapport 18:2n-6/18:3n-3 < 5. Pour y parvenir l'apport nutritionnel conseillé de C18:2n-6 est de 4% de l'apport énergétique total, et celui de C18:3n-3 est de 1% pour un homme ou une femme dont l'apport énergétique total est de 2000 Kcal/j (Anses 2011). La consommation de CLA issus de l'hydrogénation bactérienne dans le rumen est elle aussi conseillée même si aucune teneur réglementaire n'est fixée.

Selon les morceaux d'agneau consommés les teneurs en AG varient fortement comme on peut le voir sur le tableau 9. Si on compare la composition lipidique de la viande d'agneau à celle de bovin, on ne peut conclure à une différence significative entre ces deux viandes concernant la teneur en AGS et AGPI. On remarque cependant que la viande d'agneau est plus riche en CLA qui, comme nous l'avons vu, ont un effet bénéfique sur la santé humaine.

Cette même viande présente un rapport C18:2n-6/C18:3n-3, qui reflète le rapport oméga 6/oméga 3, bien supérieur à 5 pour l'ensemble des morceaux et plus élevé que pour la viande de bœuf. Cette observation va à l'encontre des recommandations de l'ANSES qui préconisent d'avoir un rapport strictement inférieur à 5 (Anses 2011).

Tableau 9 : Comparaison de la composition lipidique de morceaux de viande de bœuf et d'agneau d'après Chin et al. 1992 et le Centre d'Information des Viandes 2010

	BOEUF					AGNEAU			
	Tendre de tranche	Paleron	Bavette	Entrecôte sans gras	Plat de côte sans gras	Gigot	Collier	Selle sans gras	Côte filet sans gras
g/100g de viande crue									
Lipides (g/100g)	2,3	6,5	5,7	8,7	7,6	5,1	13,7	4,2	4,5
% des AG totaux									
AGS (%)	43,6	46,5	46,0	51,5	48,8	45,0	48,4	44,7	45,9
AGPI (%)	10,6	5,5	6,2	3,4	4,0	9,4	6,0	10,6	9,8
CLA (%)			0,29 – 0,43				0,56		
C18:2n-6/C18:3n-3	5,1	4,6	5,0	4,4	4,5	7,7	6,2	8,0	8,2

Finalement la viande d'agneau, riche en oméga 6, est à consommer de manière modérée. Dans un régime diversifié elle pourrait néanmoins apporter une contribution intéressante, notamment par sa richesse en CLA. Afin de s'approcher davantage des recommandations et d'orienter au mieux les métabolismes ruminants vers la production d'AG-*trans*11 afin que leur quantité soit maximisée au détriment des d'AG-*trans*10, une des options est de jouer sur l'alimentation des agneaux.

D. Influence de l'alimentation sur la valeur nutritionnelle du gras de la viande d'agneau

Des chercheurs ont constaté que l'alimentation des agneaux, notamment la consommation d'herbe ou de concentrés, modulait la teneur et le profil en AG de la viande (Diaz et al. 2002; Aurousseau et al. 2004).

D'après une de leurs études dont les résultats sont présentés dans le tableau 10, Aurousseau et al. 2004 ont exploré l'influence du système d'alimentation (herbe versus mélange concentrés (85%)/paille (15%)) sur la composition du gras intramusculaire de 32 agneaux mâles Ile de France. Ils ont ainsi montré que le gras intramusculaire d'agneaux nourris à l'herbe est plus riche en C18:3n-3 que celui d'agneaux engraisés avec des concentrés (1,1% versus 0,7% des AG totaux, $p < 0,005$), présente un ratio AGPI n-6/ AGPI n-3 plus bas et plus proche des recommandations attendues (1,3 vs. 3,8, $p < 0,005$), et a également une teneur plus importante en c9t11CLA (1,6% vs. 0,6% des AG totaux, $p < 0,005$). Le gras d'agneaux nourris avec des concentrés, comme les agneaux de Roquefort, est quant à lui plus riche en AGPI n-6 notamment en C18:2n-6 qui est un précurseur des AGPI de la série n-6 (2,7% vs. 1,4% des AG totaux, $p < 0,005$), et en C16:0 pro athérogène. Bessa qui a obtenu des résultats similaires présentés dans le tableau 11 a également noté une augmentation de la teneur en AG-*trans*10 dans le gras d'agneaux nourris avec des concentrés. Ces observations sont en accord avec d'autres études déjà menées sur ce sujet (Aurousseau, Vigneron 1995; Rowe et al. 1999).

La formation des CLA est elle aussi liée à l'alimentation. La majorité des CLA sont formés au cours de la biohydrogénation ruminale du C18:2n-6 et sont absorbés au travers de la muqueuse intestinale pour être excrétés dans le lait ou déposés dans les tissus. La proportion de concentrés dans la ration est l'un des principaux facteurs de variation de la biohydrogénation. Pour des animaux au pâturage ou avec un régime à base de fourrages, les taux de biohydrogénation du C18:3n-3 et C18:2n-6 sont respectivement de 87 et 86% (Glasser et al. 2008). Lorsque la ration contient plus de 70% de concentrés, la biohydrogénation est considérablement diminuée, elle est de 50 à 80% pour le C18:3n-3 et entre 35 et 60% pour le C18:2n-6 (Doreau, Demeyer, van Nevel 1997). Un pourcentage important de concentrés entraîne une augmentation de la quantité d'AGV produits dans le rumen et donc une diminution du pH ruminal. Le pH faible exerce un effet inhibiteur modéré sur les bactéries lipolytiques (or seuls les AG libres peuvent être utilisés comme substrat par les bactéries responsables de la biohydrogénation) mais une inhibition majeure sur l'isomérisation en c9t11CLA (Van Nevel, Demeyer 1996; Troegeler-Meynadier, Bret-Bennis, Enjalbert 2006). Ces deux observations constituent une partie de l'explication de la diminution du taux de biohydrogénation ruminale et des CLA formés lors de l'utilisation d'un régime riche en concentrés (Doreau, Chilliard 1997).

Tableau 10 : Profil des acides gras présents dans les triglycérides du muscle longissimus thoracis d'agneaux nourris à l'herbe ou avec une ration concentrés (85%)/paille (15%), à vitesse de croissance identique (Aurousseau et al. 2004) (NS : non significatif, p-value > 0,05)

Composition en AG des triglycérides (% total d'AG)	Système d'alimentation		SEM	P-value
	Herbe	Concentrés + Foin		
<i>Quantité individuelle d'AG</i>				
C12:0	0,5	0,5	0,4	NS
C14:0	4,6	4,5	2,1	NS
C16:0	20,0	25,4	2,9	0,001
C16:(n-7) 1 trans	0,7	1,1	0,3	NS
C16:1(n-7) cis	0,7	1,1	0,4	0,001
C17:0	1,3	1,1	0,4	0,001
C18:0	20,9	16,7	3,6	0,001
Trans C18:1	6,2	3,6	1,8	0,001
C18:1(n-9)	27,5	33,5	3,9	0,001
C18:2(n-6)	1,4	2,7	1,0	0,001
C18:3(n-3)	1,1	0,7	0,4	0,001
Cis 9, trans 11 C18:2	1,6	0,6	0,2	0,001
<i>Quantité totale d'AG de structure similaire</i>				
∑ AGS pairs	46,2	47,4	3,4	NS
∑ AGS impairs	2,8	2,2	0,5	NS
∑ AG ramifiés	2,2	1,5	0,6	0,01
∑ AG monoinsaturés cis	30,0	36,9	3,8	0,001
∑ AG monoinsaturés trans	7,6	4,6	1,9	0,001
∑ AGPI (n-6)	3,5	5,0	1,6	0,005
∑ AGPI (n-3)	2,8	1,3	0,7	0,001
<i>Ratios d'AG</i>				
C12:2(n-6)/C18:3(n-3)	1,4	4,2	0,9	0,001
∑ AGPI (n-6) / ∑ AGPI (n-3)	1,3	3,8	1,0	0,001

Tableau 11 : Profil des acides gras présents dans les triglycérides du muscle longissimus thoracis d'agneaux nourris à l'herbe ou avec une ration à base de concentrés (Bessa et al. 2005) (NS : non significatif, p-value > 0,05)

Composition en AG des triglycérides (% total d'AG)	Système d'alimentation		SEM	P-value
	Herbe	Concentrés + Foin		
<i>Quantité individuelle d'AG</i>				
C14:0	2,2	2,3	0,09	NS
C16:0	22,7	24,4	0,40	< 0,001
C18:0	16,6	14,1	0,49	< 0,05
C18:1 trans-10	0,58	3,83	0,598	< 0,001
C18:1 trans-11	2,44	0,96	0,035	< 0,001
C18:2(n-6)	7,2	6,4	0,44	NS
Cis 9, trans 11 C18:2	0,85	0,55	0,092	< 0,001
Trans 10, cis 12 C18:2	0,00	0,05	0,008	< 0,001
C18:3(n-3)	2,69	0,36	0,073	< 0,001
<i>Ratio d'AG</i>				
∑ AGPI (n-6) / ∑ AGPI (n-3)	2,0	7,7	0,38	< 0,001

Des études ont cependant montré que certains CLA pouvaient être synthétisés de manière endogène, notamment dans la mamelle chez la vache laitière (Griinari et al. 2000) mais également dans le tissu adipeux (Gruffat et al. 2008). Le c9-t11-CLA peut ainsi être synthétisé dans les tissus par désaturation de l'acide vaccénique t11-C18:1 (Figure 11). Au cours de la biohydrogénation ruminale, l'étape convertissant le t11-C18:1 en C18:0 est l'étape limitante car la réaction est très lente. Le t11-C18:1 s'accumule alors en quantité importante dans le rumen. 20 à 30% de ce t11-18:1 est absorbé au niveau de l'intestin et converti dans

les tissus en *c9-t11*-CLA (Bessa, Alves, Santos-Silva 2015). Cette conversion tissulaire effectuée par la $\Delta 9$ -desaturase serait même responsable de près de 80% de la production des CLA déposés dans les tissus (Palmquist, St-Pierre, McClure 2004).

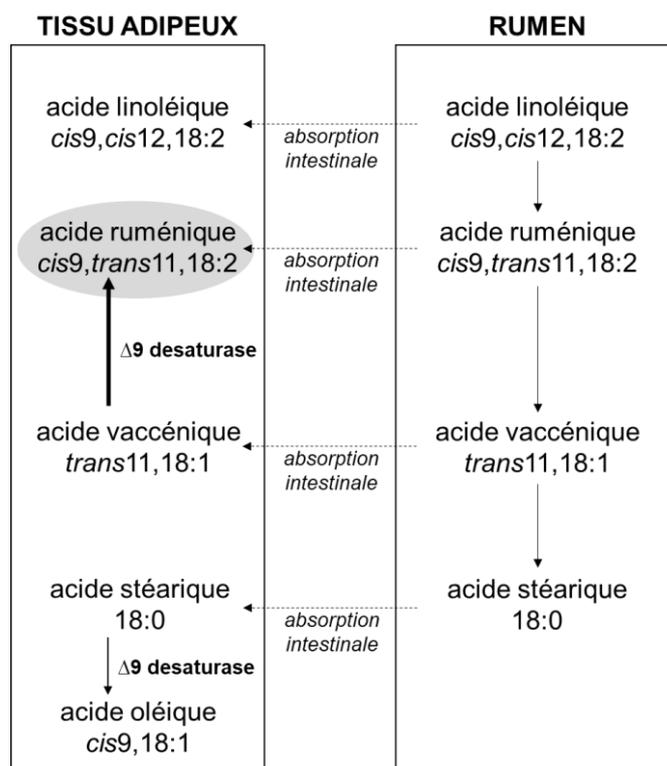


Figure 11 : Représentation schématique des voies métaboliques à l'origine du dépôt d'acide ruménique au niveau tissulaire (d'après Bessa, Alves, Santos-Silva 2015)

Afin de maximiser la teneur de la viande en CLA il est ainsi intéressant de chercher à favoriser l'activité de la $\Delta 9$ desaturase et le dépôt de gras intramusculaire (lieu de la synthèse endogène). Ces deux éléments vont de pair, le dépôt de gras ainsi que l'activité de l'enzyme sont favorisés par la consommation d'une ration riche en concentrés comme le présente la figure 12 (Bessa, Alves, Santos-Silva 2015). Cependant une telle ration n'est pas entièrement favorable à la formation de *c9-t11*-CLA bénéfique pour la santé humaine. En effet il a été montré que le type d'isomère formé dans le rumen dépendait de l'aliment consommé. Lorsque la ration de base est constituée de fourrages, le *t11-18:1* est le *trans* monoène principal formé dans le rumen à partir du C18:2n-6. Au contraire, avec une ration constituée de peu de fourrages et de beaucoup de concentrés, le *t10-18:1* devient majoritaire (Bessa et al. 2005). Ce changement d'AG *trans* majoritaire, représenté sur la figure 13, survient chez les ruminants avec une finition intensive. Cela se produit également lors de l'enrichissement de la ration en C18:2n-6. Kott et al. 2003 ont en effet montré dans une étude dans laquelle ils avaient enrichi la ration de certains agneaux avec 6% d'huile de carthame (riche en C18:2n-6) que les muscles de ces animaux présentaient une quantité de *t10-c12*-CLA quatre fois plus importante

que celle d'animaux n'ayant pas reçu de supplémentation lipidique. Le τ 10-c12-CLA est le précurseur du τ 10-18:1.

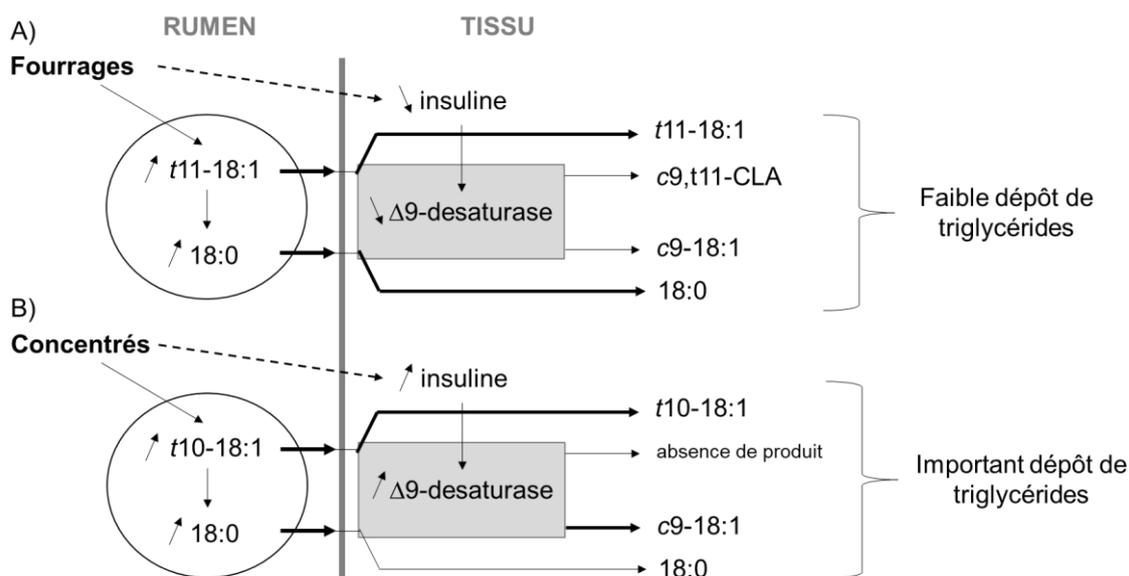


Figure 12 : Représentation schématique des principaux mécanismes conduisant à la formation de CLA au niveau musculaire selon la ration (d'après Bessa, Alves, Santos-Silva 2015).

A) Fourrages : augmentation de la concentration en τ 11-18:1 au niveau ruminal mais associée à une faible sécrétion d'insuline et à une diminution de l'activité de la Δ 9-desaturase ce qui limite la synthèse endogène de c9,t11-CLA et le dépôt de triglycérides. B) Concentrés : augmentation de la concentration ruminale en τ 10-18:1 qui est le précurseur d'aucun acide gras ce qui entraîne son accumulation dans les tissus, important dépôt de triglycérides

Le changement de voie métabolique à l'origine de la synthèse de τ 10-AG au détriment des τ 11-AG est évalué au moyen du ratio τ 10/ τ 11-18:1 au niveau ruminal ou tissulaire. Ce ratio est classiquement inférieur à 0,3 pour des animaux dont la base de la ration est constituée de fourrages (Bessa, Alves, Santos-Silva 2015). Lorsque le ratio devient supérieur à 1 on parle de shift- τ 10. Les animaux en phase d'engraissement, avec un régime riche en grains, semblent plus enclins à réaliser ce shift comme le présente le graphique 7. L'inconvénient de la réalisation de ce shift est la perturbation de la formation des CLA endogènes au niveau tissulaire. En effet, la majorité des CLA sont formés dans les tissus grâce à l'intervention de la Δ -9 desaturase qui a pour seuls substrats à 18 carbones le C18:0 et le τ 7- et τ 11-18:1. La conversion du τ 10-18:1 en CLA n'est donc pas possible et celui-ci s'accumule dans les tissus comme le montre les figures 12 et 13. Ainsi, la viande d'animaux nourris avec des rations riches en concentrés lors de phases d'engraissement est moins riche en c9- τ 11-CLA qui serait bénéfique pour la santé mais contient une plus grande quantité de τ 10-18:1 qui aurait des effets délétères.

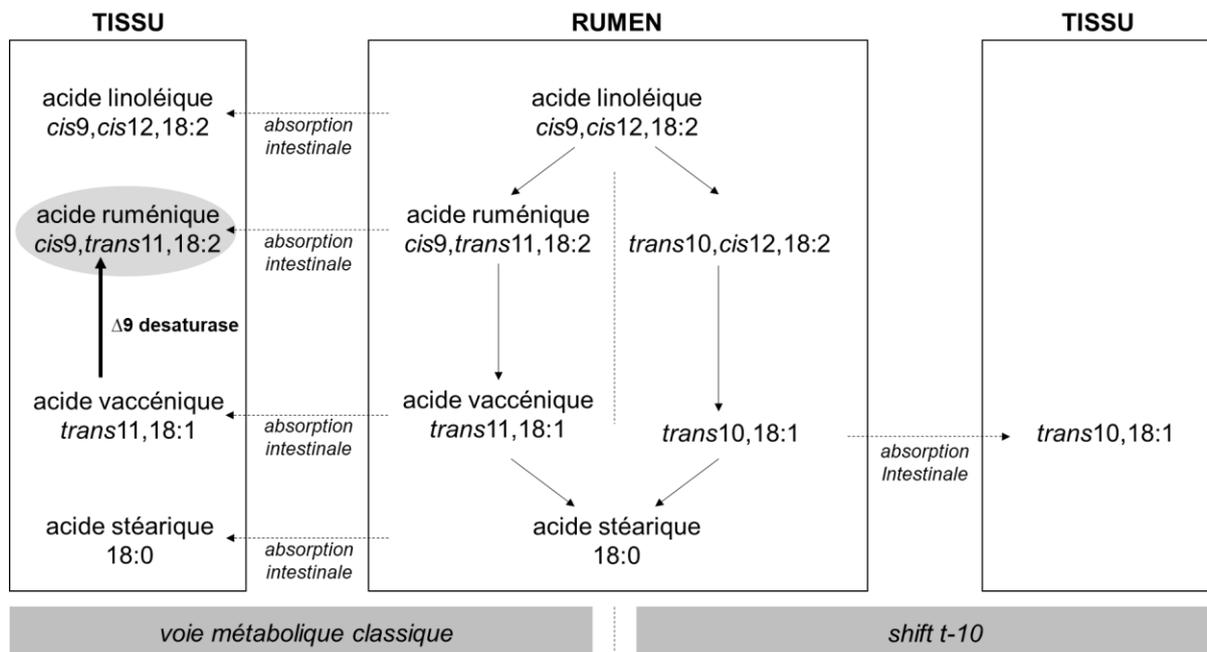


Figure 13 : Représentation schématique des voies métaboliques à l'origine du dépôt d'acide ruménique au niveau tissulaire. La réalisation du shift t-10 ne permet pas ce dépôt d'acide ruménique dans les tissus,

Même si la composition de la ration constitue l'un des principaux facteurs déterminant la nature des isomères *trans* formés, pour une même ration donnée la propension à réaliser le shift dépend fortement des individus. Bessa, Alves, Santos-Silva en 2015 ont mesuré le ratio $t10/t11$ 18:1 des lipides de la viande de quarante agneaux Merino Branco dont les régimes alimentaires sur la période de finition ont été les suivants : six semaines de pâturage (PPP), quatre semaines de pâturage et deux semaines de concentrés (PPC), deux semaines de pâturage et quatre semaines avec des concentrés (PCC) et une alimentation à base de concentrés pendant six semaines (CCC). Les résultats présentés sur le graphique 7 montrent que de manière générale un régime riche en concentrés augmente considérablement la probabilité de réalisation du shift (valeur maximale du ratio de 0,8 pour le groupe PPC et de 2,4 pour le groupe CCC). Les résultats révèlent par ailleurs une dispersion des points correspondant à la valeur du ratio $t10/t11$ pour les trois lots d'agneaux ayant consommé des concentrés (PPC, PCC, CCC) ce qui traduit une variabilité de métabolisme lipidique entre les agneaux d'un même lot. Plus la durée pendant laquelle des concentrés ont été distribués augmente, plus la dispersion est importante. Au sein du groupe CCC, les valeurs du ratio $t10/t11$ varient de 0,3 à 2,4. Ainsi, même en consommant un régime riche en concentrés, certains agneaux maintiennent la voie métabolique classique conduisant à la synthèse de $t11$ -18:1, d'autres au contraire semblent très sensibles à la réalisation de ce shift même en consommant peu de concentrés.

III. L'acidose ruminale : de la sub-acidose à la pathologie

A. L'acidose subaiguë du rumen

De plus en plus de systèmes d'élevage, parmi lesquels les ateliers d'engraissement d'agneaux de Roquefort, cherchent à utiliser des rations fortement énergétiques, c'est-à-dire riches en concentrés et pauvres en fourrages, afin d'augmenter le GMQ de leurs animaux. En effet l'encombrement des fourrages entraîne nécessairement une diminution de la quantité de concentrés ingérés et diminue l'efficacité alimentaire lorsque fourrages et concentrés sont donnés en parallèle. Cependant le risque majeur lors de l'utilisation de telles rations est la diminution du pH ruminal et la survenue d'une acidose subaiguë du rumen appelée ARSA (Acidose Ruminale SubAiguë).

L'ARSA a principalement été étudiée chez les vaches laitières hautes productrices (car plus à risque) et a été définie de nombreuses années auparavant par la diminution quotidienne et répétée du pH ruminal sous le seuil de 5,5 pour des prélèvements réalisés par ruminocentèse (Garrett et al. 1999). Les publications ultérieures ont introduit la notion de durée pendant laquelle le pH était diminué, à savoir que l'ARSA correspondrait à une chute de pH ruminal sous le seuil de 5,6 pendant 3 à 5 heures (Gozho et al. 2005a). Les études s'intéressant aux facteurs de risque d'ARSA se basent d'ailleurs sur l'évaluation de la durée de pH ruminal sous le seuil de 5,6 ou 5,8 (Penner, Aschenbach, et al. 2009).

Le pH ruminal est un élément clé expliquant la survenue de l'ARSA. Il est classiquement compris entre 6,2 et 6,5 et le maintien entre ces normes est indispensable pour garantir un bon fonctionnement des enzymes et micro-organismes ruminants qui travaillent dans des gammes de pH définies. L'accumulation des AGV produits par fermentation bactérienne des oses issus de la dégradation des glucides est responsable de la diminution du pH. En effet ce sont des acides faibles qui se dissocient sous forme d'anions dans le rumen en libérant un proton. Absorbés au niveau des papilles ruminales pour aller fournir de l'énergie aux cellules, ils constituent la principale source énergétique des ruminants (Drogoul 2004).

La chute de pH ruminal responsable de l'ARSA peut être provoquée par l'apport d'une quantité importante de glucides rapidement fermentescibles ou par le remplacement des fibres longues de la ration par des particules de petite taille avec un ratio fourrages/concentrés (F:C) identique (Plaizier 2008). Penner et al. 2009 se sont intéressés à l'influence du ratio F:C sur le pH ruminal. Ils ont constaté que l'utilisation d'une ration avec 64% de concentrés par rapport à une ration à 8% était responsable d'un pH ruminal moyen plus bas (6,03 vs. 6,48 respectivement) mais surtout que la durée de pH ruminal sous le seuil de 5,8 était bien plus importante (376 vs. 10 min/j respectivement). La diminution du ratio F:C contribue ainsi à une augmentation du risque d'ARSA. Cela traduit l'importance de la présence de fourrages dans

les rations. Li et al. 2014 ont pour leur part étudié l'influence de la longueur des fibres. Pour cela ils ont utilisé une ration contenant du foin de luzerne coupé à la longueur de 20 mm, et une seconde avec cette fois-ci du foin broyé à une taille inférieure à 4mm en quantité identique. La durée pendant laquelle le pH ruminal était inférieur au seuil de 5,8 s'est révélée être plus importante chez les animaux ayant consommé du foin broyé par rapport à ceux ayant consommé le foin coupé (3,63 vs. 0,78 h/j respectivement). Tout comme l'augmentation du ratio F:C, la disparition de fibres longues dans la ration constitue un facteur de risque de survenue d'ARSA.

Ainsi une augmentation de la quantité de concentrés ou un remplacement des fibres longues par des fourrages broyés sont responsables d'une augmentation de la durée pendant laquelle le pH ruminal est inférieur aux seuils de 5,6 et 5,8. Des systèmes tampons sont indispensables pour lutter contre cette diminution du pH et limiter le risque de développement d'ARSA. Lorsque l'action de ces systèmes est insuffisante, la fonction de l'épithélium ruminal, la biodiversité de l'écosystème microbien et les fermentations microbiennes associées sont affectées. Les conséquences peuvent alors toucher la santé et la productivité des animaux.

1. Systèmes nécessaires au maintien de l'homéostasie du milieu ruminal

Le milieu ruminal est un milieu étroitement contrôlé, notamment au niveau de son pH. La régulation du pH permettant qu'il ne soit pas trop bas malgré l'acidification entraînée par les AGV produits se fait selon deux mécanismes : par l'absorption des AGV au travers de l'épithélium ruminal qui représente 53% de la régulation et par le pouvoir tampon de la salive (30% de la régulation). Tout phénomène conduisant à une diminution de la salivation, une diminution des capacités d'absorption des AGV au niveau des papilles ruminales, ou une production excessive d'AGV contribuent à une diminution du pH et à une acidose ruminale.

- **La salivation, un premier système tampon**

La salive, riche en phosphates et surtout en bicarbonates (136 mEq/L) possède un pH de 8,4. Elle est essentielle au maintien de l'homéostasie ruminale par son apport en ces deux anions dans le rumen. La salive est produite lors des phases d'ingestion, de rumination mais aussi de repos. Favoriser la mastication permet d'augmenter la salivation et de réduire le risque d'ARSA.

Selon la nature de la ration ingérée, la quantité de salive produite diffère. Elle représenterait 50% du flux de bicarbonates provenant au rumen lors de l'ingestion d'une ration riche en fourrages, mais ce pourcentage tomberait à 30% lorsque la ration est majoritairement composée de concentrés (Dijkstra et al. 2012). Certaines études ont cependant montré que

l'augmentation du temps de mastication due à une augmentation du ratio F:C n'entraînait qu'une très légère augmentation de la quantité de salive produite. En effet même si le temps passé dans une journée à mastiquer augmente avec une telle ration, le temps de salivation lors des phases de repos est pour sa part diminué. Jiang et al. 2017 ont ainsi constaté que l'augmentation du ratio F:C d'une RTM (Ration Totale Mélangée) distribuée à des vaches de 40:60 à 70:30 augmentait la durée de mastication de 144 min/j (19,8%) mais la sécrétion salivaire de seulement 17 L/j (7,3%). Une RTM correspond à une ration combinant tous les ingrédients d'une ration classique (fourrages, céréales, protéines, vitamines, minéraux) sous forme broyée. D'autres auteurs estiment au contraire que le taux de salivation pendant l'ingestion et la rumination surpasse fortement celui de la phase de repos. Ainsi une réduction de la mastication conduit à une diminution significative de la production de salive, les phases de repos n'arrivant pas à compenser (Kröger et al. 2017).

De nombreux chercheurs se sont alors intéressés aux paramètres permettant une plus grande mastication. La présence de fibres dans la ration et surtout leur taille seraient des facteurs déterminants. Plus la taille des particules augmente, plus le temps de rumination augmente (jusqu'à un certain seuil au-delà duquel la rumination ne peut pas être plus importante). Avec une taille moyenne de particules inférieure à 5 mm, la réduction de mastication serait la plus dramatique (Allen 1997). Afin de caractériser la teneur en fibres des rations, la notion de NDF (Neutral Detergent Fiber) représentant les fractions de lignine, cellulose et hémicellulose a été définie. Ce concept s'intéressant uniquement à la composition chimique n'est cependant pas adéquat pour décrire l'efficacité des fibres à stimuler la salivation et assurer une stabilité ruminale. Le concept de peNDF (physically effective fiber) a alors été introduit pour prendre en compte, en plus des propriétés chimiques, les propriétés physiques des fibres (taille des particules).

Afin de connaître la répartition des fibres selon leur taille au sein d'une ration et de caractériser leur efficacité pour stimuler la salivation, l'outil classiquement utilisé est le Penn State Particle Separator illustré sur la figure 14 (Kononoff, Heinrichs, Buckmaster 2003; Heinrichs, Jones 2013). Constitué de trois tamis, il permet de répartir les fibres en quatre fractions :

- *grandes particules* : particules retenues par le tamis dont les mailles font 19 mm
- *particules moyennes* : particules passant au travers des mailles de 19 mm mais retenues par celles de 8 mm
- *particules fines* : particules passant au travers des mailles de 8 mm mais retenues par celles de 1,18 mm
- *particules très fines* : particules non retenues par les mailles de 1,18 mm. Le tamis possédant des mailles de 1,18 mm a récemment été remplacé par un tamis avec des mailles de 4 mm

Chaque fraction est ensuite pesée pour en déterminer le pourcentage. Deux indicateurs, $peNDF_{>8}$ et $peNDF_{>1,18}$ sont alors calculés selon la formule suivante :

$$peNDF = pef \times NDF \text{ (Beauchemin 2018)}$$

pef : facteur d'efficacité physique

$pef_{\geq 8}$: proportion totale de matériel retenu sur les tamis dont les mailles font 19 mm et 8 mm

$pef_{\geq 1,18}$ ou $pef_{\geq 4}$: proportion de matériel retenu par l'ensemble des tamis



Figure 14 : Illustration des trois tamis constitutifs du Penn State Separator (CVAS) Les mailles de 19mm, 8mm et 1,18 mm permettent de séparer la ration analysée en quatre fractions : grandes particules/ particules moyennes/ particules fines/ particules très fines. Les particules très fines ne sont pas présentes sur l'illustration.

Plus le $peNDF$ de la ration est important, plus la durée de mastication et de rumination sont importantes, et conjointement plus la durée de pH sous les seuils de 5,6 et 5,8 est réduite (Tableau 12) (Li et al. 2014; Zhao et al. 2011). Cependant l'augmentation de $peNDF$ dans la ration correspond aussi à une diminution de la quantité ingérée. Zhao et al. 2011 constatent en effet une diminution linéaire de la quantité de matière sèche ingérée (MSI) au fur et à mesure de l'augmentation du $peNDF_{>8}$ du contenu ruminal. Il faut donc être vigilant dans l'interprétation des différentes études conduites pour ne pas attribuer les modifications de pH ruminal observées à la seule teneur en $peNDF$, mais aussi prendre en compte la variation de MSI. Une plus grande quantité de concentrés ingérée est en effet responsable d'une plus forte production d'AGV susceptible de diminuer le pH. Afin de distinguer l'origine de la variation de pH ruminal observée lors de la modification de la teneur en $peNDF$ de la ration, Li et al. 2014 ont conduit des études sur 30 jours avec 10 chèvres réparties en deux lots : un lot recevait du foin de luzerne coupé à une longueur de 20 mm ($peNDF_{>8} = 42,1\%$), l'autre lot était nourri avec du foin broyé ($peNDF_{>8} = 14,5\%$). Des concentrés et de l'ensilage de maïs étaient distribués aux deux lots quinze minutes avant le foin. Tous les jours les refus de foin du premier lot étaient pesés afin d'évaluer la quantité ingérée, cette quantité était donnée au deuxième lot le jour

suivant. Cette méthodologie a permis de réaliser l'étude avec un ratio F:C identique pour les deux lots, et la MSI ingérée s'est révélée être la même (ce qui était le but recherché). La ration avec la teneur en $peNDF_{>8}$ la plus basse a entraîné une diminution du temps de mastication, une durée de pH ruminal sous les seuils de 5,8 et 5,6 plus longue et une concentration totale en AGV plus importante (Tableau 12). Etant donné que la MSI était la même, cette étude a permis de prouver que c'est bien l'augmentation des durées de mastication et rumination provoquée par une augmentation en $peNDF$ de la ration qui est responsable d'une diminution du risque de chute du pH ruminal et d'ARSA.

Tableau 12 : Conséquences de la teneur en $peNDF_{>8}$ sur le pH ruminal, la quantité d'AGV et les durées de mastication et salivation chez des chèvres (Li et al. 2014)

	Ration avec $peNDF_{>8} = 42,1 \%$	Ration avec $peNDF_{>8} = 14,5 \%$	SE	P-value
pH<5,8 h/j	1,65	8,55	1,12	0,03
pH<5,6 h/j	0,41	4,08	0,67	0,03
Quantité totale AGV mM	95,1	144,6	4,74	0,04
Rumination min/j	478	329	18	<0,01
Mastication min/j	673	404	32	<0,01

Même si la notion de $peNDF_{>8}$ semble mieux prédire les variations physiologiques de mastication, rumination et MSI, $peNDF_{>1,18}$ et $peNDF_{>8}$ pourraient être utilisés de manière interchangeable pour prédire le risque de survenue d'ARSA (Zebeli et al. 2012). Les recommandations établies suggèrent que pour diminuer le risque d'ARSA chez les vaches laitières, la ration doit avoir une teneur minimale en $peNDF_{>1,18}$ de 31,2% ou une teneur en $peNDF_{>8}$ de 18,5%. La quantité de $peNDF$ nécessaire dépend de la quantité d'amidon ingérée car celle-ci détermine la chute du pH ruminal. Les vaches laitières pourraient alors tolérer des diètes dont la teneur en $peNDF$ est inférieure aux recommandations à condition que la quantité d'amidon dégradable dans le rumen et la MSI soient basses (Zebeli et al. 2012).

Le pouvoir tampon exercé par la salive n'a cependant qu'un rôle secondaire face à l'autre système tampon assuré par l'absorption des AGV qui permet le départ de protons ou l'arrivée de bicarbonates dans la lumière ruminale.

- **L'absorption des AGV, un second système tampon performant**

La particularité des ruminants est la possibilité de dégradation partielle des glucides pariétaux (cellulose, hémicellulose) par les bactéries ruminales. Les oses obtenus (ainsi que ceux obtenus à partir des sucres solubles) sont fermentés par les bactéries ruminales en

acides gras volatils (AGV) : essentiellement en acide acétique (C2), acide propionique (C3) et acide butyrique (C4). Comme nous l'avons vu ces AGV sont des acides faibles et sont responsables de la diminution du pH ruminal. L'équilibre entre la forme ionisée (dissociée AGV^-) et non ionisée (non dissociée HAGV) est régie par l'équation d'Henderson-Hasselbach selon laquelle $\text{pH} = \text{pKa} + \log [\text{AGV}^-]/[\text{HAGV}]$. Ayant un $\text{pKa} = 4,8$, les AGV constituent eux-même un pouvoir tampon en libérant un proton dans les gammes de pH supérieures au pKa ou en se complexant à un proton pour des pH inférieurs. Ainsi 10, 50 et 90% des AGV sont sous forme ionisée à $\text{pH} = 3,8, 4,8$ et $5,8$ respectivement. Cependant 80% de ce pouvoir tampon aurait lieu dans la fourchette de pH correspondant à $\text{pKa} \pm 1$ (Aschenbach et al. 2011). Un autre système tampon est nécessaire pour agir dans des gammes de pH plus larges et augmenter de manière plus efficace le pH afin de retrouver des conditions compatibles avec la survie et le travail des micro-organismes ruminiaux.

L'absorption des AGV à travers l'épithélium ruminal au niveau des papilles est un mécanisme clé permettant d'augmenter le pH ruminal et limiter le risque de développement d'ARSA. Mis en évidence il y a de nombreuses années (Phillipson, McAnally 1942), il est à présent bien connu que 50 à 85% des AGV produits dans le rumen sont directement absorbés au travers de l'épithélium ruminal (Aschenbach et al. 2011). Cette absorption est réalisée au moyen de différents mécanismes regroupés sur la figure 15.

Un premier moyen d'évacuation des AGV du rumen vers l'espace intracellulaire est la diffusion passive au travers de l'épithélium ruminal. Cette diffusion est uniquement possible pour les formes non ionisées, à savoir les formes non dissociées (HAGV). Plus les AGV sont lipophiles, meilleure est leur absorption c'est pourquoi l'efficacité d'absorption des AGV se fait dans l'ordre suivant : $\text{C4} > \text{C3} > \text{C2}$. Ce transport est vraiment efficace dans la diminution du risque d'ARSA car l'absorption d'un AGV permet le départ d'un proton du milieu ruminal. Cependant dans le rumen la majorité des AGV sont sous forme ionisée ce qui fait que cette diffusion passive reste un phénomène marginal.

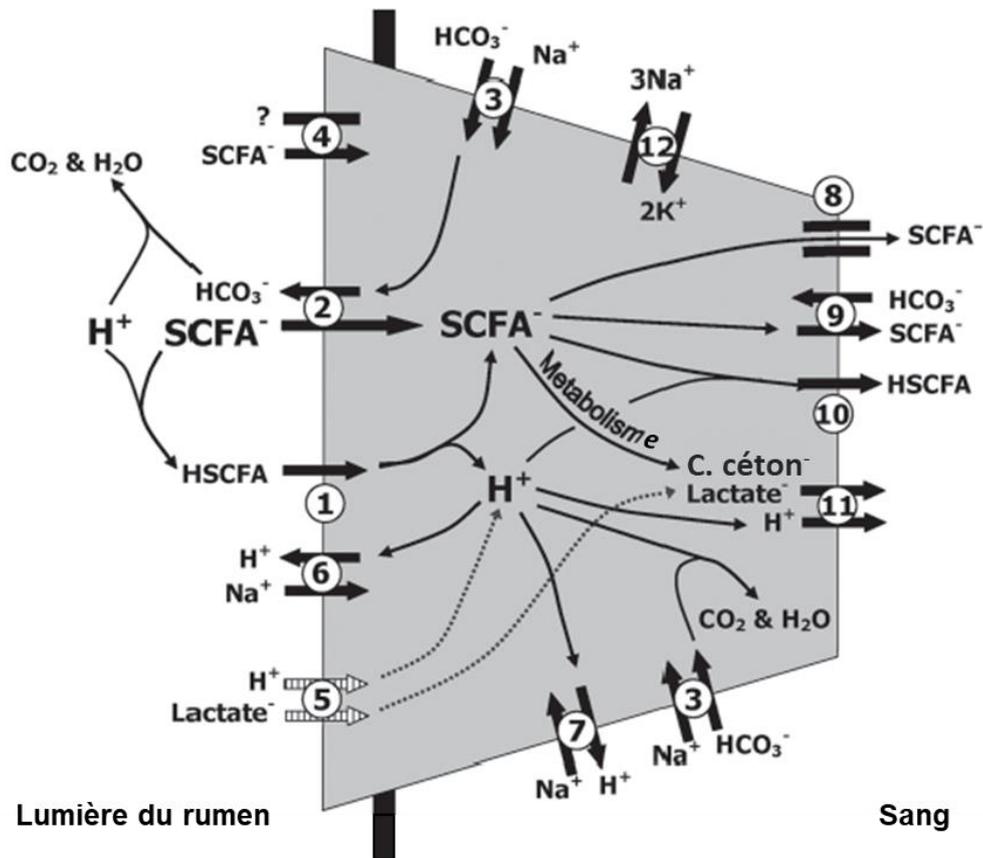
La diffusion des formes ionisées nécessite l'utilisation de protéines de transport et 50% des AGV seraient absorbés via un mécanisme dépendant du HCO_3^- (Penner, Aschenbach, et al. 2009). Le principal mécanisme de transport localisé sur la membrane apicale des cellules épithéliales est un antiport $\text{AGV}^-/\text{HCO}_3^-$. Le C2, moins lipophile que les autres AGV, a son absorption passive limitée et est majoritairement transporté au moyen de ce mécanisme. Chaque bicarbonate introduit au niveau du rumen en contrepartie d'un AGV permet la neutralisation d'un proton. Penner, Aschenbach, et al. 2009 ont montré que des individus consommant un même régime alimentaire répondaient différemment en termes de quantité d'AGV produites et de baisse du pH ruminal. Cette sensibilité individuelle à l'ARSA est négativement corrélée aux capacités de transport apical des AGV. Ce transport joue ainsi un rôle primordial dans la prévention de l'acidose.

Ces deux mécanismes, en retirant les protons de la lumière ruminale et en fournissant des bicarbonates, contribuent à une acidification des cellules épithéliales du rumen. Un échangeur Na^+/H^+ situé au niveau apical des cellules épithéliales permet de protéger ces cellules en recyclant les protons et les réintégrant dans la lumière ruminale. Ce transport sécurise l'épithélium des conséquences négatives de l'ARSA et prévient l'accumulation de Na^+ d'origine salivaire.

Un troisième transport apical indépendant des HCO_3^- mais couplé à une protéine est impliqué dans l'absorption des AGV sous forme ionisée. Ce mécanisme ne contribue pas à la neutralisation de protons.

Au niveau de la membrane baso-latérale les mécanismes d'absorption sont moins bien connus. Le monocarboxylate transporteur 1 (MCT1) est le seul à avoir été clairement identifié (Graham et al. 2007). Il permet d'exporter de la cellule épithéliale vers le sang les corps cétoniques issus du métabolisme intracellulaire du C4 et le lactate issu du métabolisme du C3. Ce transport contribue à l'accélération de l'absorption apicale des C4 en échange des HCO_3^- (Penner, Aschenbach, et al. 2009). Selon certains auteurs un transport baso-latéral des AGV se ferait également au moyen des MCT1 (Graham et al. 2007), par diffusion passive des formes complexées (Gäbel, Aschenbach, Müller 2002) ou encore au moyen de l'antiport $\text{AGV}^-/\text{HCO}_3^-$. Ces trois mécanismes contribuent eux aussi à sécuriser l'épithélium en évacuant les protons du cytosol de la cellule épithéliale. Certains AGV sous forme ionisée sont évacués au moyen d'un canal ionique.

L'absorption des AGV est permise par un contact étroit entre les AGV produits et l'épithélium ruminal. Une bonne motilité ruminale est indispensable à l'établissement de ce contact. Le rumen possède des récepteurs sensoriels sensibles aux stimulations mécaniques réalisées par les fibres. Lors d'ingestion d'une ration riche en concentrés à l'origine d'une forte production en AGV, les contractions seraient fortement diminuées. Elles seraient même quasiment inexistantes lors d'acidose (Huber 1976). La présence de fibres de taille suffisante pour exercer une stimulation mécanique, à savoir la teneur en peNDF de la ration, contribue à une plus grande motilité ruminale et par conséquent une meilleure absorption des AGV et une diminution du risque d'ARSA (Zebeli et al. 2012).



SCFA⁻ (short-chain fatty acid) : AGV sous forme ionisée
 HSCFA : AGV sous forme complexée

1) diffusion passive des formes non ionisées lipophiles des AGV. Une fois en position intracellulaire, les AGV libèrent rapidement leur proton. 2) Transport des AGV grâce à un transporteur antiport avec les HCO_3^- . Ce transport est favorisé par l'arrivée de bicarbonates au moyen du transport symport $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ (3), les bicarbonates permettent également de neutraliser les protons intracellulaires. 4) Passage apical des formes ionisées d'AGV permise par une protéine de transport, aurait un rôle minime dans le maintien de l'homéostasie ruminale et n'est pas clairement identifié. 5) Co transport des lactates associé à un proton. Echangeur apical (6) et basolatéral (7) Na^+/H^+ permettant d'expulser les protons du milieu intracellulaire et de prévenir une acidose de l'épithélium ruminal tout en limitant l'accumulation intraluminale des ions Na^+ salivaires. Les systèmes d'échanges au niveau de la membrane baso-latérale ont été moins étudiés, ils comprennent un canal perméable aux anions de grande taille (8) et un antiport $\text{AGV}^-/\text{HCO}_3^-$ (9). La diffusion passive des AGV lipophiles aurait elle aussi lieu (10). Au sein des cellules épithéliales le C4 est métabolisé en corps cétoniques (β -hydroxybutyrate et oxaloacétate) et une partie du C3 en lactate. Ces métabolites et le lactate importé du rumen sont exportés, associés à un proton, vers la circulation sanguine au moyen du MCT1 (11). 12) Le Na^+ présent en position intracellulaire suite aux transports le faisant intervenir est évacué de la cellule grâce à une pompe ATPasique.

Figure 15 : Représentation schématique des différents mécanismes de transport d'AGV au niveau d'une cellule épithéliale ruminale (Aschenbach et al. 2011)

La bonne absorption des AGV dépend également et surtout de l'intégrité de l'épithélium ruminal et de la taille des papilles. Plus les papilles sont de taille importante, plus la surface d'absorption des AGV l'est également. L'alimentation des animaux entraîne cependant des variations de la structure de l'épithélium et de la taille des papilles. Cela peut parfois limiter considérablement l'absorption des AGV et augmenter le risque d'ARSA ou accentuer cette dernière lorsqu'elle est déjà installée.

2. Effets d'une diminution du ratio fourrages-concentrés et de la disparition des fibres longues sur la muqueuse ruminale

La muqueuse ruminale est constituée dans sa partie la plus superficielle d'un épithélium stratifié squameux dont les cellules kératinisées en surface forment une barrière protectrice. Cette muqueuse n'est pas lisse mais présente de nombreux replis appelés papilles ruminales. Ces papilles ont été mises en évidence en 1973 par Scott et Gardner qui ont observé au microscope électronique des portions disséquées de rumen de mouton afin d'en étudier la structure. Selon leur localisation les papilles prennent des formes différentes, ont leur surface plus ou moins granuleuses et leur densité est variable (figure 16).

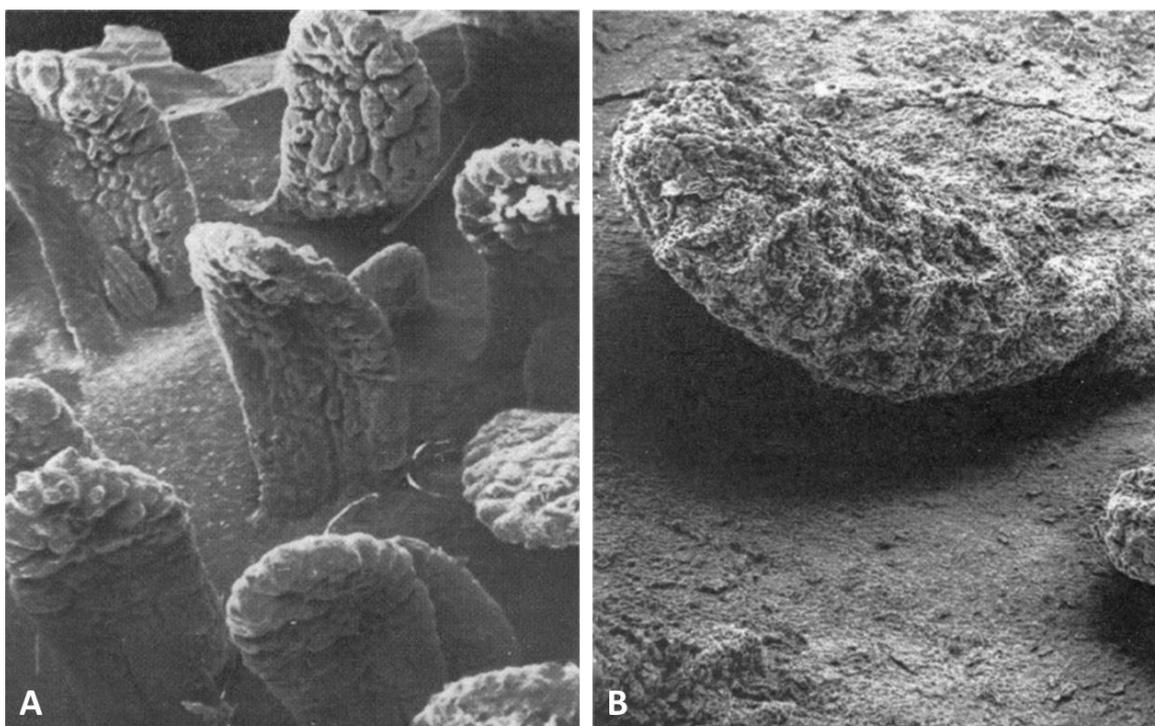


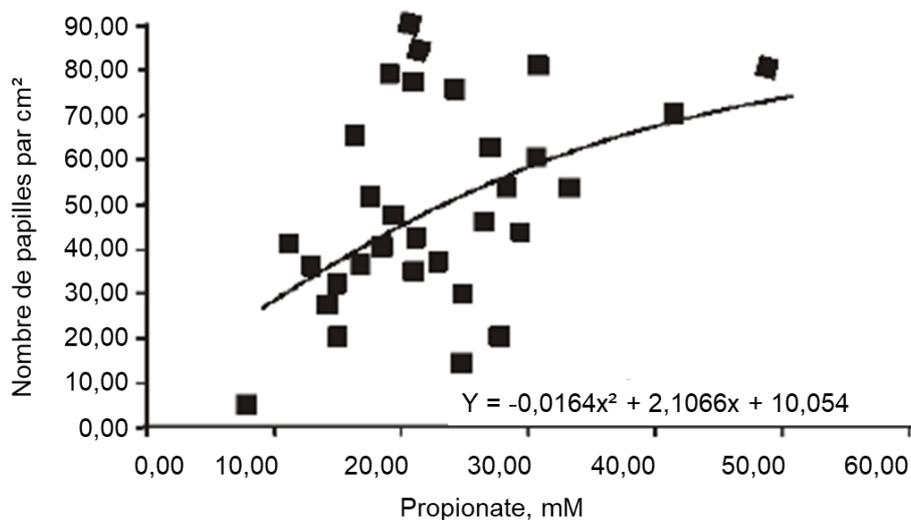
Figure 16 : Papilles ruminales observées au microscope électronique. A) Papilles du sac ventral, en forme de langue et rainurées en surface x22. B) Papilles du sac dorsal, davantage souples et moins densément réparties x70 (Scott, Gardner 1973)

- **Développement des papilles ruminales**

A la naissance le rumen n'est que peu développé et présente une muqueuse lisse. Sun et al. 2018 ont montré que la consommation d'une ration de démarrage en plus du lait dès 10 jours d'âge entraînait une augmentation du poids du rumen (contenu non comptabilisé), de la quantité totale d'AGV et de la proportion de propionate et de butyrate retrouvés dans le rumen. Ils ont également observé une augmentation de longueur, d'épaisseur et de surface des papilles ruminales. Ainsi la croissance et le développement du rumen sont favorisés par la stimulation mécanique liée à l'ingestion d'aliments solides, et ce dès le plus jeune âge. Les auteurs conseillent de commencer à nourrir les agneaux dès 7-10 jours avec des aliments solides en plus de leur alimentation lactée afin de stimuler la croissance des papilles.

Une fois le rumen développé, la structure de la muqueuse ruminale et la conformation des papilles ne sont pas figées. Elles peuvent être modifiées par la nature des aliments ingérés.

Les AGV, synthétisés à partir des glucides de la ration, favoriseraient la croissance papillaire. Le C4 est connu pour stimuler les cellules souches de la muqueuse digestive permettant un développement des papilles ruminales (Sakata, Tamate 1978; 1979). Shen et al. 2005 ont alors testé la réalisation d'une infusion quotidienne d'acide n-butyrique dans le rumen de bœufs présentant une canule et ont observé une augmentation de la longueur, de l'épaisseur et de la surface des papilles ruminales sur les animaux traités. Une étude portant sur des taureaux et dont une partie des résultats est présentée sur le graphique 8 a révélé une augmentation de la densité de papilles, de leur surface moyenne et de la surface de muqueuse ruminale recouverte par des papilles selon la concentration molaire en propionate cette fois-ci (Mach, Devant, Bach 2006). Les AGV, notamment le C3 et surtout le C4, participent ainsi au développement des papilles ruminales.



Graphique 8 : Relation entre le nombre de papilles et la concentration molaire ruminale en propionate chez des taureaux Holstein (Mach, Devant, Bach 2006)

Les AGV sont synthétisés dans le rumen suite à la dégradation des glucides contenus dans la ration. La synthèse de C2, au détriment de celle du C3, est favorisée par des rations riches en fourrages. Les rations riches en amidon sont quant à elles à l'origine d'une plus grande production de C3 et d'une diminution de celle de C2. Le C4 est pour sa part majoritairement synthétisé lors de la consommation de rations riches en sucres solubles (saccharose dans la betterave ou lactose dans le lactosérum), les agneaux ne sont pas concernés par ce type de ration. Ainsi la consommation par les agneaux de rations à base de concentrés, riches en amidon, semble contribuer au développement des papilles ruminales et permettrait une plus grande absorption des AGV afin de limiter le risque d'ARSA.

On pourrait penser que l'ajout de fibres solides à la ration, par son action mécanique, permettrait le développement des papilles ruminales. Des études ont étudié l'influence d'une alimentation riche en fibres sur la conformation des papilles ruminales et les résultats diffèrent. Alhidary et al. 2016 ont observé que l'ajout de foin à une RTM entraînait une augmentation de la longueur, de la largeur et de la surface des papilles ruminales. Pour Alvarez-Rodriguez et al. 2012, la supplémentation en fourrages n'a au contraire pas modifié la longueur et la largeur des papilles du sac dorsal, a diminué leur surface, et n'a entraîné aucun changement des papilles du sac ventral. L'effet des fourrages sur la conformation des papilles n'est ainsi pas aussi marqué que celui des concentrés. Leur présence est par contre indispensable au développement du volume ruminal et à une plus grande efficacité alimentaire (Priolo et al. 2002).

Alors que l'action positive des concentrés sur le développement des papilles ruminales a été clairement mise en évidence, les conclusions ne sont pas aussi évidentes pour l'effet des fourrages. La taille des papilles influe sur l'absorption des AGV pour limiter le risque de développement d'ARSA. Cependant, lorsque celle-ci est déjà mise en place, l'intégrité de l'épithélium est compromise et modifie l'absorption des AGV quelle que soit la taille des papilles.

- **Effets d'une diminution du ratio fourrages-concentrés et de la disparition des fibres longues sur l'intégrité de l'épithélium ruminal**

Même si le rumen dispose de deux systèmes tampons performants pour maintenir le pH ruminal à une valeur importante malgré la production d'AGV, lorsque celle-ci devient trop importante et rend l'action des systèmes tampons insuffisante ou si ces derniers sont défaillants, le pH ruminal diminue sous le seuil de 5,8 puis 5,6 pendant une durée importante : l'ARSA se met en place. Cet état acidosique au niveau du rumen rompt l'équilibre ruminal et perturbe considérablement l'intégrité de la muqueuse et la fonction de l'épithélium ruminal.

Tous les chercheurs s'accordent sur le fait que l'absence de fourrages dans les rations entraîne une diminution du pH dans le rumen et altère la structure de l'épithélium ruminal. Alors que l'épithélium d'agneaux nourris avec des fourrages en plus des concentrés présente une couleur marron clair, celui d'animaux nourris exclusivement avec des concentrés est beaucoup plus sombre comme l'illustre le tableau 13 (Alvarez-Rodriguez et al. 2012). Blanco et al. 2015 et Alhidary et al. 2016 ont fait des observations similaires.

L'épaisseur du stratum corneum est elle aussi modifiée en l'absence de fibres longues. Dans les études de Alvarez-Rodriguez et al. 2012 et Alhidary et al. 2016 il a été observé une augmentation de l'épaisseur du stratum corneum dans le cas de l'utilisation de rations n'incluant pas de fibres longues (figure 17). Steele et al. 2012 ont fait le même constat avec l'utilisation de rations riches en carbohydrates non fibreux. Dans toutes ces études, les

changements observés au niveau de l'épithélium ont été mis en évidence chez des agneaux dont la modification de ration a entraîné une diminution du pH ruminal et la mise en place d'une ARSA.

Tableau 13 : Influence du système alimentaire sur la couleur de l'épithélium du sac ventral du rumen d'agneaux (Alvarez-Rodriguez et al. 2012)

	Système alimentaire		SEM	P-value
	Fourrages	Concentrés		
Score de couleur *	2,00	2,81	0,09	< 0,001

* Score évalué sur une échelle de 0 à 3 : 1 = jaune, 2 = marron clair, 3 = marron-gris sombre

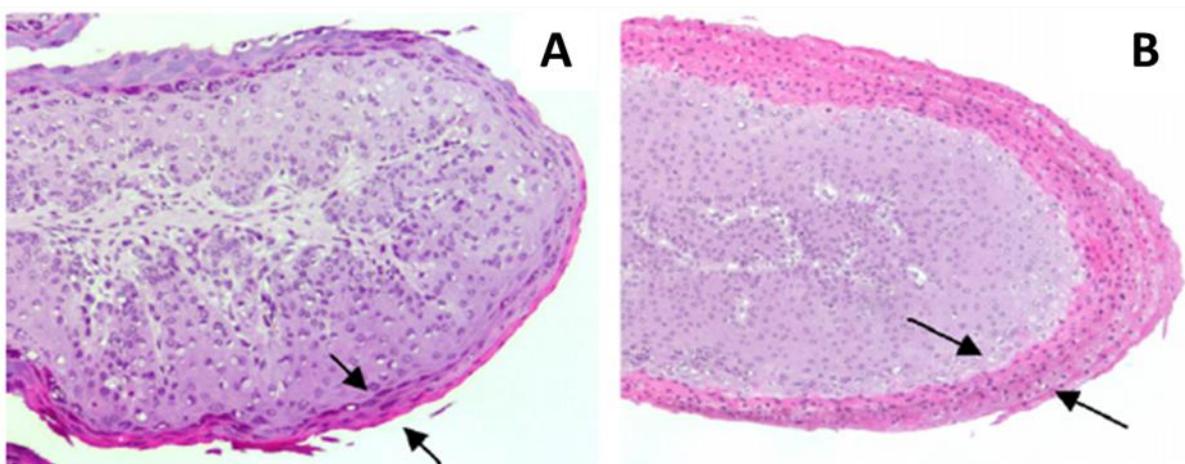


Figure 17 : Epaisseur de la couche kératinisée de l'épithélium des papilles ruminales des agneaux nourris avec du foin de luzerne (A) ou avec des concentrés (B) x100 (Alvarez-Rodriguez et al. 2012)

Comme nous venons de le voir, des régimes riches en grains ou pauvres en fibres longues sont responsables d'une diminution du pH ruminal à l'origine d'une forte augmentation du taux de métabolisme et de prolifération des cellules épithéliales. Celles-ci se transforment prématurément en cellules kératinisées, augmentant alors l'épaisseur de la couche cornée (Plaizier et al. 2012). Cette prolifération excessive et différenciation prématurée de l'épithélium est qualifiée de parakératose et se traduit par un rumen de couleur noire comme nous l'avons évoqué précédemment.

Cette parakératose survient dans le contexte d'ARSA et affecte considérablement l'intégrité de l'épithélium ruminal. Une première conséquence est une diminution de l'absorption des AGV or une absorption importante aurait permis une augmentation du pH ruminal limitant l'importance de l'ARSA. Ce cercle vicieux contribue à aggraver l'acidose. Une autre conséquence de la parakératose est la perte d'efficacité de la barrière constituée par l'épithélium ruminal qui favorise les translocations bactériennes et le passage de

lipopolysaccharides bactériens (LPS) au travers de la muqueuse ruminale (Lessire, Rollin 2013). Les conséquences de l'ARSA ne touchent alors plus seulement le rumen mais deviennent systémiques. Selon la nature des éléments transloqués, influencée par l'ampleur de la baisse du pH ruminal, les effets sont variables.

- **Inflammation de la paroi ruminale et inflammation systémique**

Les modifications rencontrées au niveau de l'épithélium ruminal lors de sub-acidose sont à l'origine d'une inflammation de la paroi ruminale, on parle de ruminite (the Reference Advisory Group on Fermentative Acidosis of Ruminants 2007). Cette inflammation, associée à la déstructuration de l'épithélium causée par la parakératose, altère la fonction de barrière protectrice normalement assurée par l'épithélium ruminal et favorise le passage de substances contenues dans le rumen vers la circulation sanguine.

Le rumen contient de nombreuses bactéries dont des gram négatives. Leur multiplication active mais surtout la lyse des bactéries mortes lors de diminution du pH ruminal entraîne la libération de leur LPS (Nagaraja et al. 1978). Les animaux présentant une ARSA voient leur concentration en LPS libre dans le rumen fortement augmenter (Khafipour et al. 2009; Gozho et al. 2005b). Cette observation est valable lors de l'induction d'ARSA par une augmentation de la quantité de concentrés distribués ou lors de l'induction suite au remplacement d'une partie du foin de luzerne par des granulés de luzerne comme le montrent les tableaux 14 et 15.

La parakératose et la ruminite liées à la diminution du pH ruminal favorisent la translocation du LPS au travers de la muqueuse ruminale et son passage vers le sang. La présence d'une grande quantité de LPS dans le sang peut activer les protéines de l'inflammation à l'origine d'une inflammation systémique aiguë. Les deux marqueurs de réponse inflammatoire chez les ruminants sont l'Haptoglobine (Hp) et la Sérum amyloïde A (SAA) (Alsemgeest et al. 1994).

Plusieurs études se sont intéressées à la réponse inflammatoire mise en place lors de l'induction expérimentale d'une ARSA et des différences ont été mises en évidence selon le mode d'induction. Lorsque l'ARSA est induite par une augmentation de la quantité de glucides fermentescibles (modification du ratio F:C), sont observés une diminution du pH ruminal sous le seuil de 5,6 pendant une durée suffisante pour correspondre aux critères de l'ARSA, une augmentation de la quantité de LPS ruminal et une augmentation de la teneur sanguine en Hp (Tableau 14, Khafipour et al. 2009; Gozho et al. 2005b) et en SAA (Gozho et al. 2005a). Lorsque l'ARSA a été induite par le remplacement d'une partie des fibres longues de luzerne par des granulés de luzerne (ratio F:C inchangé), la chute de pH a été identique aux résultats

précédents, la concentration en LPS ruminal a également augmenté mais aucune réponse inflammatoire n'a été mise en évidence au niveau sanguin (Tableau 15, Khafipour et al. 2009).

Tableau 14 : Effets de l'induction d'une ARSA modérée ou sévère par l'ajout de concentrés chez des vaches laitières sur la durée pendant laquelle le pH est inférieur à 5,6 ainsi que sur la concentration en LPS ruminal et en Haptoglobine sérique (Khafipour 2009)

	Durée pendant laquelle pH < 5,6 (min/j)		LPS ruminal (EU/mL)		Haptoglobine sérique (µg/mL)	
	moyenne	sévère	moyenne	sévère	moyenne	sévère
Contrôle	75 b	161 b	32,413 Bb	29,933 b	0,0 c	0,0 c
ARSA induite par une augmentation des concentrés	217 a	337 a	100,175 Ab	179,762 a	343,3 b	608,0 a
SE	72		30,072		35,8	

EU : unit d'endotoxine (1EU = 100 pg d'endotoxine)

a,b et c : pour chaque variable, des moyennes avec des symboles différentes au sein de la même ligne ou colonne sont significativement différents ($p < 0,05$). A et B : pour chaque variable, des moyennes avec des symboles différentes au sein de la même ligne ou colonne sont significativement différents ($p < 0,1$).

ARSA moyenne/sévère induite par une augmentation des concentrés et ARSA induite par la disparition de fibres longues : groupes créés suite à l'analyse discriminante de la durée de pH<5,6, de la concentration en LPS et en Hp;

Tableau 15 : Effets de l'induction d'une ARSA par le remplacement du foin de luzerne par des granulés de luzerne chez des vaches laitières sur la durée pendant laquelle le pH est inférieur à 5,6, la concentration en LPS ruminal et en Haptoglobine sérique (Khafipour 2009)

	Durée pendant laquelle pH < 5,6 (min/j)		LPS ruminal (EU/mL)		Haptoglobine sérique (µg/mL)	
	moyenne	sévère	moyenne	sévère	moyenne	sévère
Contrôle	112 b		42,122 b		56 a	
ARSA induite par la disparition de fibres longues	510 a		169,266 a		21 b	
SE	109,5		16,780		6	

EU : unit d'endotoxine (1EU = 100 pg d'endotoxine)

a et b : des moyennes avec des symboles différentes au sein de la même colonne sont significativement différents ($p < 0,05$)

Etant donné qu'une augmentation de la quantité de LPS au niveau du rumen est observée dans les deux cas, le LPS seul n'est pas la cause de l'inflammation systémique qui ne survient que lors d'ARSA causée par une augmentation de glucides fermentescibles dans la ration. L'inflammation pourrait être causée par une autre molécule libérée uniquement lors d'ARSA liée à l'augmentation de la teneur en glucides. Une autre explication serait que selon le mode d'induction d'ARSA, la population bactérienne présenterait des variations, la toxicité du LPS serait alors plus ou moins importante et pourrait dans certains cas être à l'origine d'une inflammation systémique. Khafipour et al. 2009 ont étudié les populations microbiennes peuplant le rumen lors des deux inductions d'ARSA et ont mis en évidence la présence en

nombre beaucoup plus important d'*E.coli* dans le cas d'ARSA liée à une augmentation de la quantité de concentrés par rapport à une ARSA liée à la modification de la longueur des fibres. Or le LPS d'*E.coli* est beaucoup plus toxique que le LPS des bactéries présentes dans le rumen d'animaux nourris avec des fourrages (Nagaraja et al. 1979). Ce serait alors la différence de nature des bactéries présentes dans le rumen dans les deux cas d'ARSA qui expliquerait qu'une inflammation systémique survienne uniquement lors d'ARSA liée à la teneur en concentrés.

La population d'*E.coli* n'est pas la seule à être affectée par la diminution de pH, une modification de nombreux autres micro-organismes est observée. Les variations de composition du microbiote ruminal lors d'ARSA vont être évoquées dans la partie suivante.

C'est ainsi que la présence de concentrés dans la ration des agneaux dès le plus jeune âge contribue à un bon développement des papilles ruminales. A leur niveau, l'absorption importante d'AGV participe à limiter le risque de développement d'ARSA. Cependant, même combiné à l'action de la salive, ce système tampon peut s'avérer insuffisant et n'empêche pas toujours la mise en place d'une ARSA. La diminution de pH au niveau du rumen est alors à l'origine d'une ruminite et d'une perturbation de la structure de l'épithélium. Cette altération de la muqueuse ruminale crée des brèches permettant le passage du LPS vers le système sanguin. L'ARSA n'a plus seulement des conséquences au niveau du rumen mais a des répercussions sur l'ensemble de l'organisme. Ces répercussions sont étroitement liées à la nature des éléments traversant la paroi ruminale, et donc à la nature des micro-organismes présents dans le rumen. La diminution du pH ruminal modifie l'écosystème peuplant le rumen. Selon l'origine de l'ARSA (modification du ratio F:C ou non) et selon l'ampleur de la diminution du pH, les modifications de microbiote diffèrent.

3. Effets d'une diminution du ratio fourrages-concentrés et de la disparition des fibres longues sur le microbiote ruminal

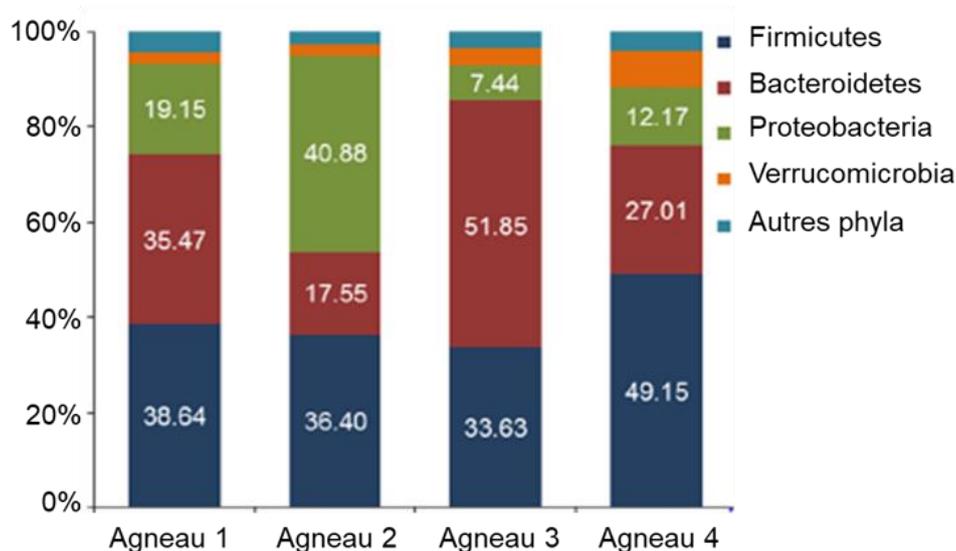
- **Composition du microbiote ruminal**

Dans des conditions normales, le rumen est peuplé par trois populations microbiennes distinctes : des bactéries (10^{10} - 10^{11} cellules/mL), des protozoaires ciliés (10^4 – 10^6 cellules/mL) et des champignons anaérobies (10^4 cellules/mL) (Cuvelier et al. 2005). Ces micro-organismes sont principalement localisés sur les particules végétales dans la langue de fourrages mais certaines bactéries se retrouvent également libres dans la phase liquide. Au sein du rumen les micro-organismes vivent en symbiose avec l'animal qu'ils colonisent. Ils permettent la dégradation d'aliments faiblement digestibles grâce aux fermentations qu'ils opèrent et assurent un apport au ruminant en AGV, acides aminés essentiels et vitamines. Ils

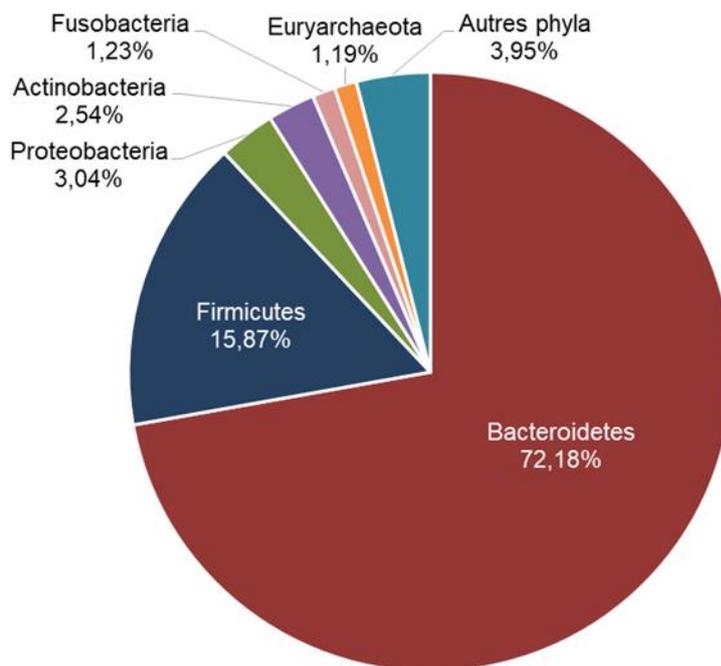
sont toutefois à l'origine d'une perte d'énergie (par la production de méthane) et de protéines (sous forme d'ammoniaque et d'acides nucléiques) pour leur hôte (Enjalbert et al. 2017).

L'étude des populations bactériennes présentes dans le rumen de mouton par séquençage génétique a permis de mettre en évidence les trois principaux phyla qui dominent la communauté bactérienne : Firmicutes (15-95%), Bacteroidetes (3,9-67%) et Proteobacteria (0,89-27%) (Lettat 2011). Le phylum Firmicutes regroupe la majorité des bactéries cellulolytiques, amylolytiques, lipolytiques et productrices ou consommatrices d'acide lactique (*R. albus*, *R. flavefaciens*, *A. lipolytica*, *E. ruminantium*, *B. fibrisolvans*, *S. bovis*, *Lactobacillus spp*, *M. elsdenii*). Au sein du groupe Bacteroidetes, le genre *Prevotella* représente plus de 30% de la communauté bactérienne (Lopes et al. 2015).

De manière générale la communauté bactérienne ruminale comporterait davantage de bactéries du groupe Firmicutes que de bactéries du phylum Bacteroidetes (Ozutsumi et al. 2005; Tajima et al. 2000). Cependant ces proportions varient fortement selon les régimes alimentaires, les techniques d'extraction et de séquençage et selon les individus. Dans une étude de Lopes et al. 2015, le profil du microbiote bactérien de quatre agneaux dans le même environnement et recevant la même alimentation a montré une forte variabilité individuelle (Graphique 9). Seul l'agneau 3 a présenté un phylum Bacteroidetes plus abondant que le phylum Firmicutes. Dans cette même étude le profil phylogénétique du rumen de mouton obtenu par séquençage shotgun s'est révélé être dominé par le phylum Bacteroidetes (Graphique 10). Les techniques de séquençage de l'ADN bactérien semblent influencer sur les résultats, le séquençage basé sur l'ARNr 16S pourrait conduire à une amplification inégale des différentes espèces et le séquençage shotgun ne serait pas assez performant pour détecter les espèces bactériennes les moins abondantes (Lopes et al. 2015).



Graphique 9 : Structure de la communauté bactérienne par séquençage basé sur l'ARNr 16S de quatre agneaux dans des mêmes conditions environnementales et consommant la même ration (Lopes et al. 2015)



Graphique 10 : Profil phylogénétique du microbiote ruminal de mouton obtenu par séquençage shotgun (Lopes et al. 2015). « Autres phyla » comprend les phyla représentant moins d'1% du séquençage total.

Au sein du rumen les bactéries participent aux fermentations des glucides constituant les parois (cellulose, hémicellulose, pectine) ou présents dans le contenu cellulaire (amidon et sucres solubles) des aliments de la ration. Les produits issus de l'hydrolyse enzymatique (glucose, cellobiose, xylose et acide galacturonique) pénètrent dans les bactéries au sein desquelles est réalisée une fermentation anaérobie à l'origine du pyruvate, ensuite métabolisé en AGV, CO₂ et méthane (Cuvelier et al. 2005). Certaines bactéries dégradent la cellulose et sont qualifiées de cellulolytiques. C'est le cas de *Fibrobacter succinogenes*, *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Ruminococcus flavefaciens* et de *Ruminococcus albus* (Tableau 16). *Prevotella ruminicola* et *Butyrivibrio fibrisolvens* digèrent l'hémicellulose. Les produits issus de la digestion de la cellulose et de l'hémicellulose sont principalement du C2, du C3, un peu de C4 et du CO₂. Il y a également les bactéries amylolytiques capables de digérer l'amidon. Cette classe regroupe *Prevotella ruminicola*, *Streptococcus bovis*, *Bacteroides amylophilus*, *Clostridium lochheadii*, *Succinomonas amylolytica* et *Selenomonas ruminantium*. La fermentation réalisée par les bactéries amylolytiques conduit à la formation de C3 en quantité importante (production supérieure à celle de la flore cellulolytique) et également de lactate. Certaines bactéries peuvent avoir plusieurs substrats. Leurs conditions d'activités ne sont cependant pas toujours compatibles avec la présence de ces substrats et leur activité pour certains d'entre eux peut n'être que modérée.

Tableau 16 : Substrats utilisés (+) ou non (-) par les principales espèces bactériennes du rumen (d'après Fonty et al. 1995)

Espèces bactériennes	Substrats					
	cellulose	hémicellulose	amidon	pectines	triacylglycérols	protéines
<i>Fibrobacter succinogenes</i>	+	+	-	+	-	-
<i>Ruminococcus albus</i>	+	+	-	+		-
<i>Ruminococcus flavefaciens</i>	+	+	-	+		-
<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	-	+	+	+		+
<i>Prevotella ruminicola</i>	-	+	+	+		+
<i>Selenomonas ruminantium</i>	-	-	+			+
<i>Streptococcus bovis</i>	-	-	+	+		+
<i>Ruminobacter amylophilus</i>	-	-	+	-		+
<i>Succinomonas amylolytica</i>	-	-	-	+		
<i>Succinivibrio dextrinosolvens</i>		-	-	+	+	+
<i>Anaerovibrio lipolytica</i>		-	-	-		+

Les bactéries participent également à la transformation des lipides alimentaires. Les lipides issus de l'alimentation des ruminants sont principalement sous forme de triglycérides, galactolipides et phospholipides. L'hydrolyse des triglycérides est réalisée par des lipases extracellulaires sécrétées par des bactéries lipolytiques. *Anaerovibrio lipolytica* est la principale (Enjalbert et al. 2017). Elle conduit à la formation d'AG libres et de glycérol. Les phospholipides et galactolipides seraient lysés par les estérases de certaines souches de *Butyrivibrio fibrisolvens* (Hazlewood, Dawson 1979). D'autres études ont plus récemment montré une activité lipolytique chez des bactéries des genres *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Staphylococcus* et *Selenomonas* (Edwards et al. 2013). Le rôle des champignons et protozoaires dans le métabolisme ruminal des lipides n'a pu être mis en évidence avec certitude (Cuvelier et al. 2005; Enjalbert et al. 2017).

Alors que le glycérol et le galactose sont fermentés en AGV, les AG insaturés subissent ensuite une biohydrogénation. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, la biohydrogénation regroupe plusieurs étapes réalisées par des micro-organismes qui agissent en symbiose. Chaque micro-organisme utilise les intermédiaires obtenus au niveau des étapes précédentes et permet la synthèse d'un produit utilisé par une autre bactérie. Aucune souche bactérienne n'est capable de réaliser seule l'ensemble des réactions de biohydrogénation. Parmi les bactéries, les principales espèces qui ont été identifiées comme participant à la biohydrogénation sont *B.fibrisolvens*, *B. proteoclasticus*, *B. hungatei* ainsi que certaines bactéries appartenant aux genres *Clostridium*, *Pseudobutyrvibrio*, *Lactobacillus*, *Propionibacterium*, *Bifidobacterium*, *Eubacterium*, *Roseburia*, *Enterococcus* et *Pediococcus* (Unni et al. 2016). Une des étapes importantes de la biohydrogénation est l'isomérisation de l'acide linoléique en isomères *trans*11. Les isomères *trans*11 sont synthétisés par les bactéries du genre *Butyrivibrio* et principalement par *B. fibrisolvens* et *B. proteoclasticum*. Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, une ration riche en concentrés associée à une supplémentation en C18:2n-6 entraîne la réalisation d'un shift de la biohydrogénation des isomères *trans*11

vers la production d'isomères *trans*¹⁰. Les bactéries responsables de la synthèse d'isomères *trans*¹⁰ seraient *M. elsdenii* et *Propionibacterium acnes* (Kim 2002, Wallace 2007) mais leur implication n'a pas été clairement démontrée. La dernière étape conduisant à la production de C18:0 n'est réalisée que par peu de bactéries c'est pourquoi on la qualifie d'étape limitante. *B. hungatei* et *B. proteoclasticus* seraient capables de la réaliser (Maia 2007).

Les bactéries ont également d'autres rôles au sein du rumen. Elles peuvent utiliser comme substrats les sucres simples, les acides organiques, l'ammoniac ou encore être protéolytiques ou productrices de méthane.

Les protozoaires auraient pour principal rôle d'ingérer des bactéries ce qui permettrait la régulation de la population bactérienne du rumen. Ils contribueraient également au métabolisme lipidique (leur rôle n'a pas été clairement identifié), et exerceraient une activité fibrolytique en symbiose avec les bactéries (Williams, Coleman 1992). Leur rôle direct dans la biohydrogénation n'est pas non plus très clair, cette voie métabolique pourrait être réalisée au sein du protozoaire mais elle serait effectuée par les bactéries qu'il a englouties plutôt que par le protozoaire lui-même (Jenkins et al. 2008)

Le rôle des champignons a été moins étudié, ils seraient capables de digérer des particules indigestibles par les autres micro-organismes du rumen.

Chaque micro-organisme travaille dans une gamme de pH définie et qui lui est propre. Toute modification de ration correspondant à une augmentation de la quantité de glucides fermentescibles ou à une diminution de la longueur des fibres des fourrages entraîne une diminution du pH comme nous l'avons évoqué précédemment (Penner, Taniguchi, et al. 2009; Li et al. 2014). Cette diminution de pH régulière et sur une longue durée lors d'ARSA modifie l'écosystème ruminal et les fermentations qui y sont associées.

- **Effets d'une diminution de pH ruminal sur le microbiote**

Khafipour et al. 2009 se sont intéressés aux populations microbiennes présentes lors de l'induction d'une ARSA. Les principaux phyla bactériens mis en évidence ont été *Bacteroidetes*, *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Spirochaetes*, *Actinobacteria*, *Fusobacteria*, TM7, *Tenericutes* et *Deinococcus-Thermus*. Les trois premiers phyla cités représentaient la grande majorité des bactéries ruminales (98%), ce qui est en accord avec les observations de Lopes et al. 2015.

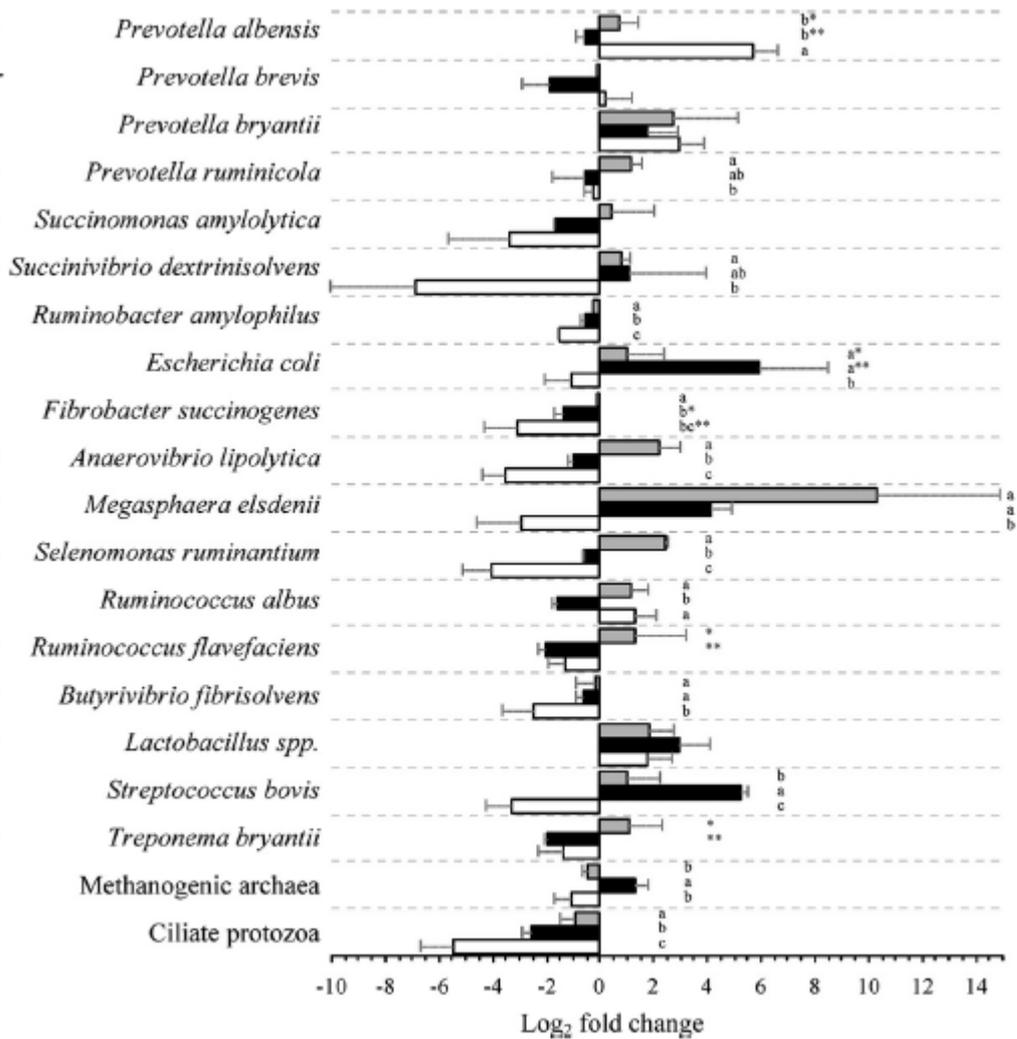
Deux types d'ARSA ont été induits, l'un en remplaçant une partie de la matière sèche de la ration par des concentrés, l'autre en remplaçant une partie du foin de luzerne par des granulés de luzerne broyée. L'apport d'amidon permet une croissance des populations de *S. bovis* beaucoup plus rapide que celle des autres bactéries. Lors de l'induction d'une ARSA par ajout de concentrés, on devrait s'attendre à retrouver dans cette situation une plus grande

population de bactéries amylolytiques et notamment de *S.bovis* qu'avant induction. Comme cette bactérie produit principalement de l'acide lactique, sa présence devrait être associée à celle de bactéries consommant le lactate afin de prévenir une acidose lactique (Russell, Hino 1985). Khafipour et al. 2009 ont observé que parmi les bactéries présentes dans le rumen en début d'expérimentation, la population de *S.bovis* était celle ayant connu la plus forte croissance suite à l'induction d'une ARSA en augmentant la teneur en concentrés. L'accroissement de la population de *S.bovis* s'est retrouvé corrélé à celui de la population de *M. elsdenii*, une bactérie consommant une grande quantité d'acide lactique (utilise 60 à 95% du lactate, Counotte et al. 1981). Ces observations sont conformes aux attentes. L'induction de cette ARSA a également entraîné une augmentation de la population d'*E.coli* et de Lactobacilles. Au contraire, lors de l'induction d'ARSA suite à une diminution de la teneur de la ration en fibres longues, les populations des espèces bactériennes précédentes n'ont pas connu d'augmentation importante. Ce sont les *Prevotella albensis*, *Prevotella bryantii* et *Ruminococcus albus* qui ont connu la plus forte croissance (graphique 11).

De manière générale, quel que soit le monde d'induction d'ARSA, Khafipour et al. 2009 ont observé une diminution de la taille du phylum *Bacteroidetes* et une augmentation importante de celle du phylum *Firmicutes*. Des résultats similaires ont été observés par Mao et al. 2013 et Plaizier et al. 2017. D'autres études cependant ont mis en évidence des résultats inverses avec une augmentation du ratio *Bacteroidetes*/*Firmicutes* lors de la consommation de rations riches en concentrés (Callaway et al. 2010; Fernando et al. 2010).

La diminution du pH sous le seuil de 5,5 causée par l'accumulation d'AGV lors d'ARSA est également responsable de la disparition des protozoaires (Krause, Oetzel 2006). Dans une situation normale les protozoaires prédatent essentiellement les bactéries amylolytiques et ont la capacité d'engloutir et d'accumuler dans leur organisme les grains d'amidon et les sucres solubles (Williams, Coleman 1992). Ils jouent ainsi un rôle dans la prévention des fermentations qui diminueraient le pH et seraient responsables d'acidose lactique. Lors d'ARSA ce rôle préventif n'est plus joué par les protozoaires, davantage d'amidon est disponible et davantage de bactéries amylolytiques sont présentes pour les fermenter et accentuer la diminution de pH.

Ainsi la diminution du pH consécutive à l'apport d'une grande quantité de concentrés ainsi que la disparition des fibres longues dans la ration sont responsables d'une modification des populations de micro-organismes contenues dans le rumen. Les fermentations et réactions dans lesquelles interviennent ces micro-organismes sont alors perturbées.



log₂ fold change : outil utilisé en statistique génomique, correspond au rapport du niveau d'expression d'un gène dans le cas où l'ARSA a été induite par rapport à la situation contrôle. Exprimé en logarithme de base 2 : un fold change de 1 signifie que le gène est deux fois plus exprimé lors d'ARSA que dans la situation contrôle.

a, b et c indiquent une différence significative entre les espèces (* p-value < 0,05 et ** p-value < 0,1).

Les barres d'erreur représentent les erreurs standard

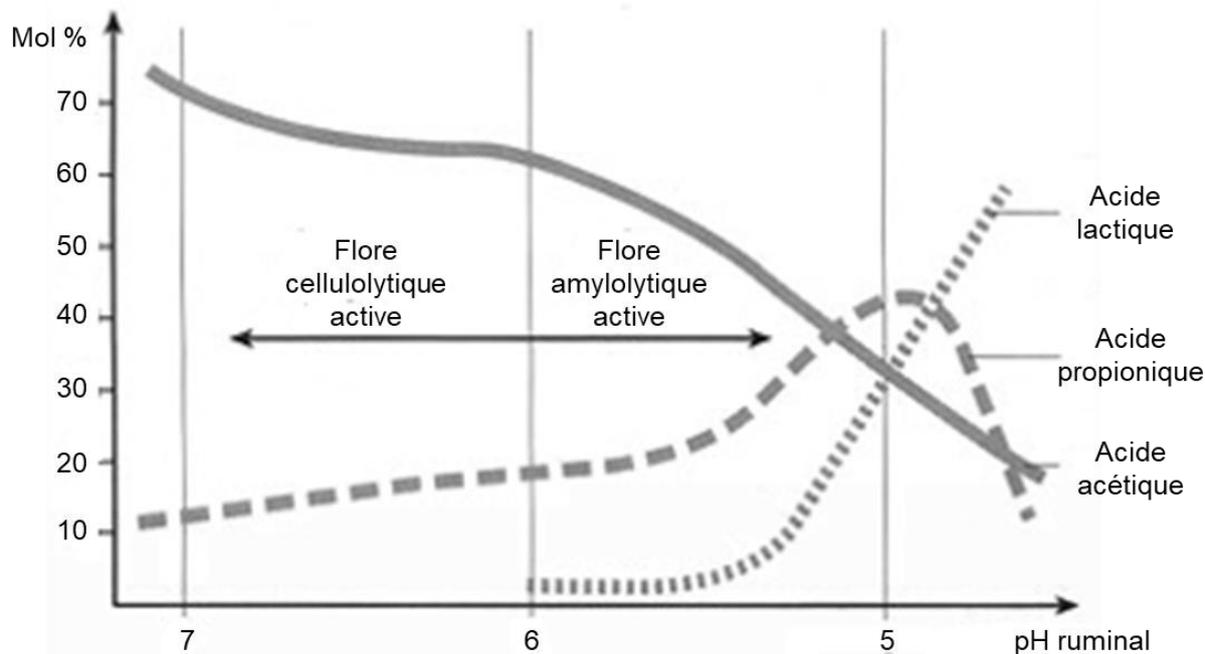
Graphique 11 : Variations (log₂) des principaux micro-organismes ruminaux avant le repas chez des animaux présentant une ARSA sévère (barres noires) ou modérée (barres grises) provoquée par l'ajout de concentrés ou une ARSA induite par le retrait des fibres longues (barres blanches) par rapport à la situation contrôle (Khatipour 2009).

- **Modifications des fermentations microbiennes lors de diminution du pH ruminal**

La modification de flore bactérienne lors d'ARSA a des répercussions sur deux mécanismes réalisés au sein du rumen par les bactéries : la fermentation des sucres et le métabolisme des lipides.

La fermentation microbienne des glucides conduit à la formation d'AGV de nature différente selon le substrat utilisé et les bactéries impliquées. Le graphique 12 présente l'évolution des pourcentages en C2, C3 et acide lactique selon le pH ruminal. Sont également représentées les gammes de pH dans lesquelles les bactéries cellulolytiques et amylolytiques sont actives. On constate que les bactéries cellulolytiques nécessitent un pH élevé, supérieur à 6, pour pouvoir se multiplier. Les bactéries amylolytiques sont quant à elles moins sensibles au pH acide et peuvent survivre dans des gammes de pH comprises entre 5 et 6. Au fur et à mesure que le pH diminue, la flore amylolytique augmente au détriment de la flore cellulolytique. C'est ainsi que la part des produits fermentaires correspondant au C2 décroît et que celle correspondant au C3 augmente jusqu'à un pH voisin de 5 (Kaufman, Hagemester, Durksen 1980). Tant que le pH est maintenu supérieur à 5,5, un équilibre entre producteurs d'acide lactique (*Lactobacillus*, *Streptococcus bovis*) et consommateurs (*Megasphaera elsdenii* et *Selenomonas ruminantium*) est présent, celui-ci ne s'accumule pas dans le rumen (Nocek 1997; Lessire, Rollin 2013). Sous ce seuil de pH, les bactéries productrices (essentiellement les Lactobacilles qui survivent seules en milieu très acide) prennent le dessus et l'acide lactique devient majoritaire dans le rumen (Kaufman, Hagemester, Durksen 1980). Cet acide est dix fois plus fort que le C2, C3 et C4 et entraîne une baisse importante du pH ruminal. De telles valeurs de pH créent un milieu hostile dans lequel les populations de champignons et de protozoaires disparaissent également.

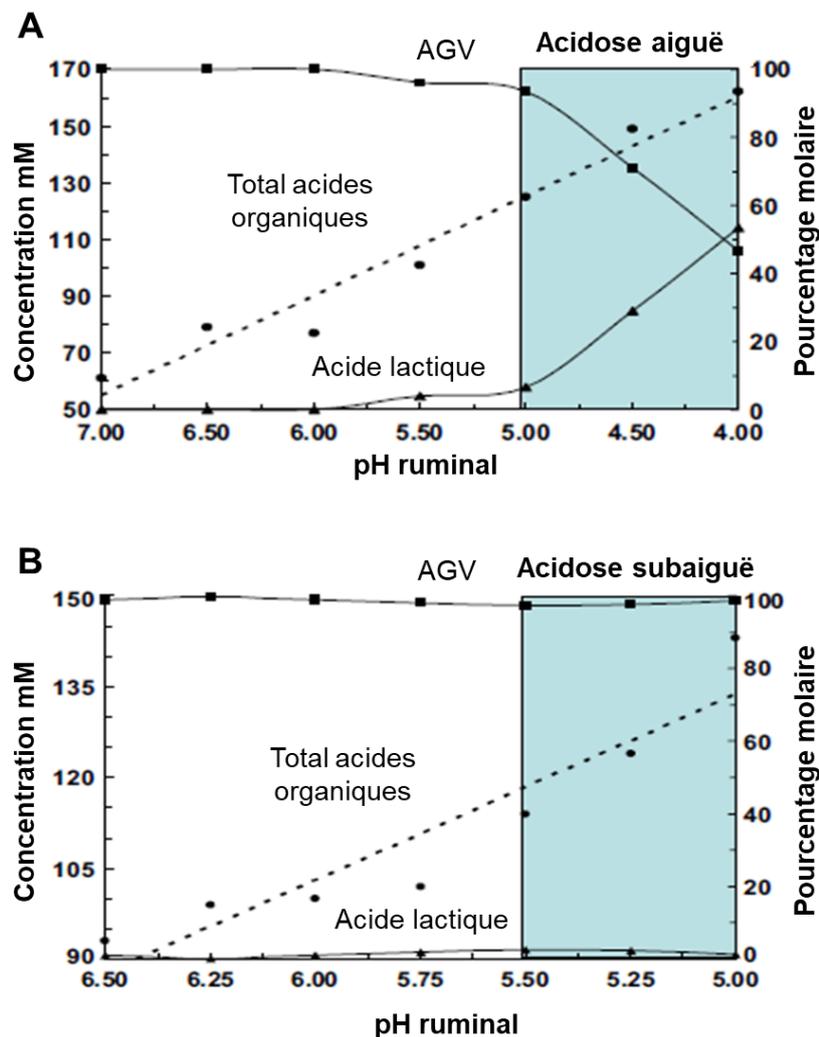
La consommation de l'acide lactique par *M. elsdenii* et *S. ruminantium* conduit à la formation d'acide valérique, un AGV mineur (car produit en faible quantité en comparaison du C2, C3 et C4). Cet AGV constitue un marqueur d'acidose, sa détection en grande concentration traduit un pH faible dans le rumen (the Reference Advisory Group on Fermentative Acidosis of Ruminants 2007).



Graphique 12 : Conséquences des variations de pH sur les flores microbiennes actives et les fermentations associées (Kaufman, Hagemester, Durksen 1980)

Dans le cadre d'ARSA, qu'elle soit liée à un apport de glucides fermentescibles ou à la disparition des fibres longues, l'acidose est modérée et les valeurs de pH ne diminuent pas suffisamment pour qu'il y ait une accumulation d'acide lactique (Graphique 13). On parle d'ARSA lorsque le pH passe sous les seuils de 5,8 voire 5,6, cela est uniquement dû à l'accumulation d'AGV dans le rumen. Au contraire on parle d'acidose aiguë sous le seuil de 5,2 (Owens et al. 1998) ou 5,0 (Nagaraja, Lechtenberg 2007), lorsque l'acide lactique n'est plus suffisamment consommé et s'accumule.

La lipolyse et la biohydrogénation des lipides contenus dans le rumen sont elles aussi affectées lors d'ARSA. *Butyrivibrio fibrisolvens* est responsable de la première réaction d'isomérisation au cours de la biohydrogénation. Elle intervient également dans la lipolyse des phospholipides et galactolipides. Le pH optimal de son isomérase est proche de la neutralité, une diminution de pH inhibe ainsi fortement l'étape d'isomérisation et l'efficacité de la lipolyse (Cuvelier et al. 2005; Troegeler-Meynadier, Bret-Bennis, Enjalbert 2006). Dans une autre étude Rico et al 2015 ont observé une diminution de la population de *Butyrivibrio* et une augmentation de l'espèce *M. elsdenii* lors de l'induction d'une dépression en lait chez des vaches laitières suite à la distribution d'une ration fortement énergétique. Ces modifications microbiennes consécutives à un abaissement du pH ruminal sont à l'origine d'une diminution globale de la biohydrogénation (Doreau, Chilliard 1997; Glasser et al. 2008) et de la réalisation du shift *trans*10 (Bessa, Alves, Santos-Silva 2015). Il en résulte une modification du profil des AG contenus dans le gras de la viande des animaux.



Graphique 13 : Variations de la concentration en acides organiques totaux, AGV et acide lactique selon le pH ruminal lors d'acidose aiguë (A) ou d'acidose subaiguë (B) d'après Nagaraja et Lechtenberg 2007

En résumé des rations hyperénergétiques, riches en concentrés ou pauvres en fibres longues, sont souvent utilisées dans les systèmes de finition intensifs comme l'engraissement des agneaux de Roquefort. De telles rations conduisent en effet à la production de C3 maximisant la croissance. Cependant la grande quantité d'AGV produits est responsable d'une diminution marquée du pH ruminal à l'origine de la mise en place d'une ARSA. Des systèmes tampons, la salivation et l'absorption des AGV, existent mais sont parfois insuffisants. Les conséquences sont diverses : parakératose et ruminite qui peuvent entraîner une inflammation systémique, modification de microbiote ruminal à l'origine d'une perturbation des fermentations glucidiques et du métabolisme lipidique qui ont lieu dans le rumen. Le profil lipidique de la viande est alors affecté et s'éloigne des recommandations nutritionnelles émises par l'ANSES. Les conséquences de la diminution du pH ruminal peuvent cependant être plus graves et aller jusqu'à altérer la productivité et la santé des animaux. On ne parle plus d'état sub-clinique d'acidose mais d'acidose clinique.

B. L'acidose clinique

L'ARSA est à l'origine de perturbations du milieu ruminal, que ce soit au niveau de sa structure ou de son contenu. Les modifications fermentaires engendrées et l'atteinte de la muqueuse peuvent avoir des conséquences qui s'expriment sur le plan clinique mais qui sont parfois difficiles à percevoir.

1. Méthodes de détection des animaux en subacidose

Les manifestations cliniques ne sont pas toujours visibles, et lorsqu'elles le sont, elles ne sont généralement que peu marquées et frustes. La détection des animaux souffrant d'ARSA est alors relativement difficile. Le moyen le plus sûr est le suivi du pH ruminal. Le prélèvement par ruminocentèse constitue la méthode communément admise comme la méthode de choix pour le diagnostic d'ARSA. Il s'agit cependant d'une mesure invasive et surtout unique. Le pH ruminal fluctue beaucoup sur une journée, une seule mesure n'est pas représentative (Dragomir et al. 2008). L'idéal serait de mesurer en continu le pH ruminal des animaux par exemple avec des sondes de pH intra-ruminales ou des bolus ruminiaux (Marguet 2015). Le premier dispositif utilise des sondes extrêmement onéreuse (1000€ la sonde et 200€ de remplacement d'électrodes) et nécessite des animaux canulés si on veut pouvoir récupérer les sondes avant l'abattage. Il n'est donc pas utilisable sur le terrain et est réservé au cadre expérimental. Le second est également très lourd en investissement (achat du bolus et du logiciel adapté). L'engraissement des agneaux est une activité qui ne dégage que peu de marges, de tels dispositifs ne sont pas adaptés. Il est donc nécessaire de se baser sur la surveillance d'éventuelles manifestations cliniques d'acidose pour déclencher la sonnette d'alarme.

Deux éléments majeurs évoqués précédemment peuvent être à l'origine de manifestations cliniques : les modifications fermentaires dans le rumen et la mise en place d'une inflammation de la paroi ruminale qui peut devenir systémique.

2. Manifestations cliniques liées aux modifications fermentaires

L'un des premiers signes qui peut être observé lors d'ARSA est une diminution de la MSI (Gozho et al. 2005b; Khafipour, Krause, Plaizier 2009). Khafipour, Krause, Plaizier 2009 ont notamment constaté que l'induction d'une ARSA chez huit vaches Prim'Holstein en modifiant le ratio F:C de la RTM de 50:50 à 40:60 entraînait une dépression de la MSI de 15%. La forte concentration ruminale en propionate suite à l'ingestion de concentrés peut expliquer cette baisse d'appétit. Lorsque le flux de C3 entre le rumen et le foie est important, une partie de celui-ci subit une oxydation hépatique à l'origine d'une stimulation de l'oxydation de

l'acétylCoA. Cette oxydation modifierait les signaux envoyés du foie au cerveau via les afférences du système vagal et diminuerait la sensation de faim (Allen, Bradford, Oba 2009). Par ailleurs l'hyperosmolarité ruminale causée par de telles rations activerait les récepteurs localisés sur l'épithélium ruminal et favoriserait la sensation de satiété (Allen 2000).

Une perte d'état corporel peut également être observée malgré la distribution d'une ration couvrant l'ensemble des besoins.

Les changements fermentaires sont parfois à l'origine d'une modification des fèces qui peuvent prendre une couleur plus claire, une odeur plus acide et contenir quelques grains non digérés (the Reference Advisory Group on Fermentative Acidosis of Ruminants 2007). Des fibres peuvent également se retrouver dans les bouses en raison d'une mauvaise activité de la flore cellulolytique (Lessire, Rollin 2013).

Chez les ruminants producteurs de lait, une manifestation clinique facilement observable et constituant un des premiers signaux d'alerte est la chute de production laitière accompagnée d'une diminution du taux butyreux du lait (Khafipour, Krause, Plaizier 2009). Cela ne concerne pas les agneaux de Roquefort à l'engraissement.

3. Manifestations cliniques liées à l'inflammation de la paroi ruminale

Lors d'ARSA la muqueuse ruminale est fortement altérée et une inflammation se met en place à son niveau. La barrière protectrice séparant le rumen du reste de l'organisme n'est plus intègre. Les manifestations cliniques ne sont plus alors forcément liées au rumen et à son fonctionnement mais peuvent concerner l'ensemble de l'organisme.

La parakératose et la ruminite ne permettent pas seulement une translocation du LPS mais favorisent également le passage de certaines bactéries ruminales vers le compartiment sanguin. *Fusobacterium necrophorum* et *Trueperella pyogenes* peuvent ainsi rejoindre la circulation générale et être à l'origine d'abcès métastatiques dans le foie, les reins ou les poumons (Nocek 1997; Plaizier et al. 2017; Owens et al. 1998).

Des difficultés de déplacement avec des boiteries peuvent aussi se manifester. La mise en place d'une fourbure serait provoquée par l'inflammation du derme podal suite à la libération d'histamine par *Allisonella histaminiformans* (Minuti et al. 2014; Nocek 1997; Garner, Gronquist, Russell 2004).

L'inflammation systémique pourrait aussi favoriser l'apparition de maladies systémiques telles que des mammites, métrites ou troubles de la reproduction. Le lien avec l'ARSA n'est dans ce cas-là pas facilement établi, d'autant plus si seulement peu d'animaux sont touchés.

Ainsi les animaux souffrant d'ARSA peuvent présenter des manifestations cliniques. Celles-ci ne sont malheureusement que peu spécifiques, souvent frustrées et peuvent ne toucher qu'un nombre limité d'animaux. Elles sont cependant importantes à observer et à mettre en évidence afin de détecter la présence d'ARSA dans un élevage et pouvoir y remédier. La détection des animaux souffrant d'ARSA par analyse du pH ruminal est illusoire sur le terrain.

En conclusion l'utilisation de rations riches en concentrés ou la diminution de la quantité de fibres longues dans la ration des animaux à l'engraissement sont des risques de mise en place d'une acidose ruminale. Cette acidose peut être sub-clinique et ne concerner que la muqueuse ruminale, l'écosystème microbien et les fermentations associées. Parfois cependant les conséquences peuvent être plus graves et affecter la productivité et la santé des animaux. Les signes cliniques sont difficiles à percevoir, il faut cependant y être vigilant car ils traduisent d'importantes perturbations digestives au sein des animaux.

Chez les agneaux à l'engraissement qui reçoivent des rations riches en concentrés, il a été décidé dans le cadre d'un projet de retirer la paille sous forme de fibres longues et de distribuer des granulés de paille broyée en remplacement. L'objectif d'un tel changement est de réduire les lésions de buissonné-pailleux sur la peau des agneaux afin d'obtenir une meilleure valorisation du cuir. Avec ces rations acidogènes combinées à l'absence de fibres longues il est cependant nécessaire de s'assurer que les agneaux ne présentent pas une acidose ruminale plus sévère que dans le cas de l'utilisation de rations comportant des fibres longues. Les conséquences évoquées précédemment pourraient fortement impacter les résultats économiques de l'engraissement. C'est dans cet esprit que se positionne l'étude expérimentale présentée dans la deuxième partie de cette thèse et qui s'inscrit dans le cadre du projet Peau'Lux. L'objectif de ce projet est de valoriser les peaux d'agneau Lacaune afin de les utiliser dans l'industrie de luxe et cela passe par le retrait des fibres longues de paille de la ration des agneaux. Nous nous sommes intéressés aux conséquences digestives d'une telle modification.

Seconde partie : étude expérimentale

Etude expérimentale des effets de rations sans fibres longues chez des agneaux de Roquefort à l'engraissement

L'engraissement des agneaux Lacaune du bassin de Roquefort a pour principal objectif la commercialisation des carcasses. Les peaux peuvent toutefois être aussi valorisées. Récupérées et transformées en cuir dans les mégisseries, elles sont ensuite utilisées pour faire des articles de maroquinerie. Le cuir d'agneau Lacaune est un cuir de qualité, particulièrement recherché. Alors que dans les années 1980 il représentait 100% du marché du luxe français, ce cuir est aujourd'hui totalement délaissé au profit du cuir espagnol. La raison d'un tel abandon est la présence d'une quantité trop importante de défauts. Ces défauts ont plusieurs origines. L'élevage tout d'abord, avec une litière et une alimentation comportant de la paille, est source de lésions dans le cuir. Les techniques de dépouillement à l'abattoir et les cadences élevées sur la chaîne sont ensuite à l'origine de tensions sur les peaux qui favorisent l'apparition d'autres lésions. En Espagne les peaux sont de meilleure qualité. Cela peut s'expliquer par le temps de contact moins long de la paille avec les agneaux qui sont abattus à 25 kg, par une paille qui semble plus souple et des techniques industrielles d'abattage restées davantage traditionnelles. La valorisation du cuir d'agneaux Lacaune est ainsi un marché intéressant à reconquérir pour favoriser le savoir-faire français.

I. Présentation de l'étude

A. Projet Peau'Lux

L'étude à laquelle j'ai participé s'inscrit dans le projet Peau'Lux dont le principe général est de valoriser les peaux d'agneaux de Roquefort dans la filière de l'industrie française du luxe. Il s'agit d'un projet porté par la société d'engraissement Ovi Plateau Central et né d'une discussion entre cette société et l'abattoir Bigard avec lequel elle travaille et pour qui la valorisation du cuir présentait de l'intérêt. L'ensemble du projet a été monté et structuré par Agri Sud-Ouest Innovation, un pôle de compétitivité, qui s'est chargé de trouver des partenaires.

Ce projet a été mené sur quatre ans. Il s'articule autour des différentes phases au cours desquelles surviennent les défauts à l'origine d'une mauvaise valorisation des cuirs Lacaune.

- **Travail en amont au niveau de l'élevage** : l'objectif de ce travail est de modifier les litières sur lesquelles vivent les agneaux en retirant la paille et également modifier l'alimentation afin que la paille tombant des râteliers ne crée pas de lésions. La RAGT (Rouergue Auvergne Gévaudan Tarnais), fournisseur d'aliment, la société d'engraissement

Ovi Plateau Central ainsi que l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) et l'ENVT (Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse) sont les partenaires travaillant sur ce sujet. Tout l'intérêt, outre le changement de litière, est d'établir une ration sans paille sous forme de fibres longues permettant d'obtenir des performances zootechniques et une qualité de viande proches de celles classiquement obtenues pendant l'engraissement. La partie expérimentale réalisée dans le cadre de cette thèse s'inscrit dans ce travail de changement de ration.

- **Travail au niveau de l'abattage** : l'objectif est de concevoir un outil d'abattage qui respecte la peau au moment du dépouillement des carcasses et ne crée pas d'épépillures malgré les cadences imposées. L'ADIV (leader français en prestations de R&D, Audit, Conseil, Expertise et Formation auprès des industries carnées) qui travaille en partenariat avec Bigard et Innovtec industries ont été chargés de la réalisation de cet outil. Une autre amélioration a été envisagée, la détection des défauts sur les peaux en sortie d'abattage, avant que les premiers traitements ne soient réalisés. Le travail des partenaires précédents ainsi que de l'ENISE (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne) a alors été de développer un scanner présent sur la chaîne au moment de l'abattage. Il permettrait de détecter les problèmes et trier les peaux en fonction. Une peau Lacaune se vend 10-12 euros mais si elle est déclassée en raison de trop de défauts son prix tombe à 0-3€ (Lamy 2018).

- **Travail en aval en mégisserie** : ce travail cherche à créer un procédé de gommage des défauts sur les peaux travaillées afin de masquer les défauts existants et pouvoir tout de même utiliser ce cuir dans le haut de gamme malgré son exclusion du luxe. Deux laboratoires toulousains ont travaillé en partenariat avec la Mégisserie Richard et ont été mis à contribution pour cela : CRITT Catar et LCA-UMR 1010 INRA/ENSIACET.

Même si le projet est porté par les producteurs d'Ovi Plateau Central, la problématique ne concerne pas directement les engraisseurs mais bien les industries valorisant le cuir d'agneau. Il s'agit de remettre sur le devant de la scène l'importance de la filière française dans l'industrie de luxe. Chanel qui a racheté la mégisserie Richard en 2016 voit un intérêt majeur dans ce projet : en tant qu'industrie du luxe française, s'approvisionner avec des peaux françaises ne peut qu'améliorer l'image de la marque.

B. Essais alimentaires

La partie expérimentale réalisée dans le cadre de cette thèse concerne les essais de changements alimentaires associés aux changements de litière qui ont été réalisés dans la première phase du projet Peau'Lux. On ne s'intéressera pas au développement d'outils d'abattage, de scanner des peaux et de gommage des imperfections correspondant à d'autres phases du projet.

L'objectif du travail réalisé a été d'étudier s'il est possible d'obtenir, avec des rations sans fibres longues, les mêmes performances zootechniques, digestives et de qualité des carcasses que celles permises par l'engraissement classique. Pour cela ont été étudiées les conséquences de l'utilisation de rations sans fibres longues sur le GMQ des agneaux, leur profil ruminal en AG ainsi que leur microbiote ruminal.

II. Matériel et méthodes

A. Animaux, conditions de logement et rations distribuées

Les essais alimentaires ont été réalisés sur deux années consécutives, en 2017 et 2018. L'ensemble des agneaux utilisés était issu de différents élevages naisseurs du bassin de Roquefort qui travaillent en partenariat avec la société Ovi Plateau Central. Des lots homogènes de 220 agneaux ont été réalisés et placés dans les bergeries d'engraissement de la société Ovi Plateau Central. Pour chaque expérimentation (2017 et 2018), trois lots ont été utilisés : un lot témoin ainsi que deux lots d'essais (soit 660 agneaux chaque année).

La variation entre les lots a concerné à la fois la litière sur laquelle les agneaux sont restés pendant toute la durée de l'engraissement, la présentation du fourrage dans le râtelier et la composition de l'aliment finition distribué (Tableaux 17 et 18). Pendant la phase de démarrage tous les agneaux ont reçu le même aliment médicamenteux (présenté dans la première partie). La date de départ à l'abattoir a été choisie classiquement par palpation des trois points de repères.

La litière ainsi que l'aliment distribué aux lots témoins (lot témoin de 2017 et lot témoin de 2018) correspondent à ce qui se fait classiquement pour l'engraissement des agneaux, à savoir de la paille entière comme litière et comme fourrage, ainsi qu'un aliment finition du commerce (composition présentée dans la première partie).

Pour les agneaux des essais 1 et 2 de 2017 et des essais 3 et 4 de 2018, de la litière végétale absorbante sous forme de granulés a remplacé les fibres de paille au sol. La distribution de paille sous forme de fibres longues dans les râteliers a également été abandonnée au profit de granulés de paille broyée. Des modifications de composition de l'aliment finition distribué à ces quatre lots ont été réalisées afin de limiter le phénomène d'acidose ruminale liée à la disparition des fibres longues. Quatre aliments finition différents ont ainsi été testés.

Pour les deux essais de 2017, les modifications de composition de l'aliment finition par rapport à celui du lot témoin ont été une augmentation du taux de cellulose brute et de bicarbonates, une diminution de celui d'amidon ainsi que l'introduction de levures (Tableau

17). Des levures *Saccharomyces cerevisiae* ont été ajoutées car celles-ci favoriseraient l'activité des bactéries fibrolytiques et des bactéries consommant l'acide lactique et au contraire inhiberaient celles produisant l'acide lactique. Elles seraient alors à l'origine d'une remontée du pH ruminal prévenant la survenue d'acidose ruminale (Chaucheyras-Durand, Fonty 2001). Les bicarbonates ont été ajoutés car comme nous l'avons vu ils constituent un système tampon important dans la lutte contre la chute du pH ruminal. Par rapport à l'essai 1, la ration de l'essai 2 présentait la même concentration en levures vivantes mais comportait en supplément des parois de levure et une quantité de bicarbonates supérieure.

Dans l'essai de 2018 la composition de l'aliment finition est restée identique à celle de l'année précédente pour le lot témoin, celle des lots de l'essai 3 et 4 a été modifiée : par rapport aux aliments distribués dans les essais de 2017, le taux de cellulose brute a été diminué mais est resté supérieur à celui du lot témoin (Tableau 18, 10% MB pour les essais 3 et 4 et 8% MB pour le lot témoin) et le taux d'amidon a été augmenté pour se retrouver proche de celui du lot témoin (35% MB pour l'essai 3, 34% MB pour l'essai 4 et 36% MB pour le lot témoin). Ces deux modifications ont été réalisées dans le but d'améliorer l'IC des agneaux. L'usage des parois de levure a été abandonné et seules des levures vivantes ont été utilisées pour les essais 3 et 4. D'autres modifications de ration ont été effectuées d'après les observations des conséquences zootechniques des trois rations de 2017. Ainsi le taux de bicarbonate a été similaire dans les trois lots (0,5% MB) mais diminué par rapport à l'année précédente tout comme le taux de sel car ces deux éléments augmentaient l'abreuvement et par conséquent l'émission d'urine des agneaux à l'origine de salissures importantes de la litière. De l'argile a été rajoutée dans la ration de l'essai 4 pour des raisons zootechniques, à savoir réduire le risque de diarrhée et ainsi améliorer l'état de la litière.

Au sein de chaque lot, l'ensemble des 220 agneaux a été engraisé de la même manière. Seuls certains d'entre eux ont cependant été utilisés pour la réalisation des analyses. En 2017, 12 agneaux de chaque lot (soit 36 agneaux en tout) ont été prélevés pour la réalisation des analyses développées ultérieurement. En 2018 ces analyses ont fait intervenir 38 agneaux du lot témoin, 40 agneaux de l'essai 1 et 40 agneaux de l'essai 2 (soit 118 agneaux). Les données relatives au rendement carcasse, à la mortalité des agneaux ainsi qu'au coût financier des divers investissements concernent l'ensemble des 220 agneaux de chaque lot.

Tableau 17 : Détail de la nature de la litière, de l'aliment dans le râtelier ainsi que de l'aliment finition pour les trois lots lors de l'essai de 2017

Expérimentation de 2017	Lot Témoin	Essai 1	Essai 2
Litière	Paille entière	Litière végétale absorbante	Litière végétale absorbante
Râtelier	Paille entière	Granulés de Paille	Granulés de Paille
Aliment finition (+20% orge)			
UF (/kg MB)	0,94	0,94	0,94
MAT (%MB)	16	16	16
CB (%MB)	8	15	15
Amidon (%MB)	36	24	23
Levures (%MB)		0,6	
Levures entières + parois (%MB)			0,35
Cap Energie (%MB)		0,3	0,3
Bicarbonates (%MB)	0,5	1	1,3
Sel (%MB)	0,3	0,4	0,4

Tableau 18 : Détail de la nature de la litière, de l'aliment dans le râtelier ainsi que de l'aliment finition pour les trois lots lors de l'essai de 2018

Expérimentation de 2018	Lot Témoin	Essai 3	Essai 4
Litière	Paille entière	Litière végétale absorbante	Litière végétale absorbante
Râtelier	Paille entière	Granulés de Paille	Granulés de Paille
Aliment finition (+20% orge)			
UF (/kg MB)	0,94	0,94	0,92
MAT (%MB)	16	16	15,7
CB (%MB)	8	10	10
Amidon (%MB)	36	35	34
Levures (%MB)		0,6	0,6
Argile bentonite (%MB)			2
Cap Energie (%MB)		0,3	0,3
Bicarbonates (%MB)	0,5	0,5	0,5
Sel (%MB)	0,3	0,3	0,4

B. Evaluation du GMQ

Le gain de poids de chaque agneau au cours de la période d'engraissement a été calculé à partir de trois pesées : une au début de l'engraissement lors de l'arrivée des agneaux (Poids1), une au changement d'alimentation (Poids2) et une dernière avant le départ à l'abattoir (Poids3). La division de ce gain par le nombre de jours d'engraissement a permis de définir le GMQ des agneaux pendant cette période. GMQ2 désigne le GMQ pendant la phase de démarrage et GMQ3 celui pendant la finition. La moyenne des deux a permis de calculer le GMQ des agneaux pendant toute la durée de l'engraissement.

La dernière pesée (Poids3) a été réalisée le jour de la réalisation des prélèvements de rumen en 2017 et trois jours auparavant en 2018.

C. Evaluation de la concentration en AGV dans le rumen

Les prélèvements de contenus ruminiaux ont été réalisés à l'aide d'une pompe à vide à piston WOB-L® de modèle 2522C-02 (230V /50Hz). Le jus de rumen a dans un premier temps été déprotéinisé, dilué puis le dosage des AGV a été effectué sur chaque échantillon par chromatographie en phase gazeuse munie d'un détecteur à ionisation de flamme, selon une méthode de dosage par étalon interne (Annexe 1).

D. Evaluation du profil en AG longs du rumen

Une extraction méthylation *in situ* du jus de rumen obtenu comme précédemment a dans un premier temps été réalisée puis a été suivie par un dosage des AG longs par chromatographie en phase gazeuse selon la méthode de Jenkins 2010 (Annexe 2). On désigne par AG longs les AG comportant plus de 6 atomes de carbone.

E. Extraction de l'ADN bactérien et analyse du microbiote

L'extraction du microbiote des échantillons de jus de rumen obtenus de la même manière que précédemment a été réalisée grâce au Quick-DNA™ Fecal/Soil Microbe 96 Kit (Annexe 3). Un séquençage MiSeq et enfin une PCR ont ensuite permis de séparer les fragments d'ADN extraits précédemment. L'analyse a été réalisée par le pipeline FROGS qui a procédé à un nettoyage des séquences et un rassemblement de celles identiques à deux-trois paires de bases d'erreur près. Il a ensuite enlevé les faux positifs au moyen de filtres puis réalisé l'affiliation de la séquence identifiée à un taxon bactérien connu de la base Silva 132 (Escudé et al. 2018).

F. Analyse des données

Pour chacune des deux années l'effet du lot sur le GMQ pendant l'engraissement a été étudié grâce à une analyse de variance (ANOVA) à un facteur dans le programme RStudio. Le seuil de 5% a été retenu comme seuil de significativité.

Pour les AGV et AG longs dosés, la quantité totale ainsi que le pourcentage individuel ont été calculés. Des ANOVA à un facteur ont ensuite été réalisées de manière indépendante pour étudier s'il y avait un effet significatif du lot sur ces mesures au sein d'une même année. Lorsque l'ANOVA donnait une p-value < 0,05, une analyse par paire a été effectuée au moyen du test de Tukey. Une Analyse en composantes principales sparse (sPCA) a également été réalisée pour caractériser les individus selon leur profil en AG ruminiaux.

L'analyse des espèces bactériennes constituant le microbiote ruminal a nécessité le package mixOmics de R. La diversité alpha qui correspond à la diversité au sein de chaque échantillon a été étudiée au moyen de l'index Chao1, de l'indice de Shannon et de l'inverse de Simpson. Des box-plot représentatifs des valeurs de ces indices pour chaque lot ainsi que des ANOVA pour tester l'effet lot sur ces index ont été réalisés. La bêta-diversité du microbiote, c'est-à-dire la comparaison de la diversité entre les différents échantillons, a également été étudiée au moyen d'une sPCA ainsi que d'un Positionnement multidimensionnel non-métrique (nMDS).

Les corrélations entre le GMQ des animaux, leur teneur en AGV et AG longs ainsi que la composition de leur microbiote ont été analysées au moyen de Partial Least Squares regressions (sPLS). Le degré de corrélation mis en évidence sur les graphiques a ensuite été précisé par le calcul du coefficient de corrélation de Pearson.

Pour la comparaison de certains paramètres entre 2017 et 2018, l'effet de l'année a été testé sur les deux lots témoins grâce à la réalisation d'une ANOVA à un facteur. La comparaison des essais de 2017 avec ceux de 2018 n'a pas été réalisée dans le cadre de cette thèse.

G. Scanner d'agneaux

30 agneaux appartenant à la première phase d'expérimentations (10 du lot témoin, 10 de l'essai 1 et 10 de l'essai 2 de 2017) ont été anesthésiés (diazépam et kétamine) et ont subi un examen scanner abdominal à l'ENVT. Les images obtenues ont ensuite été analysées au moyen du logiciel d'imagerie Horos®. Trois compartiments ont été étudiés : le réseau, le rumen (avec distinction de l'atrium) et le feuillet. Pour chaque agneau, chaque compartiment a été délimité manuellement sur chaque coupe de scanner comme l'illustre la figure 18. La superposition des délimitations a permis d'obtenir un graphique représentatif du volume du compartiment avec la valeur de celui-ci (figure 19). L'objectif a été de comparer le volume des

compartiments des agneaux du lot témoin avec ceux des essais 1 et 2. Cela a également permis de détecter la présence d'éventuelles anomalies « majeures » (de position, de forme...) de ces compartiments.

Au moment de la rédaction de cette thèse les coupes de scanner des agneaux étaient toujours en cours d'étude et le résultat des analyses n'était pas encore connu. La publication de ces résultats fera l'objet de deux nouvelles thèses vétérinaires.

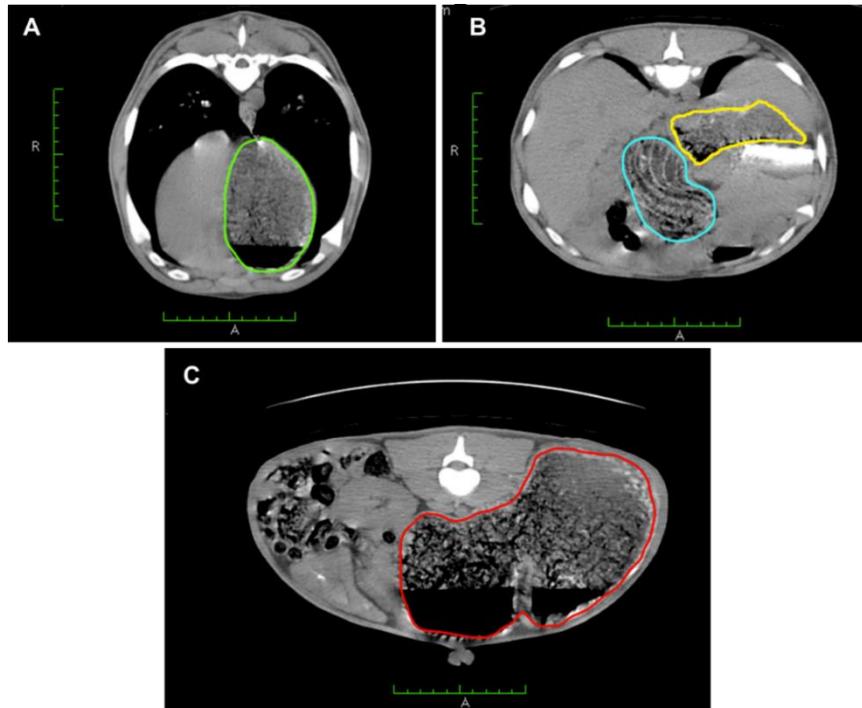


Figure 18 : Exemple de délimitation des différents compartiments digestifs sur trois coupes de scanner d'un agneau à l'aide du logiciel Horos®. A) Réseau B) Feuillet (bleu) et atrium du rumen (jaune) C) Rumen

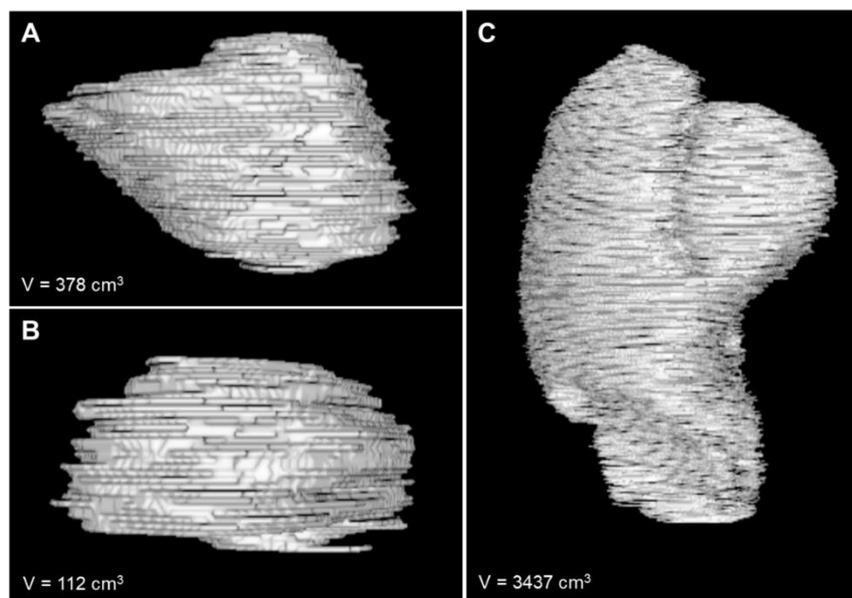


Figure 19 : Représentation graphique du volume de chaque compartiment par superposition des délimitations réalisées sur chaque coupe. A) Réseau B) Feuillet C) Rumen

III. Résultats

A. Expérimentation conduite en 2017

1. GMQ des agneaux

Le changement de régime alimentaire n'a pas modifié de manière significative le GMQ des agneaux (Tableau 19) qui est de 357 g/j en moyenne. Si on s'intéresse à l'ensemble des agneaux élevés dans les conditions du lot témoin et des essais 1 et 2 (220 agneaux par lot), le GMQ des agneaux des essais 1 (339 g/j) et 2 (331 g/j) est inférieur au GMQ du lot témoin (349 g/j). Cette différence peut sembler faible d'un point de vue statistique. Elle représente cependant une perte financière non négligeable dans le cadre des essais 1 et 2.

Tableau 19 : GMQ des agneaux au sein des différents lots en 2017

	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	p-value
GMQ (g/j)	362 ± 41	353 ± 45	357 ± 51	0,88

2. Teneur en AGV et AG longs du rumen

La quantité totale d'AGV dans le rumen ainsi que le pourcentage en C2, C3 et C4 sont identiques quel que soit le régime alimentaire des agneaux (Tableau 20). Les agneaux des essais 1 et 2 présentent un pourcentage d'isoC4 et isoC5 diminué par rapport aux agneaux du lot témoin. Dans l'essai 2 le pourcentage de C5 est diminué par rapport à celui de l'essai 1. Pour l'ensemble des lots le rapport C2/C3 est extrêmement bas (habituellement de 3,5-4,5), aucune différence significative n'est mise en évidence entre les lots ($p = 0,52$).

Tableau 20 : Quantité totale en AGV et pourcentage des différents AGV dans le jus de rumen selon les différents essais en 2017.

	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	p-value
quantité totale AGV (mmol/L)	69,0 ± 21,9	88,7 ± 19,4	80,0 ± 34,6	0,19
C2 (%)	51,5 ± 1,6	54,2 ± 2,6	53,5 ± 6,3	0,20
C3 (%)	38,8 ± 1,8	36,5 ± 2,2	39,0 ± 7,2	0,30
isoC4 (%)	0,8 ^a ± 0,2	0,5 ^b ± 0,1	0,4 ^b ± 0,2	< 0,01
C4 (%)	6,0 ± 0,8	5,9 ± 1,0	5,3 ± 2,1	0,34
isoC5 (%)	0,8 ^a ± 0,3	0,5 ^b ± 0,1	0,4 ^b ± 0,1	< 0,01
C5 (%)	2,2 ^{ab} ± 0,6	2,3 ^a ± 0,7	1,5 ^b ± 0,5	0,01
C2/C3	1,3 ± 0,1	1,5 ± 0,2	1,5 ± 0,7	0,52

Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif ($p < 0,05$)

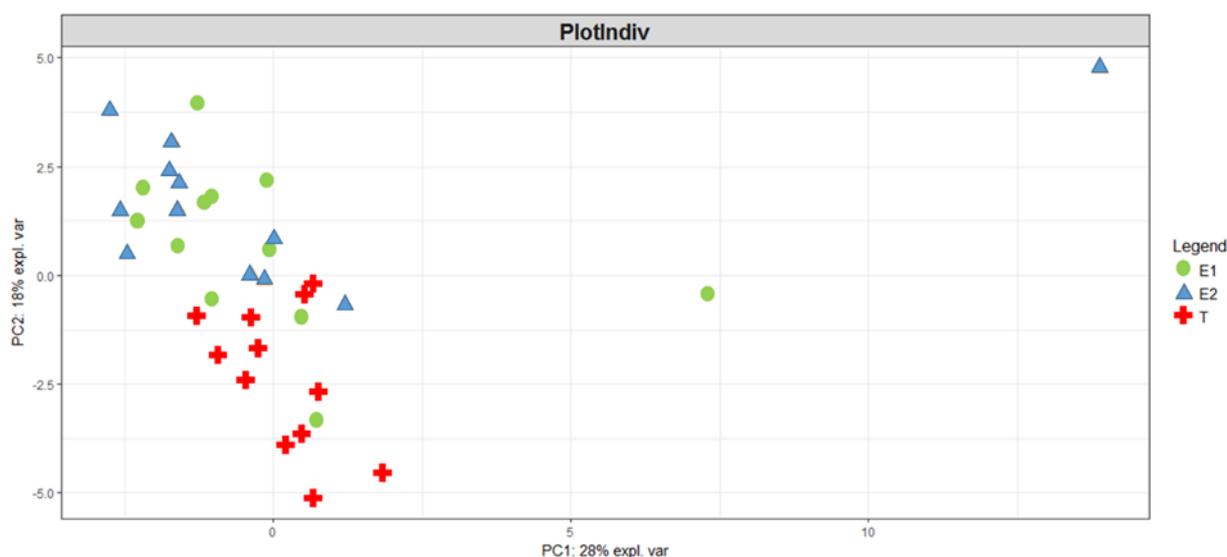
La quantité totale d'AG longs présents dans le jus de rumen des agneaux n'est pas non plus influencée par la taille des fibres de la ration (Tableau 21).

Tableau 21 : Quantité totale en AG, pourcentage individuel des différents AG et rapport t10/t11 dans le rumen selon les différents essais en 2017

	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	p-value
<i>Quantité d'AG (mg/g MS)</i>				
Quantité totale	55,35 ± 10,35	52,76 ± 8,57	52,14 ± 8,30	0,66
<i>Pourcentage d'AG</i>				
C13:0	0,30 ^a ± 0,06	0,24 ^b ± 0,05	0,20 ^b ± 0,04	< 0,001
C14:0	2,91 ^a ± 0,55	2,33 ^b ± 0,59	2,07 ^b ± 0,38	0,01
C14:0i	0,23 ± 0,05	0,23 ± 0,08	0,21 ± 0,15	0,75
C15:0	0,90 ± 0,12	0,79 ± 0,35	0,82 ± 0,34	0,61
C15:0ai	1,38 ^a ± 0,18	1,07 ^b ± 0,25	1,01 ^b ± 0,28	< 0,001
C15:0i	0,02 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,05 ± 0,10	0,59
C16:0	15,92 ^a ± 0,71	14,78 ^b ± 1,04	16,45 ^a ± 0,96	< 0,01
C16:1	0,28 ± 0,09	0,23 ± 0,08	0,24 ± 0,08	0,24
C17:0	0,63 ± 0,06	0,56 ± 0,13	0,54 ± 0,07	0,06
C17:0ai	0,16 ^a ± 0,04	0,088 ^b ± 0,06	0,12 ^{ab} ± 0,10	0,05
C17:0i	0,14 ± 0,04	0,08 ± 0,06	0,10 ± 0,11	0,10
C18:0	18,92 ± 7,04	21,28 ± 9,41	21,42 ± 12,96	0,78
C18:1c9	5,59 ± 0,67	6,58 ± 1,26	6,17 ± 1,32	0,10
C18:1c11_C18:1t15	2,94 ^a ± 0,30	2,29 ^b ± 0,39	2,08 ^b ± 0,54	< 0,001
C18:1c12	0,24 ± 0,07	0,26 ± 0,08	0,23 ± 0,07	0,64
C18:1c15	0,26 ^a ± 0,08	0,24 ^{ab} ± 0,06	0,18 ^b ± 0,06	0,02
C18:1t4	0,07 ^a ± 0,02	0,05 ^{ab} ± 0,03	0,05 ^b ± 0,02	0,04
C18:1t5	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,59
C18:1t6t7t8	0,74 ± 0,18	0,70 ± 0,16	0,66 ± 0,19	0,68
C18:1t9	0,30 ± 0,08	0,29 ± 0,07	0,27 ± 0,08	0,78
C18:1t10	25,78 ± 7,02	21,89 ± 8,13	22,05 ± 11,19	0,47
C18:1t11	0,97 ± 0,85	1,28 ± 1,25	1,90 ± 1,30	0,18
C18:1t12	0,81 ± 0,14	0,78 ± 0,19	0,71 ± 0,22	0,43
C18:1t16	0,19 ± 0,13	0,25 ± 0,12	0,27 ± 0,12	0,24
C18:2	8,07 ^d ± 2,49	11,16 ^c ± 3,66	11,35 ^c ± 3,88	0,04
C18:2t10c12	0,02 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,11
C18:2c9t11	0,02 ± 0,03	0,04 ± 0,04	0,03 ± 0,04	0,46
C18:2t9t11	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,42
C18:2t11c15	0,28 ± 0,11	0,30 ± 0,12	0,25 ± 0,13	0,66
C18:3	1,04 ^b ± 0,31	1,60 ^a ± 0,56	1,28 ^{ab} ± 0,46	0,02
<i>Rapport</i>				
t10/t11	46,27 ± 40,82	28,98 ± 22,26	24,19 ± 23,20	0,18

Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif (a et b : p < 0,05 ; c et d : p < 0,1)

La sPCA réalisée à partir des dosages en AGV et AG longs des jus de rumen prélevés a permis de discriminer les agneaux selon deux composantes (Graphique 14). La composante 1 sur l'axe des abscisses explique 28% de la variabilité entre les individus. Cet axe discrimine peu les individus entre eux. Seuls deux agneaux se distinguent des autres, un agneau de l'essai 2 et un agneau de l'essai 1. Ainsi la composante 1 discrimine davantage les individus selon leur variabilité individuelle que selon de la variabilité liée au lot auquel ils appartiennent. La composante 2 explique 18% de la variabilité, celle-ci est liée à l'effet du lot. En effet les agneaux du lot témoin sont regroupés dans la partie inférieure gauche du plan, avec une ordonnée négative. Ils possèdent alors une plus grande quantité d'AG longs et AGV ayant une corrélation négative avec C2. Les agneaux des essais 1 et 2 ont pour la majorité d'entre eux des AGV et AG longs ayant une corrélation positive avec C2.

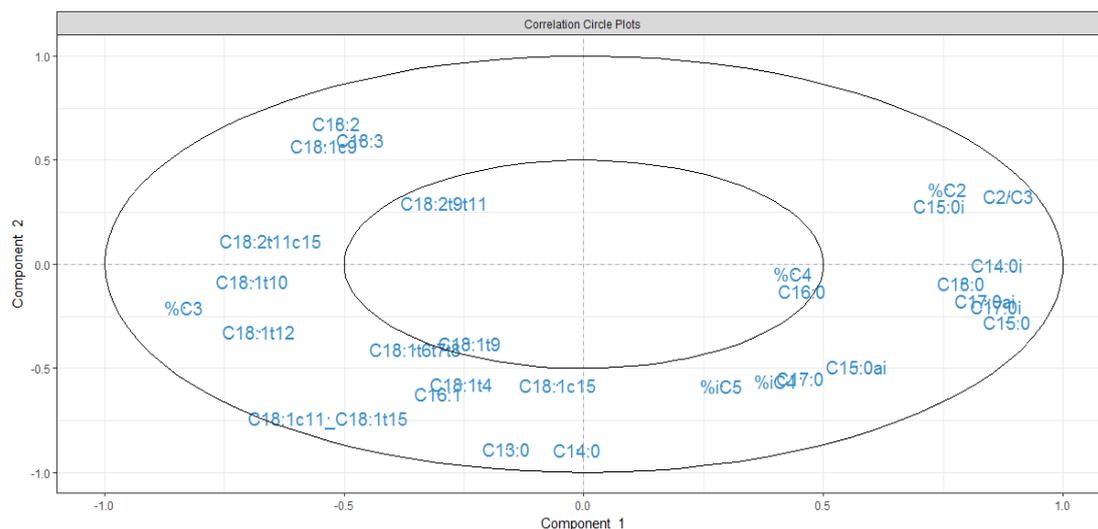


Graphique 14 : Projection des individus dans un plan selon la teneur en AGV et AG longs de leur rumen

Le cercle de corrélations dessiné sur le graphique 15 permet de visualiser les AGV et AG longs les plus discriminants et qui expliquent la constitution des composantes 1 et 2. La part d'intervention de chaque AGV et AG dans les deux composantes est montrée dans le tableau 22. Les p-values testant l'effet lot pour ces AG confirment les observations précédentes : la variabilité expliquée par la composante 2 est essentiellement liée à l'effet lot alors que ce n'est pas le cas pour la composante 1 qui a une grande part de sa variabilité expliquée par la variabilité individuelle (Tableau 22).

Nous nous sommes intéressés à la nature des AG à l'origine de la forte discrimination des deux individus isolés des autres sur le graphique 14. Ces deux agneaux étant discriminés selon la composante 1, nous avons regardé leur teneur en AG corrélés avec cette composante. L'agneau de l'essai 2 présente un ratio C2/C3 près de trois fois supérieur à celui

des autres agneaux. Le principal élément discriminant l'agneau de l'essai 1 des autres individus est son taux de C15:0 ruminal qui est doublé.



Graphique 15 : Cercle des corrélations des différents AGV et AG avec les deux composantes. Les AGV et AG dans la partie droite du cercle ont une forte corrélation positive avec la composante 1 alors que ceux de la partie gauche ont une forte corrélation négative avec cette composante. Les AGV et AG positionnés dans la partie la plus basse du cercle possèdent une forte corrélation négative avec la composante 2.

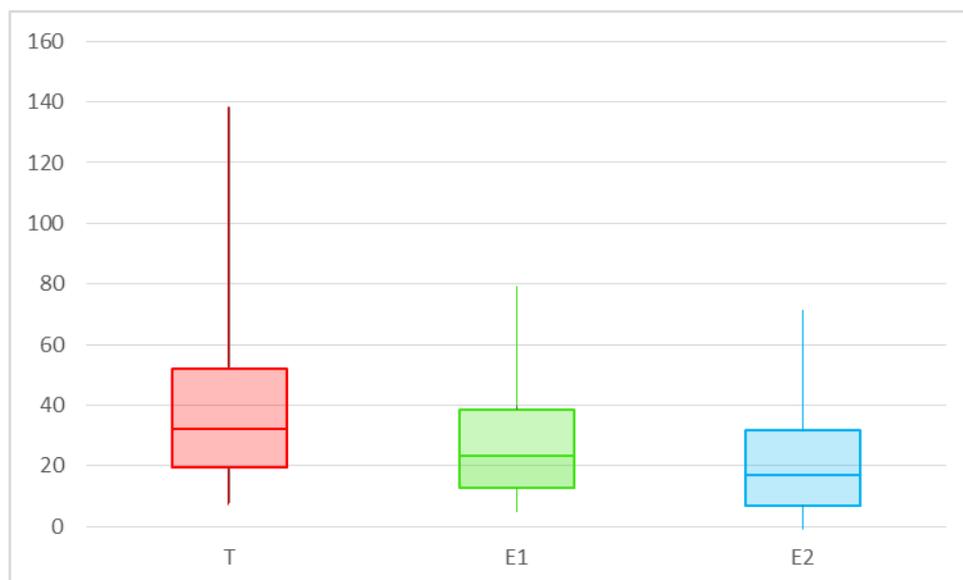
Tableau 22 : Corrélations majeures entre certains AG et AGV et les deux composantes et p-value de l'ANOVA testant l'effet lot sur chaque variable. Les AGV et AG présentés ont été choisis d'après le cercle de corrélations

	Corrélation ACP	p-value effet « lot »
<i>Composante 1</i>		
C2/C3	0,35	0,52
C15:0	0,34	0,61
C14:0i	0,33	0,75
C17:0ai	0,31	0,04
C18:0	0,27	0,78
C2	0,25	0,20
C3	- 0,31	0,30
C18:1t10	- 0,21	0,47
<i>Composante 2</i>		
C14:0	- 0,44	< 0,01
C13:0	- 0,44	< 0,001
C18:1c11_C18:1t15	- 0,33	< 0,001
C16:1	- 0,25	0,24
isoC5	- 0,22	< 0,01
C18:1t4	- 0,21	0,04
isoC4	- 0,20	< 0,01
C18:2	0,29	0,04
C18:3	0,23	0,02

Ces variations de composition en AGV et AG longs entre agneaux du lot témoin et agneaux de l'essai 1 et 2 se retrouvent dans les résultats des analyses ANOVA testant l'effet lot sur chaque AGV (Tableau 20) et AG long (Tableau 21).

Ainsi l'analyse conjointe de la sPCA et de l'ANOVA testant l'effet lot sur chaque paramètre permet de mettre en évidence des différences de pourcentage d'AGV et de profil d'AG longs entre les trois lots d'animaux. Les agneaux des essais 1 et 2 présentent, en plus de la diminution du pourcentage d'isoC4 et isoC5 déjà évoquée précédemment, une diminution significative par rapport au lot témoin de la teneur en C14:0, en C15:0ai, et en C18:1c11_C18:1t15. Leur jus de rumen a également tendance à comporter une quantité plus importante de C18:2ω6 que celui du lot témoin. Cette tendance se retrouve avec le C18:3ω3 pour les agneaux de l'essai 1. Ces agneaux se distinguent également du lot témoin par leur pourcentage en C16:0 qui est diminué. Même si les différences observées sont significatives, certaines semblent présenter une faible valeur biologique (notamment pour le C13:0).

Le ratio t10/t11 est très élevé que ce soit dans le lot témoin, l'essai 1 ou l'essai 2 (Tableau 21). Il ne présente pas de différence significative entre les lots ($p = 0,18$). La variabilité individuelle est cependant importante comme nous pouvons le voir sur le box-plot représentatif des valeurs du ratio pour chaque lot (Graphique 16). Un ratio maximal de 138,5 pour le lot témoin explique que la valeur moyenne du ratio pour ce lot soit supérieure à celle de l'essai 1 et de l'essai 2 même si la différence n'est pas significative.



Graphique 16 : Box-plots du ratio t10/t11 pour les trois lots de 2017

3. Microbiote ruminal

L'étude précise des clusters bactériens a permis d'identifier 84 gènes et 25 espèces bactériennes. Seulement 6,3% des OTU mis en évidence ont été affiliés en espèces ce qui est relativement faible.

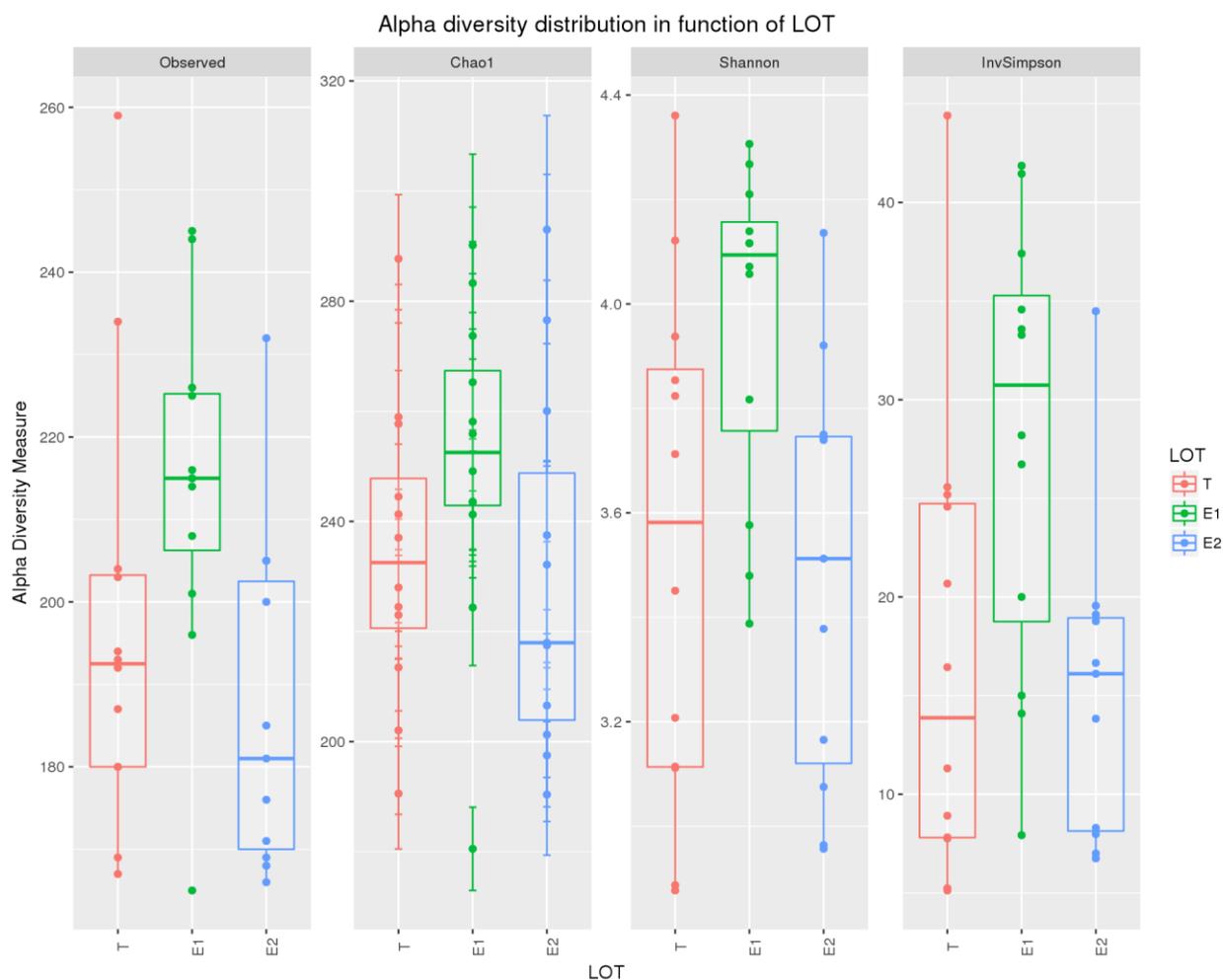
Un premier paramètre intéressant à étudier concernant les populations bactériennes ruminales est la richesse des différents échantillons ruminiaux, c'est-à-dire le nombre d'OTU par échantillon (Unité Taxonomique Opérationnelle). Sur le graphique 17 est illustré un premier box-plot nommé Observed qui correspond au box-plot des valeurs de richesse mesurées pour les échantillons des trois lots. Est également représenté l'estimateur Chao1 qui présente une estimation du nombre d'espèces réelles dans l'environnement ruminal à partir des échantillons analysés. La comparaison de ces box-plot qui sont plutôt similaires nous permet de conclure que les filtres utilisés par le pipeline FROGS sont corrects et ne modifient pas les conclusions émises par extrapolation des échantillons analysés. L'ANOVA testant l'effet lot sur le nombre d'OTU montre une richesse significativement plus importante dans l'essai 1 que dans l'essai 2 (Tableau 23).

Il est également intéressant d'étudier la diversité alpha correspondant à la diversité au sein du microbiote ruminal de chaque agneau. Cela est réalisé au moyen de deux estimateurs, l'indice de Shannon et l'indice de Simpson. Ces deux indices ont été calculés pour chaque échantillon prélevé et les résultats sont présentés sous forme de box-plot sur le graphique 16. L'indice de Shannon permet de représenter à la fois le nombre d'espèces et leur abondance relative. On constate que le box-plot correspondant à l'essai 1 présente une médiane bien supérieure et une dispersion moindre par rapport au lot témoin et à l'essai 2. L'indice de Shannon moyen pour les agneaux de l'essai 1 est significativement supérieur à celui des deux autres lots (Tableau 23). Les agneaux de l'essai 1 présenteraient un microbiote ruminal comportant un nombre d'espèces plus important et réparties de manière plus équitable que les deux autres lots. L'indice de Simpson correspond quant à lui à la probabilité que deux observations prises au hasard appartiennent à la même espèce. Sur le graphique 17 est représenté le box-plot regroupant les valeurs de l'inverse de Simpson. Plus la valeur est haute plus la diversité est importante. Là encore la diversité moyenne semble bien supérieure pour les agneaux de l'essai 1. Cela est confirmé par le résultat de l'ANOVA testant l'effet lot sur cet indice (Tableau 23). La dispersion des valeurs est également plus importante au sein des agneaux de l'essai 1 mais la valeur de diversité reste la plupart du temps supérieure à celle du lot témoin et encore plus à celle de l'essai 2.

Tableau 23 : Valeur moyenne des index de richesse et diversité alpha selon les lots de 2017

	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	p-value
Observed	197 ^{ab}	214 ^a	189 ^b	0,04
Shannon	3,5 ^b	4 ^a	3,5 ^b	0,02
Inverse de Simpson	17 ^b	28 ^a	16 ^b	0,02

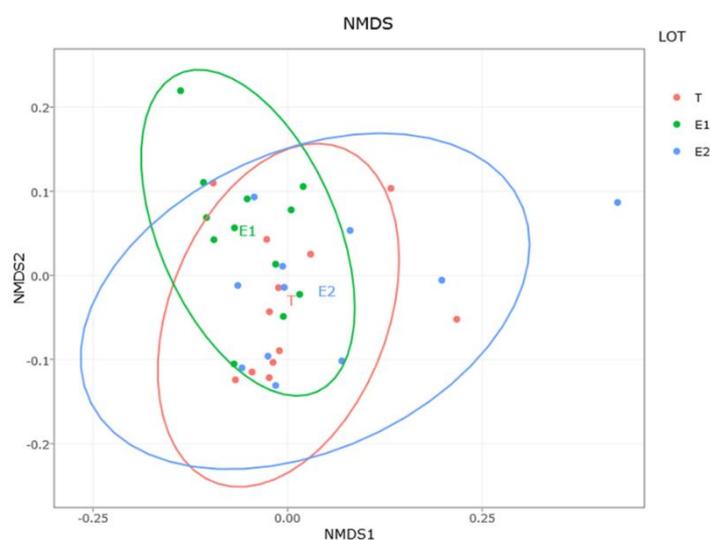
Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif ($p < 0,05$)



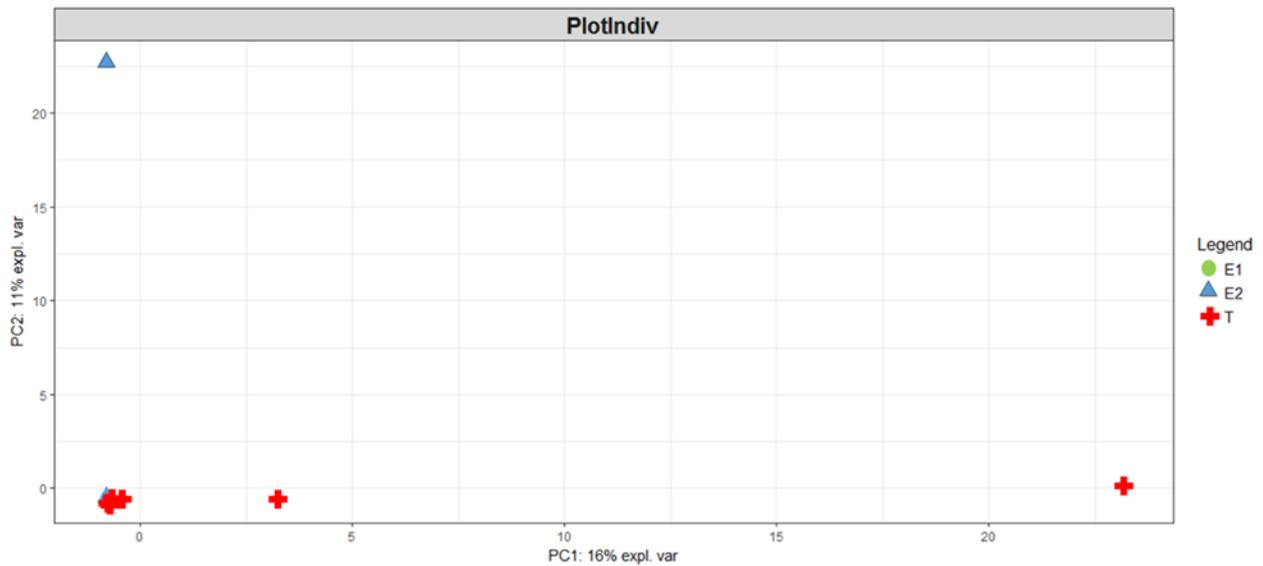
Graphique 17 : Box-plot des estimateurs de richesse et diversité alpha pour les agneaux du lot témoin, de l'essai 1 et de l'essai 2 en 2017

En conclusion le microbiote des agneaux de l'essai 1 présente une plus grande diversité d'espèces que le microbiote des agneaux du lot témoin et de l'essai 2. Le nombre d'espèces mises en évidence chez les agneaux de l'essai 1 est par ailleurs supérieur à celui de l'essai 2.

La β -diversité qui compare la diversité d'espèces bactériennes entre les agneaux a ensuite été étudiée. La réalisation d'une nMDS et sa représentation sur le graphique 18 révèlent une différence significative de diversité du microbiote des agneaux de l'essai 1 par rapport au lot témoin et à l'essai 2 ($p = 0,01$). Une sPCA a également été réalisée à partir des différents clusters bactériens mis en évidence dans les échantillons. Elle a permis de discriminer les individus selon deux composantes. L'ensemble des agneaux de l'étude est représenté selon ces deux composantes sur le graphique 19. On remarque tout d'abord que les composantes créées n'expliquent qu'une faible part de la variabilité entre les individus, seulement 16% de la variabilité est expliquée par la composante 1 et 11% par la composante 2. Par ailleurs on observe une très faible discrimination des agneaux selon ces deux composantes, seuls trois agneaux sortent du lot. Deux agneaux du lot témoin possèdent par rapport aux autres de nombreux clusters fortement corrélés positivement à la composante 1 et dont l'affiliation taxonomique est présentée sur le tableau 24. L'agneau positionné le plus à droite présente une abondance relative des clusters 79 et 64 largement supérieure à celle des autres agneaux. L'autre agneau du lot témoin isolé sur le graphique 19 présente également un microbiote plus riche que celui des autres individus en clusters 396, 79 et 64 mais dans une mesure moindre que l'agneau évoqué précédemment. Par ailleurs ces deux agneaux possèdent une richesse et une diversité d'espèces plus importantes que les autres agneaux de leur lot (nombre d'espèces observées et indice de Shannon supérieurs au troisième quartile). Un agneau de l'essai 2 se distingue lui aussi par sa richesse en clusters fortement corrélés à la composante 2, et notamment en clusters 173 et 116. Cet agneau correspond à l'agneau également isolé sur la représentation de la sPCA étudiant la composition lipidique du rumen et qui possédait un ratio C2/C3 bien supérieur à celui des autres individus.



Graphique 18 : Représentation des individus dont le microbiote est représenté par deux coordonnées, d'après une nMDS



Graphique 19 : Projection des individus dans un plan selon la composition de leur microbiote

Tableau 24 : Nomenclature des clusters bactériens constituant les composantes

	Cluster	Phylum	Classe	Genre	Espèce
Composante 1	Cluster _ 396	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Oribacterium</i>	Inconnue
	Cluster _ 79	Proteobacteria	<i>Gammaproteobacteria</i>	<i>Succinovibrio</i>	Inconnue
	Cluster _ 64	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae YAB2003</i>	Inconnue
	Cluster _ 153	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae YAB2003</i>	Inconnue
	Cluster _ 587	Firmicutes	<i>Erysipelotrichia</i>	<i>Kandleria</i>	<i>Kandleria vitulina</i>
	Cluster _ 650	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Inconnu</i>	Inconnue
	Cluster _ 501	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Inconnue
	Cluster _ 388	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Bactérie ruminale non identifiée RFN78
	Cluster _ 243	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae UCG-001</i>	Inconnue
	Cluster _ 179	Firmicutes	<i>Bacilli</i>	<i>Streptococcus</i>	<i>Streptococcus</i> sp.
Composante 2	Cluster _ 173	Tenericutes	<i>Mollicutes</i>	<i>Anaeroplasma</i>	Inconnue
	Cluster _ 324	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae UCG-001</i>	Inconnue
	Cluster _ 1061	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Inconnue
	Cluster _ 116	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Moryella</i>	Inconnue
	Cluster _ 73	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Rikenellaceae RC9</i>	Inconnue
	Cluster _ 162	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae UCG-003</i>	Inconnue
	Cluster _ 165	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Inconnue

La part de contribution des divers clusters dans chaque composante est présentée sur le tableau 25. L'ANOVA testant l'effet lot pour chaque cluster intervenant dans les composantes n'a montré aucun effet significatif (Tableau 24). La variabilité de microbiote entre les agneaux n'est pas due à l'effet lot mais à de la variabilité individuelle.

Tableau 25 : Part des principaux clusters intervenant dans les deux composantes discriminant les agneaux selon leur microbiote

	Corrélation ACP	p-value effet « lot »
<i>Composante 1</i>		
Cluster _ 396	0,31	0,30
Cluster _ 79	0,30	0,30
Cluster _ 64	0,30	0,27
Cluster _ 153	0,30	0,27
Cluster _ 587	0,28	0,30
Cluster _ 650	0,27	0,32
Cluster _ 501	0,26	0,32
Cluster _ 388	0,26	0,25
Cluster _ 243	0,26	0,27
Cluster _ 179	0,26	0,33
<i>Composante 2</i>		
Cluster _ 173	0,40	0,33
Cluster _ 324	0,38	0,33
Cluster _ 1061	0,35	0,34
Cluster _ 116	0,33	0,32
Cluster _ 73	0,31	0,31
Cluster _ 162	0,28	0,31
Cluster _ 165	0,23	0,32

L'étude de certaines populations bactériennes cellulolytiques identifiées (*Ruminococcus flavefaciens*, *Ruminococcus albus*, *Fibrobacter succinogenes*), amylolytiques (*Selenomonas ruminantium*, *Streptococcus sp.*) ou productrices d'acide lactique (*Lactobacillus sp.*) n'a pas révélé pas de modification significative de leur richesse selon les lots (Tableau 26, ensemble des p-values > 0,05).

Si on s'intéresse maintenant aux principaux phyla bactériens ruminiaux, le rapport Bacteroidetes/Firmicutes s'est retrouvé diminué de manière significative chez les agneaux de l'essai 1 par rapport à ceux du lot témoin et de l'essai 2 (Tableau 26).

Ainsi peu de différences de microbiote sont observées entre les agneaux des différents lots. Les seuls éléments notables sont une plus grande diversité et un rapport Bacteroidetes/Firmicutes inférieur chez les agneaux de l'essai 1 par rapport à ceux du lot témoin et de l'essai 2. La discrimination des agneaux entre eux par la composition du microbiote est bien moins importante que celle permise par la teneur en AGV et AG longs de leur rumen.

Tableau 26 : Moyenne des abondances relatives de certaines bactéries dont l'espèce a été identifiée dans les différents lots en 2017 et rapport moyen des deux principaux phyla

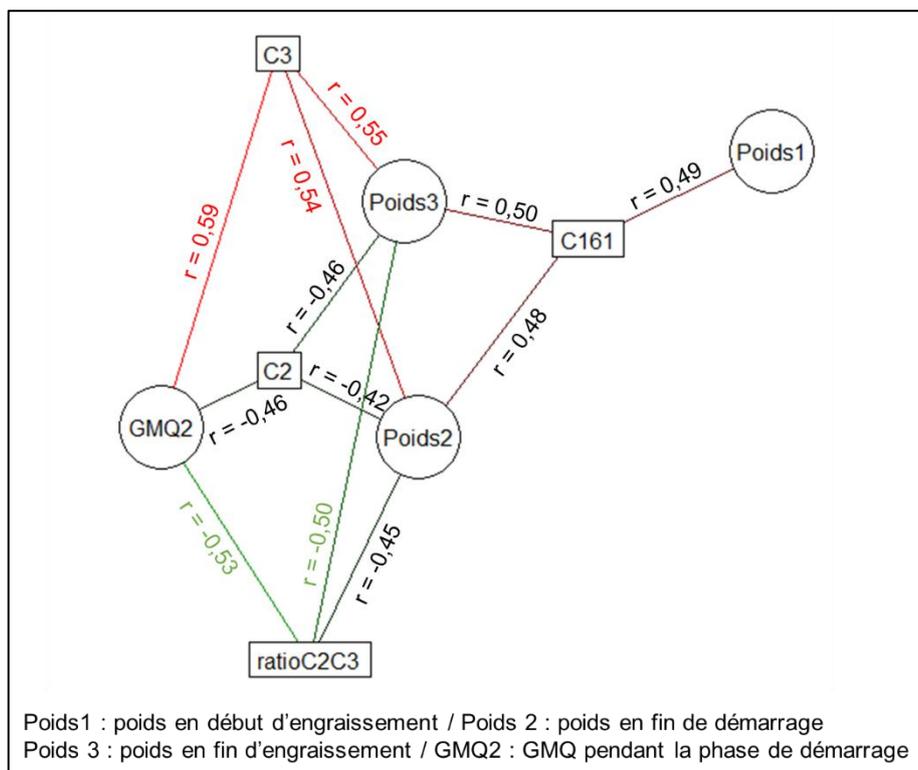
	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	p-value
<i>Abondance relative (%)</i>				
<i>Ruminococcus flavefaciens</i>	0,32	0,86	0,41	0,07
<i>Ruminococcus albus</i>	0,04	0,13	0,08	0,41
<i>Fibrobacter succinogenes</i>	0,25	0,00	0,01	0,30
<i>Selenomonas ruminantium</i>	0,01	0,03	0,03	0,15
<i>Streptococcus sp.</i>	0,03	0,00	0,00	0,19
<i>Lactobacillus sp.</i>	0,08	0,00	0,00	0,22
<i>Prevotella albensis</i>	0,05	0,01	0,01	0,38
<i>Rapport</i>				
Bacteroidetes/Firmicutes	1,2 ^a	0,7 ^b	1,4 ^a	0,01

Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif ($p < 0,05$)

Comme nous l'avons vu, la variabilité individuelle en termes de teneur en AG ruminiaux et de composition du microbiote est marquée. Il semble alors nécessaire de réaliser une approche globale sans tenir compte du lot auquel appartiennent les individus. Des sPLS ont été réalisées afin d'établir des liens entre le poids et le GMQ des animaux, la teneur de leur rumen en AG et la composition de leur microbiote ruminal.

4. Lien entre GMQ, teneur du rumen en AG et microbiote ruminal

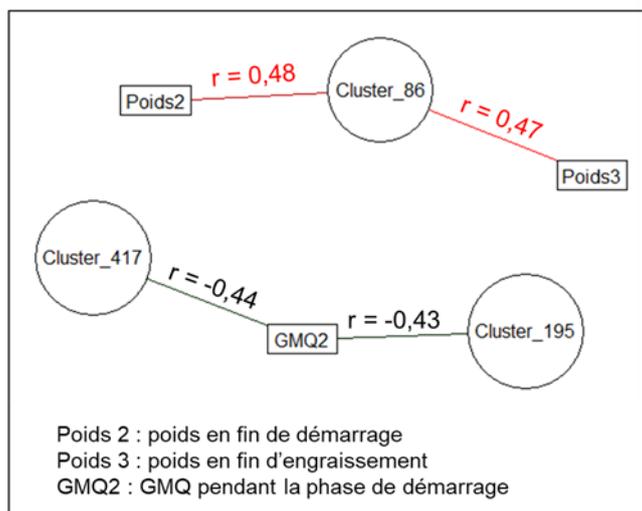
Le réseau reliant le poids et le GMQ des agneaux à différents moments de l'engraissement à la teneur en AGV et AG longs révèle de fortes corrélations positives représentées en rouge entre le pourcentage de C3 ruminal et le Poids2, le Poids3 et le GMQ2 (Graphique 20). Ainsi plus les agneaux ont un poids en fin de période de démarrage et en fin d'engraissement important, plus la concentration en C3 dans leur rumen est importante. La même relation existe avec le GMQ pendant la phase de démarrage. Il existe également des corrélations négatives entre le rapport C2/C3, le Poids3 et le GMQ2. Il est également intéressant de noter que le C16:1 présente des corrélations positives avec le poids des agneaux à différentes phases de l'engraissement : en début d'engraissement, au changement d'alimentation et en fin d'engraissement.



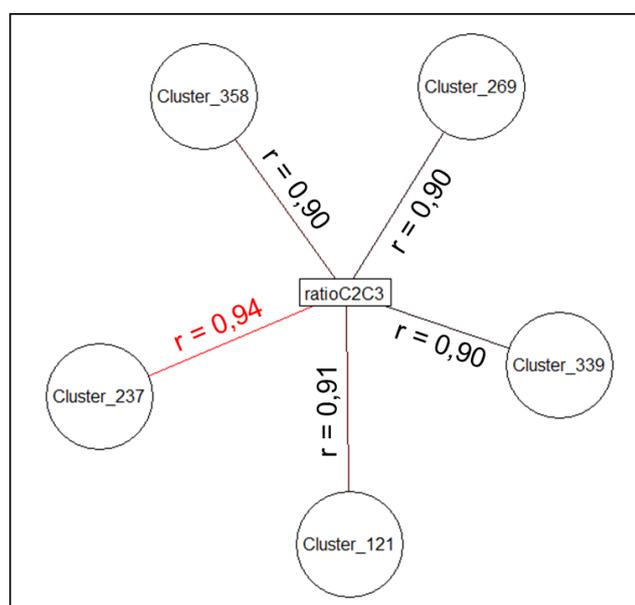
Graphique 20 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le poids et le GMQ des agneaux et la teneur en AGV et AG longs du rumen

Les corrélations entre le poids des agneaux, leur GMQ et la richesse de certains clusters bactériens sont moins fortes (Graphique 21). L'affiliation taxonomique des clusters impliqués dans les corrélations est présentée sur le tableau 27. Les corrélations majeures relient le poids des agneaux en fin de démarrage et en fin d'engraissement à une bactérie du genre *Prevotella 7* et le GMQ pendant la phase de démarrage à des bactéries des genres *Prevotellaceae UGC-003* et *Treponema*. Plus les poids en fin de démarrage et d'engraissement sont importants, plus le nombre d'OTU dans le rumen de bactéries du genre *Prevotella 7* est important. Plus le GMQ pendant la phase de démarrage est élevé, plus la richesse en bactéries des genres *Prevotellaceae UGC-003* et *Treponema* est diminuée.

Contrairement aux précédentes, les corrélations entre certains AGV ou AG longs et des clusters bactériens sont extrêmement fortes par rapport à celles évoquées précédemment (Graphique 22). La plus forte corrélation concerne le rapport C2/C3 et une bactérie du genre *Ruminococcaceae UCG-002*. Plus cette population bactérienne est importante, plus le rapport C2/C3 est augmenté. Des corrélations avec un coefficient proche de 0,90 ont également été établies avec des bactéries des genres *Christensenellaceae R-7*, *Prevotella 1*, ainsi que des bactéries de genre inconnu de l'ordre *Bacteroidales*.



Graphique 21 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le poids des agneaux et leur GMQ et la richesse des principaux clusters bactériens



Graphique 22 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre la teneur en AG du rumen et la richesse des principaux clusters bactériens

Tableau 27 : Affiliation taxonomique des clusters bactériens impliqués dans les sPLS

Cluster	Phylum	Classe	Genre	Espèce
Cluster_86	Bacteroidetes	Bacteroidia	Prevotella 7	Inconnue
Cluster_195	Bacteroidetes	Bacteroidia	Prevotellaceae UCG-003	Inconnue
Cluster_417	Spirochaetes	Spirochaetia	Treponema	Inconnue
Cluster_237	Firmicutes	Clostridia	Ruminococcaceae UCG-002	Inconnue
Cluster_358	Firmicutes	Clostridia	Christensenellaceae R-7 group	Inconnue
Cluster_269	Bacteroidetes	Bacteroidia	Inconnu	Inconnue
Cluster_339	Bacteroidetes	Bacteroidia	Prevotella 1	Inconnue

B. Expérimentation conduite en 2018

1. GMQ des agneaux

De la même manière que lors de l'expérimentation précédente, aucune différence significative de GMQ n'a été observée entre les agneaux des différents lots (Tableau 28). Le GMQ a été en moyenne de 350 g/j. A l'échelle de l'élevage (220 agneaux par lot), le GMQ des agneaux de l'essai 4 (357 g/j) s'est retrouvé diminué par rapport au GMQ des agneaux du lot témoin (363 g/j) et celui des agneaux de l'essai 3 s'est révélé être encore moins bon (353 g/j). La dégradation de la vitesse de croissance dans l'essai 4 et surtout l'essai 3 sont à l'origine de pertes économiques importantes.

Tableau 28 : GMQ des agneaux au sein des différents lots en 2018

	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	p-value
GMQ (g/j)	337 ± 60	344 ± 35	364 ± 47	0,88

2. Teneur en AGV et AG longs du rumen

La quantité totale d'AGV est considérablement augmentée dans le jus de rumen des agneaux des essais 3 et 4 par rapport au lot témoin (Tableau 29). De la même manière que ce qui avait été observé lors de l'expérimentation de 2017, le pourcentage en isoC4 et iso C5 est diminué chez les agneaux des essais 3 et 4 par rapport au lot témoin. Par ailleurs le pourcentage de C2 est augmenté chez les agneaux de l'essai 4 par rapport au lot témoin et celui de C5 est plus élevé chez les agneaux de l'essai 3 que chez ceux de l'essai 4. Le rapport C2/C3 reste bas pour l'ensemble des lots et ne varie pas significativement selon le lot.

Tableau 29 : Quantité totale en AGV et pourcentage des différents AGV dans le jus de rumen selon les différents essais en 2018.

	Lot témoin	Essai 3	Essai 4	p-value
quantité totale AGV (mmol/L)	57,8 ^b ± 17,9	95,3 ^a ± 23,6	102,6 ^a ± 21,1	< 0,001
C2 (%)	50,8 ^a ± 4,6	51,7 ^{ab} ± 3,6	53,1 ^b ± 3,0	0,04
C3 (%)	38,9 ± 5,0	37,2 ± 4,4	37,5 ± 3,8	0,22
isoC4 (%)	0,6 ^b ± 0,2	0,3 ^a ± 0,1	0,2 ^a ± 0,1	< 0,001
C4 (%)	6,9 ± 2,9	7,9 ± 3,0	7,2 ± 2,2	0,26
isoC5 (%)	0,7 ^b ± 0,3	0,3 ^a ± 0,2	0,3 ^a ± 0,1	< 0,001
C5 (%)	2,1 ^{ab} ± 0,5	2,5 ^a ± 1,1	1,7 ^b ± 0,6	< 0,001
C2/C3	1,4 ± 0,5	1,4 ± 0,3	1,5 ± 0,4	0,73

Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif (p < 0,05)

Contrairement aux AGV, la quantité totale d'AG dans le jus de rumen est bien inférieure chez les agneaux des essais 3 et 4 que dans le lot témoin (Tableau 30).

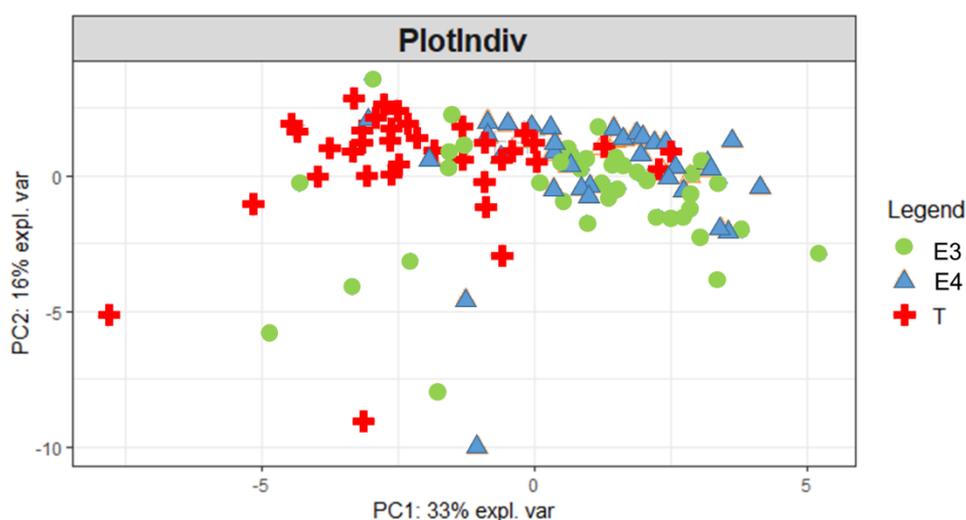
Tableau 30 : Quantité totale en AG, pourcentage individuel des différents AG et rapport t10/t11 dans le rumen selon les différents essais en 2018

	Lot témoin	Essai 3	Essai 4	p-value
<i>Quantité d'AG (mg/g MS)</i>				
Quantité totale	52,94 ^b ± 8,35	37,60 ^a ± 9,52	38,19 ^a ± 5,86	< 0,001
<i>Pourcentage d'AG</i>				
C13:0	0,23 ^a ± 0,06	0,15 ^b ± 0,08	0,15 ^b ± 0,07	< 0,001
C14:0	2,78 ^a ± 0,74	1,92 ^b ± 0,89	2,27 ^b ± 0,78	< 0,001
C14:0i	0,21 ± 0,06	0,21 ± 0,06	0,21 ± 0,05	0,84
C15:0	0,82 ^a ± 0,18	0,65 ^b ± 0,23	0,64 ^b ± 0,16	< 0,001
C15:0ai	1,18 ± 0,26	1,09 ± 0,26	1,13 ± 0,22	0,28
C15:0i	0,20 ^b ± 0,06	0,20 ^b ± 0,16	0,33 ^a ± 0,37	0,02
C16:0	16,35 ^a ± 1,36	15,11 ^b ± 1,17	14,48 ^b ± 2,03	< 0,001
C16:1	0,36 ^a ± 0,07	0,26 ^b ± 0,09	0,33 ^a ± 0,08	< 0,001
C17:0	0,53 ^a ± 0,13	0,46 ^b ± 0,11	0,49 ^{ab} ± 0,08	0,03
C17:0ai	0,17 ^a ± 0,08	0,09 ^b ± 0,10	0,09 ^b ± 0,19	< 0,01
C17:0i	0,12 ^a ± 0,08	0,06 ^b ± 0,06	0,06 ^b ± 0,08	< 0,001
C18:0	19,32 ^a ± 10,18	13,72 ^b ± 10,63	12,52 ^b ± 6,95	< 0,01
C18:1c9_C18:1t13t14	6,84 ^b ± 1,79	9,65 ^a ± 1,96	10,35 ^a ± 1,62	< 0,001
C18:1c11_C18:1t15	2,62 ^{ab} ± 0,42	2,46 ^b ± 0,43	2,82 ^a ± 0,41	< 0,001
C18:1c12	0,39 ± 0,16	0,30 ± 0,18	0,32 ± 0,21	0,07
C18:1c15	0,23 ^a ± 0,09	0,17 ^b ± 0,08	0,19 ^{ab} ± 0,07	< 0,01
C18:1t4	0,07 ^a ± 0,02	0,05 ^b ± 0,02	0,05 ^b ± 0,03	< 0,001
C18:1t5	0,07 ^a ± 0,02	0,03 ^c ± 0,02	0,05 ^b ± 0,03	< 0,001
C18:1t6t7t8	0,82 ^a ± 0,30	0,59 ^b ± 0,31	0,68 ^{ab} ± 0,31	< 0,01
C18:1t9	0,49 ^a ± 0,28	0,39 ^{ab} ± 0,22	0,34 ^b ± 0,17	0,02
C18:1t10	21,12 ^a ± 7,82	17,39 ^b ± 5,62	17,62 ^b ± 5,03	0,02
C18:1t11	2,03 ± 1,46	1,55 ± 2,10	1,32 ± 1,66	0,20
C18:1t12	0,88 ± 0,19	0,86 ± 0,15	0,88 ± 0,16	0,80
C18:1t16	0,21 ± 0,14	0,21 ± 0,19	0,20 ± 0,14	0,86
C18:2	10,59 ^b ± 5,27	18,83 ^a ± 7,32	17,37 ^a ± 5,89	< 0,001
C18:2t10c12	0,05 ^b ± 0,04	0,08 ^a ± 0,04	0,08 ^a ± 0,04	< 0,01
C18:2c9t11	0,05 ^a ± 0,04	0,03 ^{ab} ± 0,04	0,03 ^b ± 0,03	0,02
C18:2t9t11	0,04 ± 0,02	0,04 ± 0,02	0,05 ± 0,01	0,24
C18:2t11c15	0,42 ± 0,23	0,46 ± 0,24	0,51 ± 0,19	0,18
C18:3	1,02 ^b ± 0,49	2,02 ^a ± 0,72	2,17 ^a ± 0,72	< 0,001
C20:1	0,27 ^b ± 0,07	0,33 ^a ± 0,08	0,30 ^{ab} ± 0,07	< 0,01
<i>Rapport</i>				
t10/t11	16,62 ^b ± 13,84	27,11 ^a ± 20,12	21,12 ^{ab} ± 10,35	0,01

Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif (a, b et c : p < 0,05)

Le profil en AG longs du jus de rumen des agneaux des essais 3 et 4 est bien différent de celui du lot témoin. Les observations vont dans le même sens que ce qui avait été observé en 2017 pour les essais 1 et 2 par rapport au lot témoin. Ces différences sont toutefois plus marquées en 2018 et concernent des AG impairs et ramifiés qui n'avaient pas connu de variations dans les essais de 2017. Ainsi les pourcentages en C13:0, C14:0, C15:0, C16:0, C17:0ai, C17:0i, C17:0, C18:0, C18:1t4 et C18:1t10 sont significativement diminués dans les prélèvements des deux essais par rapport au lot témoin (Tableau 30). Les quantités de C18:1c9_C18:1t13t14, C18:2, C18:2t10c12 et C18:3 sont quant à elles plus élevées dans ces deux essais que chez le lot témoin. L'essai 3 se distingue pour sa part du lot témoin par ses teneurs diminuées en C16:1, C17:0, C18:1c15, C18:1t5t6t7t8 et surtout par son augmentation importante du ratio t10/t11 qui est presque doublé. Ce ratio n'est pas significativement différent entre l'essai 4 et le lot témoin mais a tendance à être tout de même augmenté dans l'essai 4.

La réalisation d'une sPCA a permis de projeter les individus dans un plan selon leur teneur en AGV et AG longs ruminiaux (Graphique 23). Les deux axes correspondent aux deux composantes permettant de discriminer au mieux les agneaux. La composante 1 explique 33% de la variabilité entre les individus ce qui est un bon résultat et la composante 2 explique 16% de la variabilité. Les individus du lot témoin présentent pour la plupart une abscisse négative alors que ceux des essais 3 et 4 présentent une abscisse proche de zéro ou positive. Ainsi les agneaux du lot témoin possèderaient davantage d'AG longs et AGV corrélés négativement avec la composante 1 que les agneaux des essais 3 et 4. A contrario le jus de rumen des agneaux des deux essais serait plus riche en AG longs et AGV corrélés positivement avec la composante 1. On remarque également quelques individus dispersés selon la composante 2 mais la variabilité individuelle est moins importante que ce qui avait pu être observé en 2017.



Graphique 23 : Projection des individus dans un plan selon la teneur en AGV et AG longs de leur rumen

Les AG constitutifs des composantes et permettant de discriminer les agneaux sont présentés sur le tableau 31. Le lot d'appartenance des agneaux a un effet significatif sur le pourcentage de nombreux AGV et AG longs constitutifs des composantes. La variabilité individuelle est bien moindre qu'en 2017, une grande partie des différences de teneur en AGV et AG longs du rumen est expliquée par l'effet du lot.

Tableau 31 : Corrélations majeures entre certains AG et AGV et les deux composantes et p-value de l'ANOVA testant l'effet lot sur chaque variable. Les AGV et AG présentés ont été choisis d'après le cercle de corrélations

	Corrélation ACP	p-value effet « lot »
<i>Composante 1</i>		
C18:2 *	0,38	< 0,001
C18:3 *	0,35	< 0,001
C18:1c9_C18:1t13t14	0,35	< 0,001
C18:0 *	- 0,33	< 0,01
C15:0 *	- 0,30	< 0,001
isoC4 *	- 0,28	< 0,001
C17:0 *	- 0,25	0,03
isoC5 *	- 0,24	< 0,001
<i>Composante 2</i>		
C3 *	0,39	0,22
C18:1c11_C18:1t15 *	0,38	< 0,001
C16:1 *	0,37	< 0,001
C14:0 *	0,31	< 0,001
C13:0 *	0,28	< 0,001
C2/C3 *	- 0,37	0,73
C4	- 0,25	0,26
C17:0ai *	- 0,23	< 0,01

* AG intervenant déjà dans la constitution des composantes de la sPCA de 2017

On remarque par ailleurs qu'une grande majorité des AG discriminant les agneaux en 2018 avait déjà ce rôle en 2017. Un effet lot s'exerçait déjà en 2017 sur le taux de C18:2, C18:3, isoC4, iso C5, C18:1c11_C18:1t15, C14:0, C13:0 et C17:0ai alors que ce n'était pas le cas pour le C18:0, le C15:0 et le C16:1. Ainsi, même si les AGV et AG long discriminant les agneaux entre eux sont globalement les mêmes en 2017 et 2018, l'effet lot est plus marqué en 2018.

3. Microbiote ruminal

En 2018, 95 gènes et 43 espèces bactériennes ont été identifiés. Seulement 7,2% des OTU mis en évidence ont été affiliés en espèces.

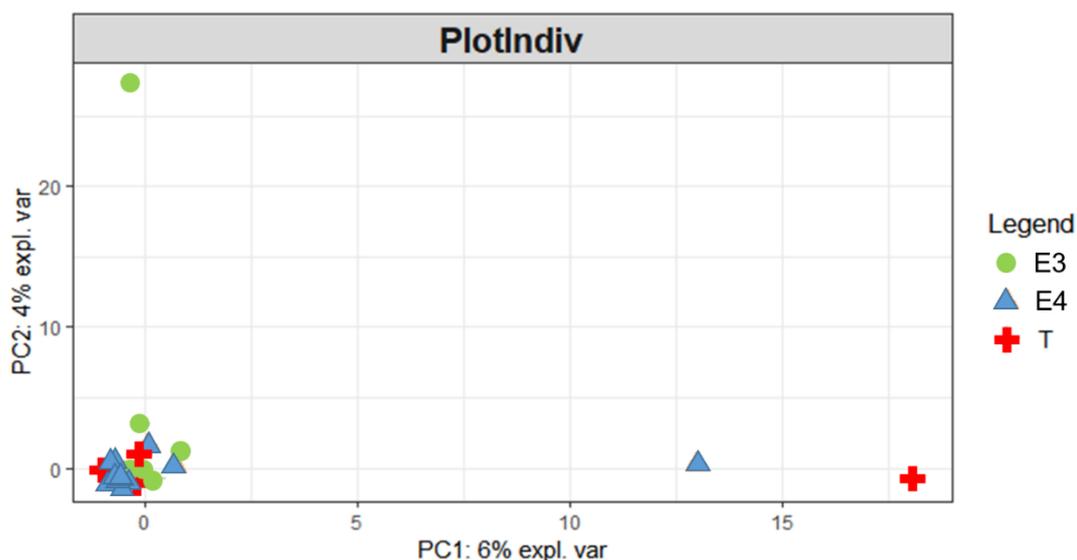
Les essais 3 et 4 ont présenté une richesse bactérienne supérieure à celle du lot témoin (Tableau 32). Les indices de diversité alpha n'ont pas mis en évidence de différence significative de diversité du microbiote entre les lots.

Tableau 32 : Valeur moyenne des index de richesse et de diversité alpha selon les lots de 2018

	Lot témoin	Essai 3	Essai 4	p-value
Observed	303 ^b	324 ^a	324 ^a	< 0,01
Shannon	3,9	3,9	4,0	0,25
Inverse de Simpson	24	22,1	25	0,26

L'étude de la diversité bêta a permis de comparer qualitativement la diversité des microbiotes entre les individus. La réalisation de la nMDS n'a pas révélé de différence de composition de microbiote entre les agneaux des différents lots. La réalisation d'une sPCA et la représentation des individus selon deux composantes va dans le même sens (Graphique 24). L'affiliation taxonomique des clusters constituant les composantes est présentée dans le tableau 33. Seulement 6% de la variabilité entre les individus est expliquée par la composante 1 et 4% par la composante 2. Ces valeurs sont extrêmement faibles. Le microbiote des différents agneaux est ainsi très proche en termes de diversité. Un individu de chaque lot présente cependant un microbiote de composition fortement différente par rapport aux autres. Un agneau du lot témoin possède une plus grande abondance des espèces bactériennes corrélées positivement avec la composante 1, notamment des bactéries appartenant au genre *Prevotella 1* (cluster_1038). Un agneau de l'essai 4 se distingue aussi par son abondance plus importante en bactéries des genres *Acetivomaculum* (cluster_248) et *Olsenella* (cluster_91). Un agneau de l'essai 3 présente quant à lui un microbiote riche en espèces fortement corrélées positivement à la composante 2 et notamment en une bactérie du genre *Prevotellaceae UCG-001* (cluster_276). L'ANOVA testant l'effet lot pour chaque cluster intervenant dans les composantes n'a montré aucun effet significatif (Tableau 34). La discrimination de quelques individus selon la composition de leur microbiote est liée à de la variabilité individuelle.

Ainsi le retrait des fibres longues associé aux changements de composition de l'aliment finition opérées dans les essais 3 et 4 n'a pas modifié la nature des principales espèces bactériennes caractérisant le microbiote ruminal des agneaux. Cela a tout de même augmenté leur richesse bactérienne.



Graphique 24 : Projection des individus dans un plan selon la composition de leur microbiote

Tableau 33 : Nomenclature des clusters bactériens constituant les composantes

	Cluster	Phylum	Classe	Genre	Espèce
Composante 1	Cluster _ 516	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Acetitomaculum</i>	Inconnue
	Cluster _ 814	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Inconnue
	Cluster _ 248	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Acetitomaculum</i>	Inconnue
	Cluster _ 1038	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	<i>Prevotella</i> sp.
	Cluster _ 91	Actinobacteria	<i>Coriobacteriia</i>	<i>Olsenella</i>	Inconnue
	Cluster _ 389	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Saccharofermentans</i>	Inconnue
	Cluster _ 331	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Inconnue
	Cluster _ 32	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Ruminococcus 2</i>	Inconnue
Composante 2	Cluster _ 1076	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	Inconnu	Inconnue
	Cluster _ 634	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	Inconnu	Inconnue
	Cluster _ 276	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae UCG-001</i>	Inconnue
	Cluster _ 883	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Defluviitaleaceae UCG-011</i>	Inconnue
	Cluster _ 1004	Firmicutes	<i>Clostridia</i>	<i>Ruminococcaceae UCG-014</i>	Inconnue
	Cluster _ 333	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	<i>Prevotella ruminicola</i>
	Cluster _ 621	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotella 1</i>	Inconnue
	Cluster _ 755	Bacteroidetes	<i>Bacteroidia</i>	<i>Prevotellaceae UCG-001</i>	Inconnue

Tableau 34 : Part des principaux clusters intervenant dans les deux composantes discriminant les agneaux selon leur microbiote

	Corrélation ACP	p-value effet « lot »
<i>Composante 1</i>		
Cluster _ 516	0,46	0,55
Cluster _ 814	0,46	0,49
Cluster _ 248	0,37	0,59
Cluster _ 1038	0,35	0,70
Cluster _ 91	0,32	0,75
Cluster _ 389	0,28	0,55
Cluster _ 331	0,22	0,66
Cluster _ 32	0,21	0,85
<i>Composante 2</i>		
Cluster _ 1076	0,34	0,35
Cluster _ 634	0,34	0,29
Cluster _ 276	0,34	0,43
Cluster _ 883	0,33	0,44
Cluster _ 1004	0,33	0,44
Cluster _ 333	0,31	0,15
Cluster _ 621	0,28	0,68
Cluster _ 755	0,22	0,90

Nous avons ensuite étudié l'abondance relative de certaines espèces cellulolytiques (*Ruminococcus flavefaciens*, *Ruminococcus albus*), amylolytiques (*Selenomonas ruminantium*, *Butyrivibrio fibrisolvens*), productrices d'acide lactique (*Lactobacillus sp.*) ainsi que d'*Escherichia coli* (Tableau 35). Seule la population de *Ruminococcus flavefaciens* a présenté une abondance significativement différente entre les lots, elle a été supérieure dans l'essai 4 par rapport au lot témoin. Le rapport des deux principaux phyla bactériens Bacteroidetes/Firmicutes s'est révélé être significativement plus élevé dans l'essai 3 que dans le lot témoin et l'essai 4.

Tableau 35 : Moyenne des abondances relatives de certaines bactéries dont l'espèce a été identifiée dans les différents lots en 2018 et rapport moyen des deux principaux phyla

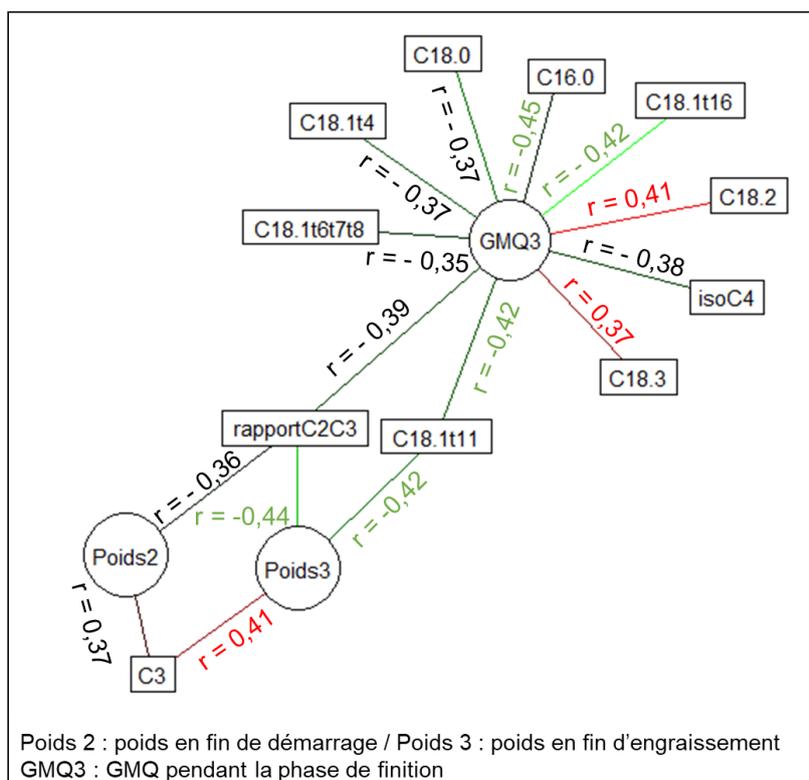
	Lot témoin	Essai 3	Essai 4	p-value
<i>Abondance relative (%)</i>				
<i>Ruminococcus flavefaciens</i>	0,16 ^b	0,22 ^{ab}	0,40 ^a	< 0,01
<i>Ruminococcus albus</i>	0,02	0,02	0,01	0,67
<i>Selenomonas ruminantium</i>	0,04	0,00	0,00	0,35
<i>Butyrivibrio fibrisolvens</i>	0,03	0,02	0,03	0,67
<i>Lactobacillus sp.</i>	0,01	0,02	0,01	0,54
<i>Escherichia coli</i>	0,02	0,01	0,02	0,93
<i>Rapport</i>				
Bacteroidetes/Firmicutes	0,8 ^b	1,3 ^a	1,0 ^b	< 0,001

Au sein d'une même ligne, des lettres différentes témoignent d'un effet significatif (p < 0,05)

Ainsi les changements de ration opérés dans les essais 3 et 4 conduisent à une forte modification par rapport au lot témoin de la teneur en AGV et AG longs du jus de rumen des agneaux. La composition du microbiote est toutefois relativement similaire entre les trois lots et la présence de quelques individus avec une composition atypique serait due à de la variabilité individuelle. Il semble à ce stade intéressant de ne plus considérer le lot auquel appartiennent les agneaux. Cette approche globale peut nous permettre de mettre en évidence des liens entre le poids et le GMQ des agneaux, la teneur de leur jus de rumen en AG et la composition de leur microbiote ruminal.

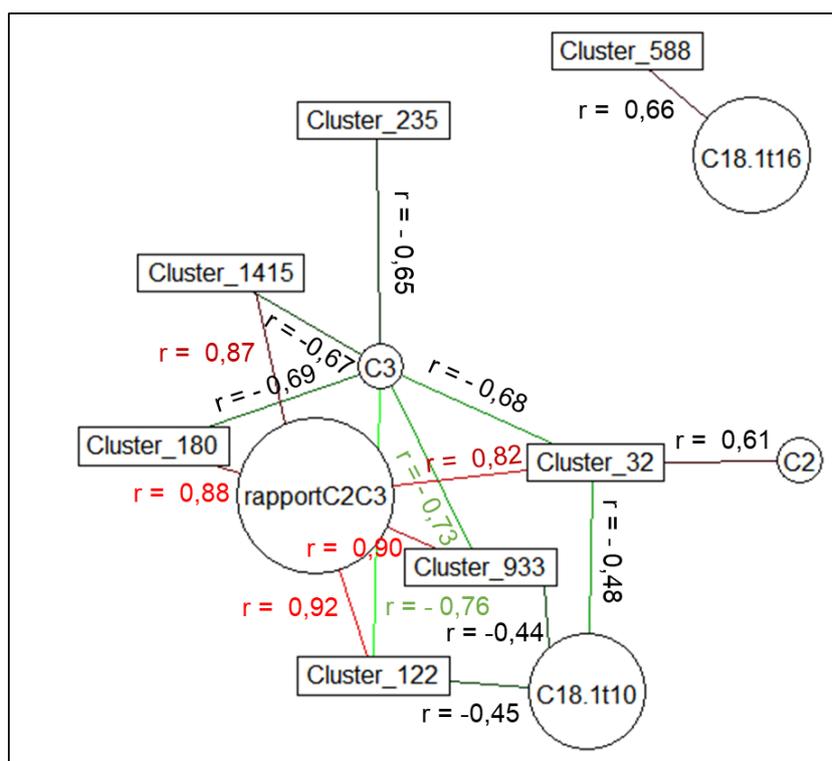
4. Lien entre GMQ, teneur du rumen en AG et microbiote ruminal

Les corrélations entre le poids ou le GMQ des agneaux pendant l'engraissement et la concentration en AGV et AG longs de leur rumen sont présentées sur le graphique 25. Les corrélations positives les plus fortes concernent le GMQ pendant la phase de finition et le pourcentage ruminal en C18:2 et C18:3 ainsi que le poids en fin d'engraissement et le taux ruminal de C3. Des corrélations négatives fortes ont également été mises en évidence. Elles concernent le GMQ pendant la phase de finition et le taux de C16:0, C18:1t16 et de C18:1t11. Le poids en fin d'engraissement est également corrélé négativement avec le rapport C2/C3 et le taux de C18:1t11.



Graphique 25 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le GMQ, le poids des agneaux et la teneur de leur rumen en AGV et AG longs

De fortes corrélations ont été établies entre certains AGV et clusters bactériens (Graphique 26). L'affiliation taxonomique des clusters impliqués dans les corrélations est présentée sur le tableau 36. Les principales corrélations positives concernent le rapport C2/C3 et des bactéries des genres *Rikenellaceae RC9*, *Ruminococcaceae UCG-002*, *Ruminococcaceae NK4A214* et *Ruminococcus 2*. Ces corrélations ont un coefficient de Pearson supérieur à 0,80 et sont extrêmement fortes. Les plus fortes corrélations négatives existent entre le pourcentage de propionate et des bactéries des genres *Rikenellaceae RC9* et *Ruminococcaceae UCG-002*. Il est également intéressant de noter que des corrélations négatives sont établies entre le taux de C18:1t10 et des bactéries des genres *Ruminococcus 2*, *Ruminococcaceae UCG-002* et *Rikenellaceae RC9*.

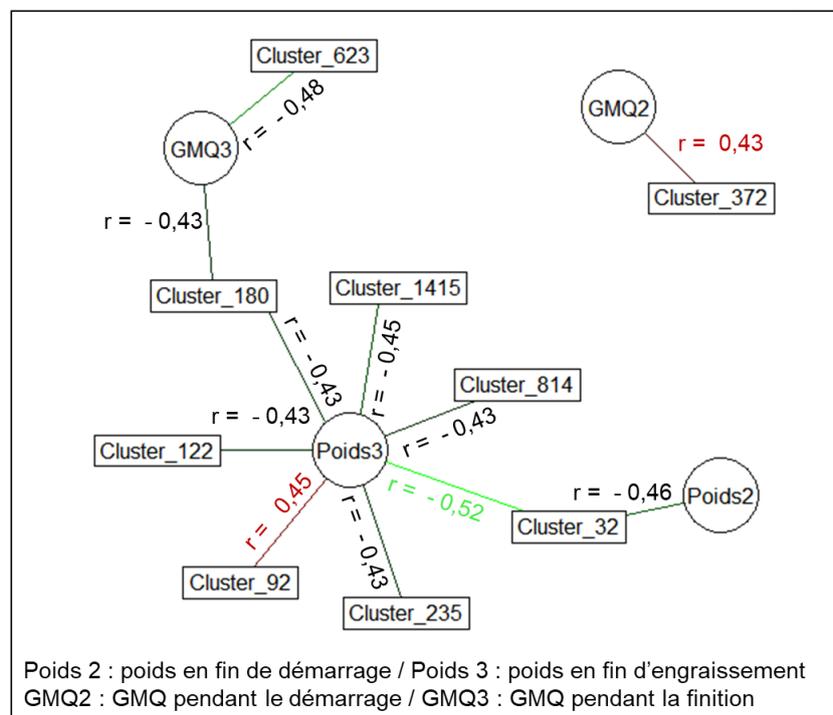


Graphique 26 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre les AGV et AG longs ruminaux et le microbiote ruminal

Tableau 36 : Affiliation taxonomique des clusters bactériens impliqués dans les sPLS

Cluster	Phylum	Classe	Genre	Espèce
Cluster_122	Bacteroidetes	Bacteroidia	Rikenellaceae RC9	Inconnue
Cluster_933	Firmicutes	Clostridia	Ruminococcaceae UCG-002	Inconnue
Cluster_180	Firmicutes	Clostridia	Ruminococcaceae NK4A214	Inconnue
Cluster_1415	Firmicutes	Clostridia	Ruminococcus 2	Inconnue
Cluster_32	Firmicutes	Clostridia	Ruminococcus 2	Inconnue
Cluster_92	Firmicutes	Clostridia	Lachnoclostridium 1	Inconnue
Cluster_372	Firmicutes	Clostridia	Eubacterium	Inconnue

Il existe également une corrélation positive entre le poids en fin d'engraissement et une bactérie du genre *Lachnocostridium* 1 ainsi qu'entre le GMQ pendant la phase de démarrage et une bactérie appartenant au genre *Eubacterium* (Graphique 27). La majorité des corrélations mises en évidence entre les paramètres zootechniques et certains clusters bactériens sont négatives. Les principales relient le poids en fin d'engraissement à des bactéries vus précédemment car corrélés positivement avec le rapport C2/C3. Ces bactéries appartiennent aux genres *Ruminococcus* 1, *Rikenellaceae* RC9 et *Ruminococcaceae* NK4A214.



Graphique 27 : Graphique représentatif des relations établies grâce à une sPLS entre le poids, le GMQ des agneaux et le microbiote ruminal

C. Comparaison des essais de 2017 et 2018

Le lot témoin des expérimentations de 2017 a reçu exactement la même ration que le lot témoin de 2018. L'effet de l'année d'expérimentation a été testé en comparant les valeurs du lot témoin de 2017 et 2018. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le tableau 37.

Tableau 37 : Influence de l'année de réalisation des expériences sur le GMQ, la quantité de certains acides gras volatils et acides gras

	Lot témoin 2017	Lot témoin 2018	p-value
<i>Performances zootechniques</i>			
GMQ (g/j)	362 ± 41	337 ± 60	0,20
<i>Acides gras volatils</i>			
AGV totaux (mmol/L)	69,0 ± 21,9	57,8 ± 17,9	0,67
Ratio C2/C3	1,3 ± 0,1	1,5 ± 0,5	0,34
<i>Acides gras</i>			
AG totaux (mg/g MS)	55,4 ± 10,4	52,9 ± 8,4	0,40
C18:2n-6 + C18:3n-3 (%)	9,1 ± 2,8	11,6 ± 5,8	0,16
Ratio <i>trans</i>10/<i>trans</i>11	46,3 ± 40,8	16,6 ± 13,8	0,04

L'année d'expérimentation n'exerce pas d'effet significatif sur le GMQ des agneaux du lot témoin. La différence observée entre la moyenne de GMQ du lot témoin de 2017 et celle de 2018 est due à de la variabilité individuelle. Cette différence entraîne cependant des conséquences économiques importantes, un agneau avec un GMQ plus faible est engraisé plus longtemps ce qui représente une plus grande consommation d'aliment et de litière. Nous ne disposons pas de données précises concernant la durée d'engraissement des agneaux ainsi que le poids des agneaux au moment de l'abattage.

Si on s'intéresse à la quantité totale d'AGV et d'AG contenus dans le jus ruminal des agneaux, l'année de réalisation des expérimentations n'exerce pas non plus d'effet significatif. De la même manière le rapport C2/C3, la quantité de C18:2n-6 + C18:3n-3 ne sont pas significativement différents selon l'année. Le ratio *trans*10/*trans*11 est par contre fortement influencé par l'année.

D. Bilan technico-économique des essais alimentaires du projet Peau'Lux

L'engraissement des agneaux est associé à différents postes de dépenses, l'alimentation est l'un d'entre eux. Les changements de ration opérés dans les essais 1, 2, 3 et 4 ont modifié le budget consacré au poste alimentaire. Le remplacement du fourrage de paille par des granulés de paille broyée a permis une diminution de la consommation de paille (Tableaux 38 et 39, diminution de plus de 10kg dans les essais de 2017 par rapport au lot témoin et de 5kg dans les essais de 2018 par rapport au lot témoin). Le coût des granulés de paille est toutefois supérieur à celui du fourrage classique. Le prix de l'aliment finition est peu variable dans les essais par rapport à l'aliment finition du lot témoin et les quantités consommées ont peu différé entre les lots. En 2018 cependant un problème technique a empêché la réalisation d'une mesure précise des quantités d'aliment consommées et le bilan présenté a été effectué sur une valeur théorique de 80kg d'aliment consommés par agneau. A l'échelle d'un agneau, le budget consacré à l'alimentation n'a finalement été que peu impacté par l'utilisation de granulés de paille et par la modification de composition de l'aliment finition en 2017 et 2018 (Tableaux 38 et 39). A l'échelle d'un lot ou d'un élevage, la différence observée représente tout de même un surcoût important.

Les lésions de buissonné-pailleux sont à la fois causées par les fibres des râteliers et de la litière. Le moyen le plus efficace de minimiser ces lésions est de modifier à la fois la litière et la ration. Au sein du projet Peau'Lux, la modification de ration alimentaire dans les essais 1, 2, 3 et 4 s'est alors accompagnée d'un remplacement de la litière constituée de paille par de la litière végétale absorbante. Cette litière est beaucoup plus onéreuse que la litière des lots témoins constituée de paille. Par ailleurs son utilisation s'est retrouvée être près de quatre fois plus importante dans les lots d'essais que dans les lots témoins. Le budget consacré à l'achat de litière a ainsi été beaucoup plus élevé dans les différents essais utilisant de la litière végétale que dans les lots témoins.

La diminution de la teneur en sels et bicarbonates de l'aliment finition des essais 1 et 2 en 2018 par rapport à 2017 a bien permis une diminution de la quantité de litière utilisée. La supplémentation en argile dans le cadre de l'essai 4 n'a pas eu le même effet puisque 39,6kg ont été utilisés contre 40kg dans l'essai 3 ce qui est relativement similaire.

Le rendement carcasse s'est lui aussi retrouvé impacté chez les agneaux ne consommant pas de fibres longues de paille, et cela à la fois en 2017 et 2018. Il a perdu près de 0,5 points par rapport au lot témoin. Cela représente également un manque à gagner de près de 2€ par agneau.

Ainsi le solde par agneau sorti en fin d'engraissement est bien moins bon pour les agneaux des lots d'essais en comparaison des lots témoins. Ce solde est toutefois amélioré de près de 10€ en 2018 par rapport à 2017. La litière est l'élément le plus pénalisant.

Tableau 38 : Solde par agneau de l'engraissement pour chacun des trois lots de 2017

	Témoin			Essai 1			Essai 2		
	Quantité (kg)	Prix au kg (€)	Total (€)	Quantité (kg)	Prix au kg (€)	Total (€)	Quantité (kg)	Prix au kg (€)	Total (€)
Aliment	87,5	0,278	24,33	86,7	0,29	25,40	90,30	0,308	27,81
Paille consommée	15	0,075	1,13	5,5	0,15	0,83	5,30	0,150	0,80
Traitement coccidiose									
Nutrition			25,45			26,23			28,61
Litière	10	0,075	0,75	45,3	0,15 €	6,80	51,20	0,15	7,68
Carcasse	18,1	5,00	90,65	17,8	5,00 €	88,90	17,60	5,00	87,85
Solde par agneau			64,45			55,88			51,56

Tableau 39 : Solde par agneau de l'engraissement pour chacun des trois lots de 2018

	Témoin			Essai 3			Essai 4		
	Quantité (kg)	Prix au kg (€)	Total (€)	Quantité (kg)	Prix au kg (€)	Total (€)	Quantité (kg)	Prix au kg (€)	Total (€)
Aliment	80	0,278	22,24	80	0,288	23,04	80	0,288	23,04
Paille consommée	15	0,075	1,13	10	0,15	1,50	10	0,15	1,50
Traitement coccidiose									
Nutrition			23,37			24,54			24,54
Litière	10	0,075	0,75	40	0,15	6,00	39,60	0,15	5,94
Carcasse	19,4	5,00	97,00	18,9	5,00	94,50	18,90	5,00	94,50
Solde par agneau			72,89			63,93			64,02

Aliment 80 : donnée non précise (problème technique lors de la pesée)

Les modifications de conditions de logement et d'alimentation ont cependant conduit à des variations de mortalité entre les lots. L'essai 1 de 2017 est celui ayant conduit la mortalité la plus faible (Tableau 40). Nous ne disposons pas de données précises en termes de morbidité mais aucune différence majeure n'a été constatée entre les lots.

Tableau 40 : Mortalité dans les différents lots d'agneaux au cours de l'engraissement

	2017			2018		
	Lot témoin	Essai 1	Essai 2	Lot témoin	Essai 3	Essai 4
Mortalité	5 %	3 %	7 %	6 %	6 %	5 %

Le manque à gagner lors de mortalité supérieure à celle du lot témoin (5%) a été pris en compte en plus des coûts liés à la litière, à l'alimentation et à la variation de rendement carcasse. Cela a permis de calculer, à l'échelle d'un lot, la perte réelle par agneau sorti liée aux changements opérés pour chaque essai (Tableau 41). Ce chiffre est donné par rapport à la situation de référence correspondant aux lots témoins de 2017 et 2018 (détail des calculs en annexe 4). L'ensemble des essais utilisant de la litière végétale et de la paille sous forme de granulés conduisent à une perte financière. La perte la moins importante concerne l'essai 1 de 2017 et s'élève à 7,03€ par agneau.

Tableau 41 : Perte réelle par agneau sorti en prenant en compte les variations de mortalité, de rendement carcasse, de coût alimentaire et de litière

	2017		2018	
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
Perte par agneau (par rapport au lot témoin)	7,03 €	13,91 €	8,92 €	8,18 €

IV. Discussion

A. Effets des rations sans fibres longues sur le milieu ruminal

Le retrait des fibres longues de paille dans la ration des agneaux à l'engraissement pourrait permettre de réduire considérablement les lésions de buissonné-pailleux et d'ainsi mieux valoriser les peaux. La réussite de cette stratégie nécessite cependant que les performances zootechniques et digestives des agneaux ne soient pas détériorées.

Les rations classiquement utilisées pendant l'engraissement, riches en concentrés, sont à l'origine d'une subacidose ruminale chez les animaux malgré l'utilisation de fibres longues de paille. Enlever les fibres longues risque d'accentuer ce phénomène, de dépasser les capacités adaptatives des animaux et de compromettre leur santé.

Chacune des deux expérimentations que nous avons réalisées s'est basée sur le même schéma : un lot témoin comprenant des agneaux consommant une ration finition classique d'engraissement avec de la paille, et deux lots d'essais dont la ration ne comportait pas de paille longue mais dont le concentré avait été modifié dans sa composition pour ne pas accentuer le phénomène d'acidose. Quatre aliments spécifiques, accompagnés de granulés de paille broyée, ont ainsi été testés :

- un aliment enrichi en levures vivantes (0,6% MB), de teneur augmentée en CB (15% MB) et en bicarbonates (1% MB) et réduite en amidon (24% MB) par rapport à l'aliment utilisé dans le lot témoin (CB 8% MB, bicarbonates 0,5% MB, amidon 36% MB).

- un aliment identique au précédent mais enrichi en parois de levures en plus des levures vivantes et avec une teneur en bicarbonates plus importante (1,3% MB).

- un aliment de teneur en amidon (35% MB) et en bicarbonates (0,5% MB) similaire à celle du lot témoin, plus élevée en CB (10% MB) et qui comprend des levures vivantes en concentration identique à celle des deux aliments précédents (0,6% MB)

- un aliment de composition identique à celle de l'aliment précédent à l'exception d'un taux d'amidon très légèrement inférieur (34% MB) et de l'ajout d'argile à hauteur de 2% de la MB.

La distribution de rations riches en concentrés est généralement à l'origine d'une forte production d'AGV s'accumulant dans le rumen et responsables d'une diminution du pH ruminal (Penner, Aschenbach, et al. 2009). Avec de telles rations, il est donc important de surveiller la survenue d'une subacidose ruminale. La mesure du pH ruminal et sa durée sous les seuils de 5,8 et 5,6 est le critère le plus fiable pour la mettre en évidence (Penner, Aschenbach, et al. 2009; Gozho et al. 2005a). Dans notre étude les échantillons de jus de rumen ont été prélevés au moyen d'une sonde œsophagienne et la contamination salivaire a empêché toute mesure fiable du pH ruminal. La connaissance de ce paramètre nous aurait permis de conclure avec certitude à la présence d'une subacidose ruminale chez l'ensemble des agneaux (lot témoin/ essais sans fibres longues). Dans notre étude la mesure de la quantité totale d'AGV ainsi que l'étude du microbiote ruminal nous ont donné une indication sur les conditions de pH du rumen.

1. AGV totaux

En 2017, la quantité totale d'AGV n'a été augmentée dans aucun des essais par rapport au lot témoin. Les rations sans fibres longues des essais 1 et 2 n'entraîneraient pas un état d'acidose plus sévère que la ration d'engraissement comportant de la paille. En 2018 cependant la quantité totale d'AGV a presque doublé dans le jus de rumen des agneaux des essais 3 et 4 par rapport au lot témoin. Cette forte teneur en AGV totaux peut provenir d'une plus grande production d'AGV dans les essais 3 et 4 par rapport au lot témoin ou d'une diminution de leur absorption ruminale (Penner, Taniguchi, et al. 2009; Aschenbach et al. 2011; Li et al. 2014). Des études ont montré qu'une diminution de la taille des particules fibreuses pouvait conduire à une production plus importante d'AGV en augmentant la surface disponible pour l'attachement des bactéries et améliorant ainsi la digestibilité des fourrages (Krause, Combs, Beauchemin 2002). L'absence de fibres longues pourrait par ailleurs contribuer à une modification de la motilité ruminale à l'origine d'une diminution de l'absorption papillaire des AGV et de leur accumulation dans le rumen (Zebeli et al. 2012). Toutefois

d'autres auteurs ont montré que cette réduction de taille des particules augmenterait le taux de passage du contenu ruminal vers le feuillet et diminuerait la production d'AGV (Yang, Beauchemin 2006). Tout comme les rations des essais 3 et 4 de 2018, les rations des essais 1 et 2 ne comportaient pas de paille sous forme de fibre longue. Ces dernières n'ont cependant pas conduit à une augmentation de la teneur ruminale en AGV totaux. L'aliment finition distribué en 2018 était moins riche en cellulose, en bicarbonates et surtout beaucoup plus riche en amidon que l'année précédente (24% et 23% de la MB d'amidon respectivement dans les essais 1 et 2 contre 35% et 34% respectivement dans les essais 3 et 4). Il semblerait que ce soit la forte teneur en amidon couplée à l'absence de fibres longues qui soit responsable de l'augmentation de la production d'AGV et d'une situation d'acidose plus marquée pour les agneaux des essais 3 et 4 que pour le lot témoin (Lessire, Rollin 2013) alors que cela n'a pas été le cas en 2017. L'aliment distribué en 2018 au lot témoin comportait le même pourcentage d'amidon que celui des essais 3 et 4 et une quantité de cellulose moindre et pourtant la quantité totale d'AGV a été divisée par deux. Les fibres longues sont à l'origine d'une moindre production d'AGV ainsi que d'une meilleure absorption de ces derniers à travers la paroi ruminale (Krause, Combs, Beauchemin 2002; Zebeli et al. 2012). Dans le cas de rations riches en amidon comme le sont celles des essais 3 et 4, la présence de fibres longues semble ainsi indispensable pour assurer une bonne digestion et ne pas accentuer l'acidose ruminale.

2. Rapport C2/C3

Le jus de rumen des agneaux des différents lots de 2017 et 2018 a présenté un rapport C2/C3 considérablement abaissé (de l'ordre de 1,5). Les rations habituelles distribuées aux animaux en production conduisent à la synthèse d'AGV selon les proportions suivantes : C2 60-65% du mélange, C3 18-20% du mélange, C4 10-15% du mélange, le reste correspondant à d'autres AGV minoritaires (Drogoul 2004). Le ratio C2/C3 est alors habituellement de 3-3,5. L'abaissement de ce rapport dans nos expérimentations est lié à la ration riche en concentrés et fortement acidogène distribuée aux agneaux pendant l'engraissement. Cela est vrai à la fois pour les rations comportant de la paille sous forme de fibres longues et sous forme de granulés. Le C3 est glucoformateur et participe à la synthèse d'énergie au travers du cycle de Krebs. Son fort rendement énergétique ainsi que sa contribution à la formation des triglycérides font de cet AGV un AGV particulièrement intéressant et recherché pour l'engraissement et la production de viande (Drogoul 2004). Au contraire le C2 est davantage intéressant pour la production laitière (synthèse de la matière grasse du lait). De faibles rapports C2/C3, comme le permettent toutes nos rations, sont préférés dans les systèmes d'engraissement.

3. Iso-acides

Les principaux AGV ayant connu des modifications de leur teneur ruminale suite au changement de ration sont les iso-AGV. L'absence de fibres longues a entraîné une diminution de la concentration en isoC4 et isoC5 dans le jus de rumen des agneaux des quatre essais de 2017 et 2018 par rapport aux lots témoins. Ces deux iso-AGV sont des produits de la dégradation des acide-aminés ramifiés valine et leucine respectivement (Andries et al. 1987). Différentes bactéries telles que *Megasphaera elsdenii* ou *Bacteroides ruminicola* sont capables de dégrader ces amino-acides (Macfarlane et al. 1992). Ces AG ramifiés sont utilisés par les bactéries cellulolytiques *Bacteroides succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens* et *Ruminococcus albus*. Leur ajout dans les rations des ruminants favoriserait ainsi la croissance de ces dernières (Allison, Bryant, Doetsch 1958) et stimulerait donc la digestion cellulolytique (Gorosito, Russell, Soest 1985; Moharrery 2004). D'autres études n'ont cependant pas révélé de différences en termes d'efficacité de la digestion (Tuah, Tait 1985). Contrairement aux AGV, la présence d'iso-AGV dans le rumen n'affecte pas le pH ruminal (Tuah, Tait 1985). Nous aurions pu nous attendre à ce que les pourcentages d'iso-acides dans le rumen des agneaux des lots d'essais, qui ont ingéré des levures vivantes, soient supérieurs à ceux des agneaux des lots témoins. Il a en effet été démontré que la supplémentation en *Saccharomyces cerevisiae* apportait au milieu des facteurs de croissance stimulant la croissance et l'activité de *M. elsdenii* (Callaway, Martin 1997). Les résultats que nous avons obtenus ne vont pas dans ce sens. Smith, Macfarlane (1998) ont montré que la quantité de glucides disponibles mais surtout le pH ruminal étaient les principaux facteurs déterminant l'activité des enzymes à l'origine de la production des AG ramifiés. Une diminution de pH de 6,8 à 5,5 est responsable d'une chute de production d'AG ramifiés de 60%. On peut penser que la diminution de la quantité d'iso-acides chez les agneaux n'ayant pas consommé de fibres longues pourrait être liée à une acidification plus importante de leur milieu ruminal. La diminution de la concentration en iso-acides ruminiaux dans les essais 1 et 2 de 2017 et 3 et 4 de 2018 n'a par ailleurs pas été associée ici à une diminution de l'abondance relative des populations de *Ruminococcus flavefaciens* et *Ruminococcus albus*. Les variations de concentration des iso-acides pourraient ne pas être suffisantes pour entraîner des modifications de taille de populations des bactéries les utilisant comme substrats. Ces modifications pourraient par ailleurs davantage survenir lors d'un enrichissement du milieu en iso-acides plutôt que lors de la diminution de leur teneur.

Ainsi, l'ensemble des rations riches en concentrés conduit à une acidification importante du milieu ruminal. Les fibres longues présentes dans la ration des lots témoins assurent une importante salivation. Cet apport salivaire permet de tamponner le milieu ruminal qui est en situation acidogène (Li et al. 2014; Zhao et al. 2011). Les fibres longues rendraient

ainsi possible l'établissement d'un équilibre ruminal. Cet équilibre est toutefois instable. Remplacer les fibres longues par de la paille broyée diminue la salivation et l'apport de substances tampons dans le rumen, et modifierait l'absorption des AGV. Les essais 1 et 2 associent le retrait des fibres longues à une augmentation de la quantité de bicarbonates permettant de tamponner le rumen, une augmentation de la teneur en NDF de l'aliment pour apporter plus de substrats aux bactéries fibrolytiques, et une diminution de la teneur en amidon. L'équilibre ruminal semble être maintenu grâce à ces adaptations. Au contraire retirer les fibres de la ration tout en maintenant les taux de bicarbonates et d'amidon à leur valeur initiale (celle d'amidon étant élevée) semble, d'après les premiers résultats concernant la quantité totale d'AGV, conduire à une situation d'acidose plus marquée pour les agneaux des essais 3 et 4.

4. AG longs et ratio t_{10}/t_{11}

Alors que la quantité totale d'AG longs présents dans le jus de rumen des agneaux des essais 1 et 2 est restée similaire à celle du lot témoin de 2017, celle des essais 3 et 4 a été diminuée de près de 30% par rapport à la teneur du lot témoin de 2018. L'hypothèse la plus probable expliquant une telle variation de la quantité totale d'AG longs est l'utilisation de matières premières moins riches en lipides pour l'élaboration des rations des essais 3 et 4.

La teneur individuelle en AG longs ruminiaux a elle aussi été davantage affectée par le lot d'appartenance des agneaux en 2018 qu'en 2017. Dans l'expérimentation de 2018 on a constaté une augmentation de la teneur en C18:2n-6 et C18:3n-3 associée à une diminution en C18:1*t* et C18:0 dans les essais 3 et 4 par rapport au lot témoin. Ces observations traduisent un ralentissement majeur de la biohydrogénation du C18:2n-6 et C18:3n-3 lié à une diminution de la première étape d'isomérisation (Meynadier et al. 2018). Par ailleurs, toujours en 2018, nous avons observé une diminution significative du pourcentage ruminal de C18:2*c*9*t*11 et une augmentation de celui de C18:2*t*10*c*12 par rapport au lot témoin. Le ratio t_{10}/t_{11} a d'ailleurs été près de deux fois plus important chez les agneaux de l'essai 3 que chez ceux du lot témoin et il a eu tendance à présenter une valeur intermédiaire pour l'essai 4 (même si statistiquement la différence n'était pas significative). Ces observations traduisent une orientation de la biohydrogénation du C18:2n-6 en favorisant la formation d'AG-*trans*10 au détriment des *trans*11 (Bessa, Alves, Santos-Silva 2015). Aucun changement significatif de la teneur en C18:2*c*9*t*11, C18:2*t*10*c*12 ou du rapport t_{10}/t_{11} n'a été mis en évidence en 2017 entre les essais 1 et 2 et le lot témoin. La biohydrogénation est beaucoup moins affectée avec les rations d'essais de 2017. L'absence de fibres longues et la plus grande richesse en amidon de l'aliment finition dans les essais 3 et 4 semblent là encore affecter négativement les activités bactériennes. Ces deux rations, et particulièrement celle de l'essai 3, pourraient être responsables d'une diminution de pH supérieure à celle des autres lots à l'origine d'une

inhibition de l'isomérase assurant la première étape de biohydrogénation du C18:2n-6 (Meynadier et al. 2018) et d'une synthèse accrue d'AG-*trans*10 (Bessa, Alves, Santos-Silva 2015). Une augmentation de la quantité ou de l'activité des bactéries à l'origine de la synthèse de ces AG-*trans*10 au sein du rumen des agneaux de l'essai 3 pourrait aussi expliquer ce constat.

La teneur en AG longs dans le rumen des agneaux conditionne le profil lipidique de leur viande. En effet lorsqu'ils sont absorbés au travers de la paroi intestinale, ces AG longs se retrouvent dans le gras inter et intramusculaire des agneaux et confèrent à la viande ses qualités nutritionnelles. Les modifications de ration opérées dans l'essai 2 et surtout le 1 de 2017 semblent avoir amélioré le profil en AG longs ruminiaux par rapport à celui des agneaux consommant des fibres longues. Le jus ruminal des agneaux des essais 1 et 2 était en effet moins riche en C14:0 et plus riche en C18:2n-6 que le jus ruminal des agneaux du lot témoin. L'essai 1 s'est distingué davantage encore par sa moindre teneur en C16:0 et sa plus grande richesse en C18:3n-3 que le lot témoin et l'essai 2. Le C14:0 et le C16:0 ont un rôle hypercholestérolémiant et leur consommation est à limiter (Yu et al. 1995). Une moindre teneur en ces AG chez les agneaux de l'essai 1 combinée à une plus grande richesse en C18:3n-3 au rôle cardio-protecteur et bénéfique face au cancer (Bougnoux, Chajès 2003; De Lorgeril, Salen, Martin 1998) est ainsi particulièrement intéressante pour les consommateurs attentifs à la valeur nutritionnelle des aliments qu'ils choisissent. Le C18:2n-6 exerce quant à lui un effet bénéfique en prévenant le risque de MCV (Anses 2011) mais aurait aussi un effet stimulant sur la croissance tumorale et la carcinogenèse (Rose et al. 1995; Carroll 1997). La teneur en cet AG doit ainsi ne pas être trop importante. Dans l'expérimentation de 2018 le pourcentage en C14:0, C16:0 et C18:0 s'est retrouvé diminué dans les essais 3 et 4 par rapport au lot témoin et celui en C18:2n6 et C18:3n-3 augmenté. Cela est également en faveur d'une amélioration du profil lipidique de la viande par rapport à celle des agneaux consommant des fibres longues malgré la diminution du taux de C18:0 dont l'effet est bénéfique face au risque d'athérosclérose (Anses 2011).

Pour l'ensemble des lots cependant le ratio $\omega 6/\omega 3$ a été relativement élevé et supérieur au seuil de recommandations de l'ANSES correspondant à 5 (Anses 2011). Un autre constat réalisé chez l'ensemble des agneaux a été un ratio $t10/t11$ très élevé. L'étude de ce ratio chez les individus du lot témoin de 2017 a toutefois montré une importante variabilité individuelle. La forte teneur en $t10$ -AG dans le jus ruminal est probablement à l'origine d'une viande d'agneau riche en tels AG dont les propriétés nutritionnelles ont été qualifiées de néfastes pour le consommateur puisque à l'origine notamment de diabète lipoatrogène (Roche et al. 2002). Ainsi l'ensemble des observations effectuées ne rend pas la viande des essais 1 et 2 moins intéressante d'un point de vue nutritionnel que celles des lots témoins. La richesse en C18:3n-3 de celle de l'essai 1 pourrait même la rendre préférable. Cette viande présente

cependant un profil lipidique qui reste critiquable par les consommateurs en raison de son ratio $\omega 6/\omega 3$ trop élevée et de sa trop grande richesse en $\text{t}10\text{-AG}$. Ces derniers sont présents en quantité trop importante dans le rumen des agneaux des essais 3 et 4 pour que leur viande soit préférable à celle des agneaux du lot témoin.

Une étude de Valdés et al. 2018 s'est intéressée à la relation entre le poids des agneaux à la naissance et le profil lipidique de leur viande après abattage. L'équipe a notamment observé que les agneaux présentant un poids vif à la naissance plus faible étaient abattus plus tardivement en raison d'un GMQ pendant les phases de croissance et d'engraissement moindre. Ils ont également noté que les carcasses de ces agneaux les plus légers comportaient une richesse en acides gras et notamment en AGS et AG mono-insaturés plus importante, ainsi qu'un ratio $\text{t}10/\text{t}11$ augmenté. Dans notre étude le poids initial des agneaux n'est pas connu. Si on prend le poids en début d'engraissement comme référence, un poids en début d'engraissement moins important n'a pas été associé à un ratio $\text{t}10/\text{t}11$ plus élevé d'après les régressions linéaires réalisées pour 2017 et 2018. La seule corrélation impliquant le poids en début d'engraissement a concerné le C16:1 dans l'expérimentation de 2017. Les résultats mis en évidence par Valdés et al. ne se retrouvent pas dans notre étude.

Ainsi les observations concernant les AG longs ruminiaux confirment la présence d'une acidose ruminale plus marquée chez les agneaux ayant consommé les rations des essais 3 et 4. Cette diminution de pH ruminal entraînerait une forte inhibition de l'isomérase réalisant la première étape de biohydrogénation du C18:2n-6 et une orientation des voies de biohydrogénation vers la synthèse d'AG- $\text{t}10$. La composition des aliments dans les essais de 2017 semble avoir été responsable d'un milieu ruminal plus favorable à la synthèse d'AG microbiens et à la lipolyse des lipides alimentaires que ne l'ont permis les rations des essais de 2018.

5. Microbiote ruminal

Le retrait des fibres longues dans les rations déjà riches en concentrés peut avoir eu des conséquences sur les populations bactériennes présentes dans le rumen (Khafipour et al. 2009; Mao et al. 2013; Tajima et al. 2000).

La comparaison des populations bactériennes des agneaux des différents lots de 2017 permet de faire ressortir l'essai 1 comme assurant un milieu ruminal plus diversifié que l'essai 2 et le lot témoin. La présence, chez les agneaux de l'essai 1, de nombreuses bactéries ruminales différant dans leur fonctionnalité et leur spécialisation serait favorable à un bon déroulement des dégradations bactériennes (Plaizier et al. 2017). La modification de nature des matières premières distribuées dans la ration de l'essai 1 par rapport à celle du lot témoin peut conduire à l'apport de nouveaux substrats dans le rumen permettant le développement

de nouvelles bactéries à l'origine d'une plus grande diversité (Petri et al. 2012). Cette plus grande diversité ne se retrouve pas chez les agneaux de l'essai 2. Par ailleurs le rapport des principaux phyla bactériens Bacteroidetes/Firmicutes s'est révélé être augmenté chez les agneaux du lot témoin et de l'essai 2 par rapport à ceux de l'essai 1. Cette augmentation serait en faveur d'un état acidotique ruminal plus important chez les agneaux concernés (Callaway et al. 2010). Les rations des essais 1 et 2 comportent toutes deux des levures vivantes en concentration identique (0,6% MB). La supplémentation en levures serait responsable d'une stabilisation du pH ruminal et d'une meilleure digestion des fibres (Desnoyers et al. 2009). Ces effets sont cependant fortement modulés par la MSI et la quantité de concentrés et NDF dans les rations. Dans notre étude la supplémentation en levures vivantes dans les lots d'essais s'est accompagnée d'autres modifications de composition de ration qui ne permettent pas d'attribuer les résultats observés à l'action unique des levures. Les seules différences entre les deux rations d'essais concernent la ration de l'essai 2 qui présente une teneur en bicarbonates augmentée par rapport à celle de l'autre essai (1,3% MB vs. 1% MB) et associe des parois de levures aux levures vivantes. Les résultats de l'essai 2 peuvent alors sembler surprenants, nous nous étions attendus à ce qu'ils soient similaires à ceux de l'essai 1 voire supérieurs. Ces résultats dégradés pourraient être attribués aux parois de levure qui semblent d'après les résultats être délétères pour le microbiote ruminal et les fermentations associées. Le choix d'ajouter des parois de levure a été fait car celles-ci permettent l'apport de MOS (mannan-oligosaccharides), des polysaccharides membranaires à effet prébiotique. Des études ont prouvé l'effet stimulant de ces glucides sur le système immunitaire et leur action favorable sur les bactéries pathogènes de l'intestin en les empêchant de se fixer à la muqueuse (Sohn et al. 2000). Cependant la majorité des études ont été réalisées sur des monogastriques et ont observé un effet bénéfique des MOS au niveau intestinal. Rahmani 2009 s'est intéressé à l'effet de l'ajout de levures entières seules, de MOS seuls ou de la combinaison des deux sur la digestion ruminale et la production de vaches Prim'Holstein en début de lactation. L'ajout de levures vivantes seules a révélé une amélioration de la digestion et une augmentation du taux butyreux du lait. L'ajout de MOS seuls ou la combinaison de MOS et levures entières n'a pas amélioré les performances des vaches laitières. Ainsi nos résultats s'accordent avec ces observations, l'utilisation de souches vivantes de levures (essai 1) aurait des effets favorables sur le milieu ruminal des agneaux et les populations bactériennes le peuplant mais ce ne serait pas le cas lorsque des parois de levures sont combinées (essai 2).

Si on s'intéresse à présent à l'expérimentation de 2018, le rapport Bacteroidetes/Firmicutes a été augmenté chez les agneaux de l'essai 3 ce qui traduit un état acidotique plus sévère que dans les deux autres lots. Par ailleurs, la population cellulolytique de *R. flavefaciens* a présenté une abondance relative significativement augmentée dans l'essai 4 par rapport au lot témoin et à l'essai 3. La composition de l'aliment finition dans l'essai 4 diffère de celui de l'essai 3 par la présence d'argile. Derradji et Ferhat en 2006 avaient étudié

les effets de la supplémentation en argile chez des moutons nourris avec de la paille et de l'orge. Ils avaient notamment constaté que l'utilisation d'argile permettait un maintien du pH proche de la neutralité et favorable à la dégradation des fibres. L'argile assurerait un pouvoir tampon en échangeant ses cations avec les anions du milieu ruminal et enrichirait ce même milieu en minéraux permettant à la flore cellulolytique d'adhérer aux particules végétales (Derradji, Ferhat 2006). L'argile exercerait ici un effet favorable sur le milieu ruminal des agneaux de l'essai 4. Cependant, contrairement à nos résultats, l'étude de Derradji et Ferhat a montré que la supplémentation en argile entraînait une orientation des fermentations ruminales vers la production de propionate et un abaissement du rapport C2/C3. Dans l'étude de Derradji et Ferhat, la ration comprenait une grande quantité de paille associée à de l'orge et conduisait majoritairement à la production de C2. Dans notre expérimentation au contraire la paille est en moindre quantité et distribuée avec des concentrés. La production de C3 est déjà importante et le ratio C2/C3 relativement bas. L'argile assurerait ici avant tout une meilleure dégradation des fibres par les bactéries cellulolytiques améliorant la production de C2 très faible avec une telle ration. Cette modification des fermentations par l'action de l'argile détériore le rendement énergétique en favorisant la production de C2 au détriment du C3 qui est glucoformateur. Ces modifications seraient toutefois trop faibles dans notre expérimentation pour être statistiquement visibles.

Aucune modification significative des populations de *Lactobacillus sp.* n'a été mise en évidence en 2017 et 2018 dans les essais sans fibres longues par rapport aux lots témoins. Par ailleurs, en s'intéressant à la richesse des principales espèces bactériennes cellulolytiques (*Ruminococcus flavefaciens*, *Ruminococcus albus*, *Fibrobacter succinogenes*) et amylolytiques (*Selenomonas ruminantium*, *Prevotella ruminicola*, *Prevotella albensis*, *Streptococcus sp.*) identifiées dans l'expérimentation conduite en 2017, le retrait des fibres longues de la ration n'a pas entraîné de diminution de la population des bactéries cellulolytiques et d'augmentation des amylolytiques. Dans l'expérimentation de 2018, les populations de *R. albus*, *S. ruminantium*, *P. ruminicola*, *B. fibrisolvans* ou encore *E. coli*. n'ont pas non plus connu de modification de leur abondance relative. Seule la population de *Ruminococcus flavefaciens* a vu sa taille augmenter dans l'essai 4 par rapport au lot témoin. La taille importante de cette population cellulolytique peut être mise en relation avec l'augmentation significative du pourcentage de C2 ruminal dans l'essai 4 par rapport au lot témoin.

Avec la diminution probable du pH ruminal dans les essais 3 et 4 nous nous serions attendus à voir une modification de l'abondance relative des populations précédentes (Li et al. 2014). Plaizier et al. 2017 avaient eux aussi constaté lors d'ARSA une absence de diminution des populations de bactéries cellulolytiques dans les fractions ruminales analysées malgré la chute de pH mise en évidence. Ils avaient attribué cela au fait que seule la fraction liquide avait été analysée alors que la majorité des bactéries cellulolytiques se retrouvent au niveau de la

fraction solide dans le rumen. La ration à l'origine de l'ARSA dans l'étude évoquée comportait des fibres longues. On peut imaginer que dans le cas de nos rations d'essais sans fibres longues, la différence d'abondance relative des populations bactériennes cellulolytiques est beaucoup moins marquée entre la phase solide et liquide que ce qu'ont pu observer Plaizier et al.. Petri et al. (2012) se sont eux aussi intéressés à la différence d'abondance relative de certaines populations bactériennes entre les phases solide et liquide mais chez des animaux nourris soit avec une ration riche en concentrés et comportant des fourrages (NDF 24,4% MS, peNDF 2,81% MS, amidon 48,9% MS), soit avec une ration riche en concentrés mais dépourvue de fourrages (NDF 21,8% MS, peNDF 0,81% MS, amidon 34,9% MS). Ils ont, quelle que soit la ration, constaté une abondance relative plus importante des bactéries cellulolytiques identifiées dans la fraction solide que dans la fraction liquide. Ce constat pourrait ainsi être valable dans le cas de nos rations d'essais sans fibres longues.

Petri et al. ont par ailleurs observé dans cette même étude une absence de différence d'abondance des populations identifiées entre les deux rations utilisées. Ils ont attribué cela à la richesse des deux rations en concentrés. Toutes les rations de nos expérimentations sont également riches en concentrés et fortement acidogènes. Les bactéries possèdent chacune une gamme de pH définie comme étant favorable à leur croissance. Même avec les rations des lots témoins comportant des fibres longues nous pouvons imaginer que le pH ruminal n'est plus dans la gamme de pH de croissance optimale des bactéries (6,5 pour *S. ruminantium* et 6,4 pour *S. bovis* qui tolèrent le mieux des pH acides (Therion, Kistner, Kornelius 1982)). La croissance de l'ensemble des populations serait fortement diminuée. Le retrait des fibres longues diminue le pouvoir tampon dans le rumen permis par la salivation. Il s'est toutefois accompagné dans notre expérimentation d'une augmentation de la quantité de NDF des aliments ce qui a offert davantage de substrats pour les bactéries fibrolytiques. Nous pouvons penser que le retrait des fibres longues associé aux changements d'aliment n'a entraîné que de faibles modifications de taille des populations bactériennes en comparaison de la situation déjà critique correspondant à celle des rations témoins. Les conséquences de ce retrait sur les populations bactériennes ne seraient pas visibles.

Il semble également important de ne pas s'intéresser seulement à l'action du pH ruminal sur la croissance bactérienne mais de prendre aussi en compte la nature et la quantité des substrats présents dans le milieu ruminal (Therion, Kistner, Kornelius 1982). Les quatre rations sans fibres longues étaient supplémentées en levures vivantes *Saccharomyces cerevisiae* en quantité identique. L'addition de levures aux rations des ruminants augmenterait la taille des populations cellulolytiques de *R. flavefaciens*, *R. albus* et dans une moindre mesure de *F. succinogenes* à l'origine d'une meilleure digestion des fibres (Mosoni et al. 2007). Ces résultats n'ont pas été observés ici (sauf pour la population de *R. flavefaciens* dans l'essai 4). Cela peut s'expliquer par la quantité et la diversité des changements de composition des rations des lots d'essais. La quantité d'amidon dans les rations d'essais de 2018 était bien

supérieure à celles des rations de 2017 et la teneur en NDF inférieure. Dans la ration de l'essai 2 des parois de levures ont été ajoutées et dans la ration de l'essai 4 c'est de l'argile qui a été apportée. L'ensemble de ces changements peut avoir affecté de manière diverse la croissance et l'activité des bactéries présentes. Les effets ont pu se compenser entre eux et ne pas avoir de répercussions visibles. Il semble ainsi difficile d'attribuer certaines observations à un élément particulier.

L'étude du microbiote ruminal a toutefois révélé chez certains agneaux un profil bactérien atypique par rapport aux autres agneaux du même lot que ce soit en 2017 ou 2018. Cette variabilité inter-individuelle avait déjà été évoquée par Jami, Mizrahi 2012 et Lopes et al. 2015 qui avaient constaté de fortes différences de diversité microbienne chez des vaches laitières recevant la même ration et se trouvant dans des conditions environnementales similaires. Cette variabilité individuelle en termes de diversité de microbiote s'est d'ailleurs montrée supérieure à l'effet du lot. Les changements de composition bactérienne observés étaient davantage liés à l'individu qu'au lot auquel il appartenait. Ce constat rejoint celui de Petri et al. (2012) qui avaient constaté que la variabilité individuelle masquait l'effet de l'alimentation sur les populations bactériennes identifiées dans le cadre de l'utilisation de rations riches en concentrés. Cette variabilité individuelle reflèterait les différences de capacités entre les individus à tolérer les changements de conditions ruminales associées aux changements alimentaires (Petri et al. 2012). L'ensemble des rations de notre expérimentation (avec ou sans fibres longues) conduit à des conditions ruminales peu propices au développement des espèces bactériennes identifiées. Le retrait des fibres longues associé au changement de composition de l'aliment distribué dans les lots d'essais perturberait cet équilibre précaire. On peut penser que selon les individus l'adaptation est plus ou moins bonne et les modifications en termes de microbiote ruminal varient.

Ainsi les conditions ruminales déjà difficiles chez les agneaux consommant des fibres longues ne conduisent à l'observation que de faibles modifications des populations bactériennes suite au retrait des fibres longues. Ce retrait est par ailleurs associé à de fortes variations de composition des aliments finition et donc de substrats pour les bactéries. Il ne nous est ainsi pas possible d'attribuer avec certitude un certain bénéfice à la supplémentation en levures vivantes ou en argile. L'incorporation des levures dans l'aliment de l'essai 1 aurait toutefois un effet plutôt favorable sur le milieu ruminal. Cet effet semble similaire pour l'argile même s'il est ici fortement masqué par la teneur importante de la ration de l'essai 4 en amidon.

B. Corrélations mises en évidence entre le poids et le GMQ des agneaux, les AG ruminiaux et certaines espèces bactériennes

La forte variabilité individuelle observée nous a conduits à établir des corrélations entre les performances zootechniques, le profil en AG dans le rumen ainsi que les bactéries ruminales des agneaux, indépendamment de leur lot d'appartenance.

Quels que soient les AG ou clusters bactériens impliqués dans les corrélations, leur lien de corrélation avec le Poids₃ est plus fort qu'avec les poids correspondant à d'autres périodes de l'engraissement. Cela est probablement dû au fait que les prélèvements de contenus ruminiaux ont été réalisés le jour de la pesée correspondant au Poids₃ lors de l'expérimentation de 2017 et seulement quelques jours après dans celle de 2018.

Il a été observé que plus le poids des agneaux en fin de période de démarrage ou en fin d'engraissement et plus le GMQ pendant la phase de démarrage sont importants, plus la teneur ruminale en C3 est élevée. Cet AGV est particulièrement intéressant et recherché pour l'engraissement en raison de son fort rendement énergétique et de sa contribution à la formation des triglycérides (Drogoul 2004). De manière logique le GMQ pendant le démarrage, le poids des agneaux à la fin de cette phase et en fin d'engraissement sont négativement corrélés au C2 et au ratio C2/C3.

Le GMQ pendant l'engraissement est également corrélé à certains AG longs. Plus les agneaux ont un GMQ élevé pendant l'engraissement, plus leur teneur ruminale en C18:2n-6 et C18:3n-3 est élevée et plus celle en C18:0 ainsi qu'en C18:1 μ 6 et C18:1 μ 11 (deux intermédiaires de la biohydrogénation du C18:2n-6 et du C18:3n-3) est diminuée. Ce dernier AG est également corrélé négativement avec le poids en fin d'engraissement.

On observe une coévolution entre ces différents éléments. Les conditions acidogènes liées aux rations utilisées dans nos expérimentations conduisent d'une part à une augmentation de la production de C3 qui est favorable à l'engraissement des agneaux. Ces conditions sont d'autre part responsables d'une diminution de la biohydrogénation à l'origine d'une augmentation des teneurs ruminales en C18:2n-6 et C18:3n-3 et d'un enrichissement de la viande en oméga 3 et 6.

Le GMQ pendant l'engraissement est également corrélé négativement avec le C16:0. Cela peut être mis en relation avec les corrélations négatives observées entre le taux ruminal de C16:1 et le poids des agneaux en début, milieu (au changement d'alimentation) et en fin d'engraissement.

Des corrélations ont également été établies entre le poids ou GMQ des agneaux et certaines espèces bactériennes. L'établissement de telles corrélations n'avait jamais été réalisé auparavant.

Une corrélation positive a été mise en évidence entre le poids en fin de phase de démarrage et d'engraissement et la richesse en une bactérie du genre *Prevotella*. Cette population bactérienne serait plus importante chez les agneaux les plus lourds. Un lien entre les bactéries du genre *Prevotella* et la sensibilité à l'ARSA ont été mis en évidence dans plusieurs études. Selon certains auteurs, un microbiote ruminal riche en *Prevotella* prédisposerait à la mise en place d'une ARSA dans des conditions permettant son développement et aggraverait sa sévérité une fois celle-ci établie (McCann et al. 2016; Mohammed et al. 2012). Les conclusions diffèrent dans les études de Khafipour et al. 2009 et Mao et al. 2013 pour qui les bactéries du genre *Prevotella* constitueraient une population protectrice face au risque d'ARSA. Le poids en fin d'engraissement est également corrélé positivement à une bactérie de la famille *Lachnospiraceae*. Dans nos expérimentations nous avons par ailleurs observé une corrélation négative entre le GMQ pendant le démarrage et une bactérie du genre *Treponema*. Selon l'étude de Mao et al. (2013) les vaches en situation d'ARSA présenteraient une diminution de l'abondance de leur population de bactéries du genre *Treponema*. Cette corrélation est là encore liée à une coévolution : les rations acidogènes contribuent à une augmentation de la teneur en C3 corrélée positivement au GMQ pendant la phase de démarrage. Or ces conditions acidogènes contribuent également à une diminution de la taille de population des bactéries du genre *Treponema*. Ces dernières sont donc corrélées négativement au GMQ pendant la phase de démarrage.

D'autres corrélations positives extrêmement fortes ont été mises en évidence entre le ratio C2/C3 ainsi que des clusters bactériens identifiés comme appartenant aux familles *Ruminococcaceae*, *Christensenellaceae*, *Rikenellaceae*, *Prevotellaceae* ainsi que des familles inconnues du groupe Bacteroidales. Les espèces bactériennes appartenant aux deux premières familles citées ont principalement une action fibrolytique et leur plus grande abondance est favorisée par la présence de fibres dans les rations (Kim et al. 2014). Ainsi, il n'est pas surprenant de constater que celles-ci sont plus abondantes lorsque beaucoup de C2 (AGV majoritaire lors de ration riche en fibres) est produit au détriment du C3 (AGV majoritaire lors de ration riche en concentrés). De manière logique une corrélation négative entre le taux de propionate et des bactéries de la famille *Ruminococcaceae* a été mise en évidence.

Des corrélations négatives ont également été établies entre le C18:1 ω 10 et les clusters bactériens évoqués précédemment. Il s'agirait là encore d'une coévolution liée aux conditions acidogènes dans lesquelles sont les agneaux de nos expérimentations.

C. Effets des rations sans fibres longues sur les performances zootechniques

L'étude des bactéries, AGV et AG longs ruminants a permis de visualiser les conséquences des rations sans fibres longues sur le milieu digestif. Toutefois les modifications d'alimentation et de litière testées dans ce projet doivent avant tout garantir les mêmes performances zootechniques que l'engraissement traditionnel.

Le GMQ des agneaux étudiés dans les différents lots ne consommant pas de paille n'a pas été modifié par rapport au GMQ des agneaux des lots témoins élevés dans des conditions classiques d'engraissement. La moyenne de GMQ des lots de 2017 et 2018 a été de 350g/j ce qui est même supérieur au GMQ moyen des agneaux de Roquefort à l'engraissement qui vaut 300g/j (Lamy 2018). Cette différence peut provenir du faible nombre d'animaux étudiés dans le projet.

La mortalité des agneaux s'est retrouvée pénalisée de deux pourcents chez les agneaux de l'essai 2 mais améliorée d'un pourcent pour l'essai 1 par rapport à la mortalité du lot témoin de la même année. En 2018 elle s'est retrouvée similaire à celle du lot témoin pour l'essai 3 et diminuée d'un pourcent dans l'essai 4. Les conséquences économiques d'une augmentation de la mortalité sont non négligeables et représentent une limite à l'utilisation d'une telle ration. La ration de l'essai 1, qui d'après l'ensemble des analyses semblait la plus favorable sur le plan digestif, est celle conduisant à la mortalité la plus faible. Cette mortalité est même diminuée par rapport au lot témoin ayant consommé des fibres longues. Nous ne disposons malheureusement pas de données concernant la morbidité des agneaux dans les différents lots et la nature des causes de mortalité. Nous ne pouvons pas associer une plus grande mortalité à des désordres digestifs liés à de l'acidose.

Un autre paramètre essentiel est le rendement carcasse. En effet l'objectif principal de l'engraissement des agneaux, même dans un tel projet, reste la valorisation de la carcasse. Le retrait des fibres longues des rations associé au changement d'alimentation a eu pour conséquence une diminution du rendement carcasse de près de 0,5 points pour l'ensemble des lots d'essai des deux années. Etant donné que les agneaux sont envoyés à l'abattoir selon l'évaluation visuelle de leur poids, le poids vif au moment de l'abattage est globalement similaire pour l'ensemble des agneaux. D'autres études ont constaté une différence de rendement carcasse entre des agneaux nourris à l'herbe ou avec des concentrés et présentant le même poids au moment de l'abattage. Priolo et al. 2002 et Diaz et al. 2002 ont observé une augmentation de la quantité de gras chez les carcasses d'animaux nourris avec des concentrés. Ils ont également remarqué que ces mêmes agneaux présentaient des carcasses plus lourdes que ceux nourris à l'herbe en raison d'un système digestif plus léger. Les animaux nourris avec des rations à base de fourrages auraient un système digestif plus développé pour

parvenir à des quantités de MSI importantes (Priolo et al. 2002). Pour un même poids vif au moment de l'abattage ils présenteraient alors une carcasse plus légère. Dans notre étude nous nous serions attendus à ce que les agneaux consommant de la paille sous forme de fibres longues aient le système digestif le plus lourd et un poids de carcasse moindre. Les résultats ne vont pas dans ce sens. L'étude des images scanner permettra peut-être de mettre en évidence des différences de volume ruminal ou d'épaisseur de gras dorsal entre les agneaux des différents lots. Les agneaux du lot témoin ont par ailleurs présenté une grande différence de poids de carcasse entre 2017 et 2018. Le poids de carcasse moyen en 2017 a été de 18,1 kg alors qu'il a été de 19,4 kg en 2018. Les relevés de température des mois de janvier 2017 et 2018 dans la zone géographique dans laquelle ont été engraisés les agneaux ont montré une différence entre les deux années. En 2017 les températures se sont échelonnées d'environ -5°C à +5°C avec une moyenne de 0°C. En 2018 les températures du même mois n'ont pas été négatives et ont oscillées autour de 5°C en allant de 3°C au plus froid à 10°C au plus chaud. Une partie de la diminution de 1,3kg du poids de carcasse moyen entre 2017 et 2018 pourrait s'expliquer par une consommation d'énergie des agneaux plus importante en 2017 pour assurer leur thermorégulation.

D. Bilan des essais alimentaires dans le cadre du projet Peau'Lux

En bilan nous pouvons dire que les résultats en termes de teneur ruminale en AGV et AG longs avec la ration de l'essai 1 ne sont pas dégradés par rapport à ceux des lots témoins ayant consommé la ration classiquement distribuée pendant l'engraissement. La teneur en τ 10-AG de la viande de ces agneaux reste trop importante mais la teneur en oméga 6 et oméga 3 semble davantage intéressante pour les consommateurs. La diversité du microbiote chez les agneaux de l'essai 1 semble également plus favorable que celle du lot témoin. Ces résultats nous montrent qu'il est possible d'engraisier des agneaux sans fibres longues sans trop compromettre leur santé digestive.

L'utilisation d'une telle ration sur le terrain n'est cependant envisageable que si elle est économiquement intéressante. Elle semble suffisamment équilibrée pour permettre une réduction de la mortalité mais est à l'origine d'une dégradation du rendement carcasse représentant un surcoût qui peut sembler minime à l'échelle d'un individu (1,75€) mais qui est important à l'échelle d'un lot et encore plus d'un élevage. Par ailleurs retirer les fibres longues de la ration uniquement ne semble pas suffisant pour améliorer la qualité des peaux. Il est nécessaire de remplacer la litière de paille par des granulés de litière végétale. L'utilisation importante de litière est à l'origine d'un surcoût excessif par rapport à l'engraissement classique et constitue la principale limite à la situation testée dans l'essai 1. Le poste alimentaire est finalement minime face aux autres postes de dépenses.

En raisonnant à l'échelle d'un lot, engraisser les agneaux en utilisant la ration de l'essai 1 et la litière végétale absorbante conduit à une perte de 7,03€ par agneau sorti en comparaison du système d'engraissement actuel. Il est ainsi nécessaire que la valorisation de la peau en filière luxe permette de dégager une marge réelle par agneau supérieure à celle permise par les systèmes d'engraissement actuels.

Une solution pour réduire les coûts d'élevage est de diminuer la consommation de litière. Dans ce sens il pourrait être intéressant de tester une ration sans fibres longues avec un aliment finition de composition similaire à celle de l'essai 1 (CB 15%, MAT 16%, amidon 24%, levures 0,6%, en %MB) mais possédant une concentration réduite en sels (0,3%MB) afin d'obtenir un environnement ruminal stable tout en diminuant l'émission d'urine salissant les litières. Il est toutefois conseillé de ne pas diminuer la concentration en bicarbonates et de les incorporer à hauteur de 1,5% de la MB pour assurer un pouvoir tampon suffisant au niveau du rumen (Sauvant, Giger-Reverdy 2015). De l'argile pourrait également être ajoutée à hauteur de 2% MB car elle a montré une action intéressante malgré son association à une forte teneur en amidon dans l'essai 4.

L'expérimentation que nous avons réalisée dans le cadre de ce projet comporte toutefois certains biais qu'il est nécessaire de relever.

- Tout d'abord l'absence de réalisation de mesures de pH ruminal est un réel manque. Cette mesure n'a pas pu être réalisée en raison de la contamination salivaire lors des prélèvements. Un dispositif avec des sondes de mesure de pH avait été prévu mais celles-ci avaient une taille trop importante pour pouvoir être utilisées sur les agneaux. Comme nous l'avons vu précédemment la connaissance du pH ruminal nous aurait permis de mettre en évidence les animaux en situation de sub-acidose ruminale.
- Une autre limite concerne la taille des échantillons dans les expérimentations de 2017 et 2018. Alors qu'en 2017 chaque lot comportait 12 agneaux, les lots de 2018 comportaient 38 agneaux pour le lot témoin et 40 agneaux pour l'essai 3 et pour l'essai 4. Cela pourrait générer des erreurs d'interprétation lors de la comparaison de résultats entre 2017 et 2018.
- Par ailleurs les résultats concernant les effets des rations sans fibres longues sur la santé digestive des agneaux n'ont malheureusement été obtenus qu'en fin de projet. Les choix de modifications de rations effectués pour les essais de 2018 n'ont ainsi pas pu prendre en compte les résultats concernant les modifications de profil en AG et de composition de microbiote des agneaux des essais de 2017. Seules les observations concernant le GMQ, l'IC, la mortalité des agneaux ainsi que l'ampleur des salissures de litière ont été utilisées pour la formulation des nouvelles rations de 2018. Il aurait été encore plus intéressant de se baser sur l'ensemble des résultats.

Le projet Peau'Lux dans lequel s'est inscrite cette étude a pour objectif d'améliorer la qualité des peaux d'agneau Lacaune pour pouvoir les utiliser dans l'industrie du luxe. Une des pistes présentée ici pour y parvenir a été le retrait de la paille sous forme de fibres longues dans la litière et l'alimentation. Nous pourrions aller plus loin en tentant de jouer sur l'alimentation pour améliorer la qualité des peaux. Cela n'a pas été envisagé dans le projet actuel car il s'agit d'un niveau d'investissement supérieur. Il serait en effet nécessaire de réaliser des profils métaboliques sur quelques individus pour évaluer leur statut en oligo-éléments et envisager des complémentations en zinc notamment. Ces analyses sont à l'heure actuelle encore très onéreuses et ne peuvent pas être utilisées en première intention dans un tel projet. La généralisation de leur réalisation rendra peut-être leur utilisation plus facile dans les années à venir.

Conclusion

Le bassin de Roquefort est connu pour sa production fromagère bénéficiant d'une AOC et d'une AOP. Cette activité laitière est génératrice de nombreux agneaux Lacaune qui, tout juste sevrés, sont dirigés vers des bergeries pour y être engraisés. Pendant toute la durée d'engraissement, de l'aliment et surtout de la paille sont distribués aux agneaux afin qu'ils se développent jusqu'à un poids de 30-32kg pour les femelles et 36-38kg pour les mâles. Lorsque leur poids et état d'engraissement sont jugés satisfaisants, les agneaux sont abattus puis leur carcasse est commercialisée. Les consommateurs français de viande d'agneau, de moins en moins nombreux, sont attentifs aux qualités organoleptiques et surtout nutritionnelles des produits qu'ils achètent. L'ensemble de ces caractéristiques est étroitement corrélé à l'alimentation consommée par les animaux. Les agneaux Lacaune qui sont nourris avec des concentrés possèdent une viande de goût peu prononcé et davantage appréciée par les consommateurs que les agneaux élevés à l'herbe. Elle est cependant moins riche en C18:3n-3 dont les effets bénéfiques sur la santé humaine ont pu être mis en évidence, et plus riche en AG-*trans*10 responsables de diabète lipoatrogène. Ce profil lipidique du gras de la viande d'agneau, à l'origine des propriétés de la viande, est étroitement lié aux dégradations réalisées par les bactéries ruminales. Les rations d'engraissement, riches en concentrés, sont responsables d'une production importante d'AGV et d'une chute de pH ruminal. Le risque majeur est la mise en place d'une subacidose ruminale dont les conséquences peuvent aller d'une simple perturbation des fermentations ruminales à une altération des performances et de la santé des animaux. Les fibres longues de paille composant la ration des agneaux sont importantes non pas pour leur valeur nutritionnelle mais pour la fibrosité qu'elles apportent à la ration. Elles permettent en effet une meilleure rumination des animaux à l'origine d'un fort pouvoir tampon ruminal et d'une bonne motricité ruminale limitant l'intensité de d'ARSA.

Le projet Peau'Lux, porté par la société d'engraissement Ovi Plateau Central, a pour objectif d'améliorer la qualité des peaux d'agneau Lacaune pour pouvoir les utiliser dans l'industrie du luxe. Une des pistes pour y parvenir est le retrait de la paille sous forme de fibres longues de la litière et de l'alimentation des agneaux. L'étude présentée dans cette thèse avait pour but de vérifier si ce retrait ne compromettrait pas les paramètres zootechniques et la qualité de la viande des agneaux à l'engraissement. L'association de granulés de paille à des céréales d'orge entier et un aliment finition de teneur diminuée en amidon, augmentée en cellulose brute et bicarbonates et enrichi en levures (amidon 24% MB, CB 15% MB, MAT 16% MB, levures 6% MB, bicarbonates 1% MB et sel 0,4% MB) permet d'obtenir un environnement ruminal stable et favorable à un bon déroulement des fermentations bactériennes. Le GMQ et la mortalité des agneaux ne sont pas détériorés ce qui n'est cependant pas le cas du rendement carcasse. Il semble ainsi possible d'engraisier des agneaux sans fibres longues en ne compromettant pas trop les performances zootechniques. Cependant, même si ce

changement alimentaire ne représente pas un surcoût majeur par rapport au système d'engraissement classique, la perte de rendement carcasse générée par cette nouvelle ration a malgré tout un impact économique important. Par ailleurs le retrait seul des fibres longues de la ration ne permettrait pas une amélioration suffisante de la qualité des peaux. Ce changement alimentaire doit être associé au remplacement de la litière de paille par de la litière végétale pour être efficace. Le coût de la litière est, davantage encore que la perte de rendement carcasse, à l'origine d'une perte économique importante par agneau sorti en comparaison du système d'engraissement actuel. L'utilisation en pratique de telles rations nécessite d'obtenir une plus-value sur les peaux supérieure aux coûts supplémentaires engagés pour parvenir à une telle qualité de cuir. Les résultats de l'ensemble des phases d'expérimentations (développement d'un outil de dépouille, de détection des défauts sur la chaîne, filmage des peaux) permettront de dresser un bilan du projet et de voir si une partie ou toutes ces nouvelles pratiques seront exploitables et exploitées sur le terrain.

Bibliographie

- ABDELKADER, C., et BOUJENANE, I., 2005. Performances d'engraissement et caractéristiques des carcasses des agneaux Boujaâd et Sardi au Maroc. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*. 1 avril 2005. Vol. 58, n° 4, pp. 267-272.
- ALHIDARY, I., ABDELRAHMAN, M. M., ALYEMNI, A. H., KHAN, Rifat U., AL-MUBARAK, A. H. et ALBAADANI, H. H., 2016. Characteristics of rumen in Naemi lamb: Morphological changes in response to altered feeding regimen. *Acta Histochemica*. 1 mai 2016. Vol. 118, n° 4, pp. 331-337.
- ALLEN, M. S., BRADFORD, B. J. et OBA, M., 2009. Board Invited Review: The hepatic oxidation theory of the control of feed intake and its application to ruminants. *Journal of Animal Science*. octobre 2009. Vol. 87, n° 10, pp. 3317-3334.
- ALLEN, M. S., 1997. Relationship between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber. *Journal of Dairy Science*. juillet 1997. Vol. 80, n° 7, pp. 1447-1462.
- ALLISON, M. J., BRYANT, M. P. et DOETSCH, R. N., 1958. Volatile fatty acid growth factor for cellulolytic cocci of bovine rumen. *Science (New York, N.Y.)*. 29 août 1958. Vol. 128, n° 3322, pp. 474-475.
- ALSEMGEEST, S. P., KALSBECK, H. C., WENSING, T., KOEMAN, J. P., VAN EDEREN, A. M. et GRUYS, E., 1994. Concentrations of serum amyloid-A (SAA) and haptoglobin (HP) as parameters of inflammatory diseases in cattle. *The Veterinary Quarterly*. mars 1994. Vol. 16, n° 1, pp. 21-23.
- ALVAREZ-RODRIGUEZ, J, MONLEON, E, SANZ, A, BADIOLA, J.J et JOY, M, 2012. Rumen fermentation and histology in light lambs as affected by forage supply and lactation length. *Research in Veterinary Science*. avril 2012. Vol. 92, n° 2, pp. 247-253.
- ANDRIES, J. I., BUYSSE, F. X., DE BRABANDER, D. L. et COTTYN, B. G., 1987. Isoacids in ruminant nutrition: Their role in ruminal and intermediary metabolism and possible influences on performances — A review. *Animal Feed Science and Technology*. 1 octobre 1987. Vol. 18, n° 3, pp. 169-180.
- ANSES, 2011. *Actualisation des Apports Nutritionnels Conseillés pour les acides gras*. Rapport d'expertise collective.
- ASCHENBACH, J. R., PENNER, G. B., STUMPF, F. et GÄBEL, G., 2011. Ruminant Nutrition Symposium: Role of fermentation acid absorption in the regulation of ruminal pH. *Journal of Animal Science*. avril 2011. Vol. 89, n° 4, pp. 1092-1107.
- AUROUSSEAU, B, BAUCHART, D, CALICHON, E, MICOL, D et PRIOLO, A, 2004. Effect of grass or concentrate feeding systems and rate of growth on triglyceride and phospholipid and their fatty acids in the *M. longissimus thoracis* of lambs. *Meat Science*. mars 2004. Vol. 66, n° 3, pp. 531-541.
- AUROUSSEAU, B et VIGNERON, P, 1995. Effects of grass versus grain on polyunsaturated fatty acids of intramuscular lipids in the lamb. *Ann Zootech*. 1995. Vol. 44, n° Suppl, pp. 292.
- BEAUCHEMIN, K. A., 2018. Invited review: Current perspectives on eating and rumination activity in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. juin 2018. Vol. 101, n° 6, pp. 4762-4784.

- BESSA, R.J.B., PORTUGAL, P.V., MENDES, I.A. et SANTOS-SILVA, J., 2005. Effect of lipid supplementation on growth performance, carcass and meat quality and fatty acid composition of intramuscular lipids of lambs fed dehydrated lucerne or concentrate. *Livestock Production Science*. septembre 2005. Vol. 96, n° 2-3, pp. 185-194
- BESSA, R. J. B., ALVES, S. P. et SANTOS-SILVA, J., 2015. Constraints and potentials for the nutritional modulation of the fatty acid composition of ruminant meat. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 1 septembre 2015. Vol. 117, n° 9, pp. 1325-1344.
- BLANCO, C., GIRÁLDEZ, F. J., PRIETO, N., BENAVIDES, J., WATTEGEDERA, S., MORÁN, L., ANDRÉS, S. et BODAS, R., 2015. Total mixed ration pellets for light fattening lambs: effects on animal health. *animal*. février 2015. Vol. 9, n° 02, pp. 258-266.
- BOUGNOUX, P., et CHAJÈS, V., 2003. A-linolenic acid et Cancer. In : THOMPSON, L et CUNNANE, L, *Flaxseed in human nutrition, 2nd Ed.* AOCS Press.
- CALLAWAY, E. S. et MARTIN, S. A., 1997. Effects of a *Saccharomyces cerevisiae* culture on ruminal bacteria that utilize lactate and digest cellulose. *Journal of Dairy Science*. Septembre 1997. Vol. 80, n° 9, pp. 2035-2044.
- CALLAWAY, T. R., DOWD, S. E., EDRINGTON, T. S., ANDERSON, R. C., KRUEGER, N., BAUER, N., KONONOFF, P. J. et NISBET, D. J., 2010. Evaluation of bacterial diversity in the rumen and feces of cattle fed different levels of dried distillers grains plus solubles using bacterial tag-encoded FLX amplicon pyrosequencing. *Journal of Animal Science*. 1 décembre 2010. Vol. 88, n° 12, pp. 3977-3983.
- CANNIZZO, F., et BROITMAN, S., 1989. Postpromotional Effects of Dietary Marine or Safflower Oils on Large Bowel or Pulmonary Implants of CT-26 in Mice. *Cancer Res*. août 1989. Vol. 49, pp. 4289-4294.
- CARROLL, K., 1997. The role of dietary fat in breast cancer. *Current Opinion in Lipidology*. février 1997. Vol. 8, pp. 53-56.
- CENTRE D'INFORMATION DES VIANDES, 2010. Valeurs Nutritionnelles Des Viandes Allez directement à l'essentiel. In : Interveb, Interprofession bétail et viande [en ligne]. [Consulté le 05 Septembre 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.civ-viande.org/wp-content/uploads/2012/12/chevalet-civ-18-03-10-bd-final-bis.pdf>
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA MANCHE, 2009. Produire des taurillons légers et jeunes. In : REUSSIR l'Agriculteur Normand [en ligne]. Janvier 2009. [Consulté le 30 Août 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.agriculteur-normand.com/actualites/viande-bovine-produire-des-taurillons-legers-et-jeunes:12A8JNMM.html>
- CHAMBRE SYNDICALE DE LA MEGISSERIE LAINIERE, 1991. La peau d'ovine française et ses facteurs possibles d'agression. Limoges. 28 Novembre 1991. 120p.
- CHAUCHEYRAS-DURAND, F. et FONTY, G., 2001. Establishment of cellulolytic bacteria and development of fermentative activities in the rumen of gnotobiotically-reared lambs receiving the microbial additive *Saccharomyces cerevisiae* CNCM I-1077. *Reproduction, Nutrition, Development*. février 2001. Vol. 41, n° 1, pp. 57-68.
- CHILLIARD, Y., GLASSER, F., ENJALBERT, F., FERLAY, A., BOCQUIER, F., SCHMIDELY, P., 2007. Données récentes sur les effets de l'alimentation sur la composition en acides gras du lait de vache, chèvre et brebis. *Renc. Rech. Rum.* Vol. 14, pp. 321-328.
- CHIN, S. F., LIU, W., STORKSON, J. M., HA, Y.L., PARIZA, M. W., 1992. Dietary sources of conjugated dienoic isomers of linoleic acid, a newly recognized class of anticarcinogens. *Journal of Food Composition and Analysis*. Septembre 1992. Vol. 5, n° 3, pp. 185-197.

- CNERMA-CNRS, 2001. *Apports nutritionnels conseillés pour la population française 3ème édition*. TEC&DOC. Paris.
- COMMISSION EUROPEENNE, 2008. Règlement (CE) N°1249/2008 DE LA COMMISSION du 10 décembre 2008 portant modalités d'application des grilles communautaires de classement des carcasses de bovins, de porcins et d'ovins et de la communication des prix y afférents. In: EUR-Lex | Access to European Union law [en ligne]. Décembre 2008. [Consulté le 17 Octobre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32008R1249>
- COUNOTTE, G. H. M., PRINS, R. A., JANSSEN, R. H. a. M. et DEBIE, M. J. A., 1981. Role of *Megasphaera elsdenii* in the Fermentation of dl-[2-13C]lactate in the Rumen of Dairy Cattle. *Appl. Environ. Microbiol.* 1 octobre 1981. Vol. 42, n° 4, pp. 649-655.
- CUVELIER, C., CABARAUX, J.F, DUFRASNE, I., ISTASSE, L., et HORNICK, J.L, 2005. Production, digestion et absorption des acides gras chez le ruminant. *Ann. Med. Vét.* 2005. Vol. 149, pp. 49-59.
- DE LORGERIL, M., SALEN, P., et MARTIN, J. L., 1998. Mediterranean Dietary Pattern in a Randomized Trial: Prolonged Survival and Possible Reduced Cancer Rate. *Arch Intern Med.* juin 1998. Vol. 158, n° 11, pp. 1181-1187.
- DERRADJI, O., et FERHAT, N., 2006. L'argile, source biologique améliorant le métabolisme du rumen. In : *Rencontres recherche ruminants*. 1 décembre 2006.
- DESNOYERS, M., GIGER-REVERDIN, S., BERTIN, G., DUVAUX-PONTER, C. et SAUVANT, D., 2009. Meta-analysis of the influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on ruminal parameters and milk production of ruminants. *Journal of Dairy Science*. avril 2009. Vol. 92, n° 4, pp. 1620-1632.
- DIAZ, M.-T., VELASCO, S., CAÑEQUE, V., LAUZURICA, S., RUIZ DE HUIDOBRO, F., PÉREZ, C., GONZALEZ, J. et MANZANARES, C., 2002. Use of concentrate or pasture for fattening lambs and its effect on carcass and meat quality. *Small Ruminant Research*. mars 2002. Vol. 43, n° 3, pp. 257-268.
- DIJKSTRA, J., ELLIS, J. L., KEBREAB, E., STRATHE, A. B., LÓPEZ, S., FRANCE, J. et BANNINK, A., 2012. Ruminant pH regulation and nutritional consequences of low pH. *Animal Feed Science and Technology*. 28 février 2012. Vol. 172, n° 1, pp. 22-33. DOI 10.1016/j.anifeedsci.2011.12.005.
- DOREAU, M., et CHILLIARD, Y., 1997. Digestion and metabolism of dietary fat in farm animals. *British Journal of Nutrition*. juillet 1997. Vol. 78, n° 01, pp. S15.
- DOREAU, M., DEMEYER, D. I. et VAN NEVEL, C. J., 1997. Transformations and effects of unsaturated fatty acids in the rumen. Consequences on milk fat secretion. In : WELCH, R.A.S., BURNS, D.J.W., DAVIS, S.R., POPAY, A.I. et PROSSER, C.G., *Milk composition, production and biotechnology* [en ligne]. Oxford (Royaume-Uni) : CAB International. pp. 73-92. [Consulté le 12 décembre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://prodinra.inra.fr/record/137137>
- DRAGOMIR, C., SAUVANT, D., PEYRAUD, J.-L., GIGER-REVERDIN, S. et MICHALET-DOREAU, B., 2008. Meta-analysis of 0 to 8 h post-prandial evolution of ruminal pH. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*. octobre 2008. Vol. 2, n° 10, pp. 1437-1448.
- DROGOUL, C., 2004. *Nutrition et alimentation des animaux d'élevage _ Tome 1*. Deuxième édition. Dijon : Educagri Editions.

EDWARDS, H. D., ANDERSON, R. C., TAYLOR, T. M., MILLER, R. K., HARDIN, M. D., NISBET, D. J., KRUEGER, N. A. et SMITH, S. B., 2013. Interactions between oil substrates and glucose on pure cultures of ruminal lipase-producing bacteria. *Lipids*. juillet 2013. Vol. 48, n° 7, pp. 749-755.

ELMORE, J. S., MOTTRAM, D. S., ENSER, M. et WOOD, J. D., 2000. The effects of diet and breed on the volatile compounds of cooked lamb. *Meat Science*. 2000. Vol. 55, n° 2, pp. 149–159.

ENITA DE BORDEAUX, 2002. *Productions animales hors-sol. Porcs, volilles et gibiers, lapins*. Troisième édition. Bordeaux : Synthèse Agricole. 978-2-910340-40-7

ENJALBERT, F., COMBES, S., ZENED, A. et MEYNADIER, A., 2017. Rumen microbiota and dietary fat: a mutual shaping. *Journal of Applied Microbiology*. octobre 2017. Vol. 123, n° 4, pp. 782-797.

ESCUDIÉ, F., AUER, L., BERNARD, M., MARIADASSOU, M., CAUQUIL, L., VIDAL, K., MAMAN, S., HERNANDEZ-RAQUET, G., COMBES, S., et PASCAL, G., 2018. FROGS: Find, Rapidly, OTUs with Galaxy Solution. *Bioinformatics (Oxford, England)*. 15 avril 2018. Vol. 34, n° 8, pp. 1287-1294.

FÉDÉRATION FRANÇAISE DE LA TANNERIE MÉGISSERIE, 2017. Qu'est-ce que le cuir ? *Fédération Française de la Tannerie Mégisserie | Promouvoir la qualité française, pérenniser et transmettre en savoir-faire inégalé* [en ligne]. 2017. [Consulté le 7 novembre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://leatherfrance.com/>

FERNANDO, S. C., PURVIS, H. T., NAJAR, F. Z., SUKHARNIKOV, L. O., KREHBIEL, C. R., NAGARAJA, T. G., ROE, B. A. et DESILVA, U., 2010. Rumen Microbial Population Dynamics during Adaptation to a High-Grain Diet. *Applied and Environmental Microbiology*. novembre 2010. Vol. 76, n° 22, pp. 7482-7490.

FIELD, C. J., BLEWETT, H. H., PROCTOR, S., et VINE, D., 2009. Human health benefits of vaccenic acid. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. octobre 2009. Vol. 34, n° 5, pp. 979-991.

FONT I FURNOLS, M., REALINI, C.E., GUERRERO, L., OLIVER, M.A., SAÑUDO, C., CAMPO, M.M., NUTE, G.R., CAÑEQUE, V., ÁLVAREZ, I., SAN JULIÁN, R., LUZARDO, S., BRITO, G. et MONTOSSI, F., 2009. Acceptability of lamb fed on pasture, concentrate or combinations of both systems by European consumers. *Meat Science*. janvier 2009. Vol. 81, n° 1, pp. 196-202.

FONT-I-FURNOLS, M., REALINI, C., MONTOSSI, F., SAÑUDO, C., CAMPO, M. M., OLIVER, M. A., NUTE, G. R. et GUERRERO, L., 2011. Consumer's purchasing intention for lamb meat affected by country of origin, feeding system and meat price: A conjoint study in Spain, France and United Kingdom. *Food Quality and Preference*. 1 juillet 2011. Vol. 22, n° 5, pp. 443-451.

FONTY, G., JOUANY, J. P., FORANO, E., GOUET, P., 1995. L'écosystème microbien du réticulo-rumen. In : *Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et Digestion*. Paris : Institut National de Recherche Agronomique. pp. 199-347.

FRANCEAGRIMER, 2018. *Le marché des agneaux de race laitière et leur place dans la filière viande ovine française*.

FRAYSSIGNES, J, 2007. L'AOC Roquefort: une filière emblématique. In : HERVIEU, B, *Identité et qualité des produits alimentaires méditerranéens*. Presses de Sciences Po. pp. 376.

GÄBEL, G, ASCHENBACH, J.R et MÜLLER, F, 2002. Transfer of energy substrates across the ruminal epithelium: Implications and limitations. *Animal Health Research Reviews*. juin 2002. Vol. 3, n° 1, pp. 15-30.

- GANDEMER, G., CHANTELOT, F., DUCHÈNE, C., DURAND, D. et BAUCHART, D., 2008. The nutritional quality of meats and offals differed deeply in cereal (indoor) and grass (outdoor) fed fattening lambs. *Proc. Int. Congr. Meat Sci. Technol.* Le Cap, Afrique du Sud. 10 août 2008.
- GARNER, M. R., GRONQUIST, M. R. et RUSSELL, J. B., 2004. Nutritional requirements of *Allisonella histaminiformans*, a ruminal bacterium that decarboxylates histidine and produces histamine. *Current Microbiology*. octobre 2004. Vol. 49, n° 4, pp. 295-299.
- GARRETT, E. F., PEREIRA, M. N., NORDLUND, K. V., ARMENTANO, L. E., GOODGER, W. J. et OETZEL, G. R., 1999. Diagnostic Methods for the Detection of Subacute Ruminal Acidosis in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 1 juin 1999. Vol. 82, n° 6, pp. 1170-1178.
- GLASSER, F., SCHMIDELY, P., SAUVANT, D. et DOREAU, M., 2008. Digestion of fatty acids in ruminants: a meta-analysis of flows and variation factors: 2. C18 fatty acids. *animal* [en ligne]. mai 2008. Vol. 2, n° 05. [Consulté le 13 décembre 2017]. DOI 10.1017/S1751731108002036. Disponible à l'adresse : http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1751731108002036
- GOROSITO, A. R., RUSSELL, J. B. et SOEST, P. J. Van, 1985. Effect of Carbon-4 and Carbon-5 Volatile Fatty Acids on Digestion of Plant Cell Wall In Vitro1. *Journal of Dairy Science*. 1 avril 1985. Vol. 68, n° 4, pp. 840-847.
- GOZHO, G. N., PLAIZIER, J. C., KRAUSE, D. O., KENNEDY, A. D. et WITTENBERG, K. M., 2005a. Subacute ruminal acidosis induces ruminal lipopolysaccharide endotoxin release and triggers an inflammatory response. *Journal of Dairy Science*. avril 2005. Vol. 88, n° 4, pp. 1399-1403
- GOZHO, G. N., PLAIZIER, J. C., KRAUSE, D. O., KENNEDY, A. D. et WITTENBERG, K. M., 2005b. Subacute ruminal acidosis induces ruminal lipopolysaccharide endotoxin release and triggers an inflammatory response. *Journal of Dairy Science*. avril 2005. Vol. 88, n° 4, pp. 1399-1403.
- GRAHAM, C., GATHERAR, I., HASLAM, I., GLANVILLE, M. et SIMMONS, N. L., 2007. Expression and localization of monocarboxylate transporters and sodium/proton exchangers in bovine rumen epithelium. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. février 2007. Vol. 292, n° 2, pp. R997-R1007.
- GRIINARI, J. M., CORL, B. A., LACY, S. H., CHOUINARD, P. Y., NURMELA, K. V. V. et BAUMAN, D. E., 2000. Conjugated Linoleic Acid Is Synthesized Endogenously in Lactating Dairy Cows by $\Delta 9$ -Desaturase. *The Journal of Nutrition*. 1 septembre 2000. Vol. 130, n° 9, pp. 2285-2291.
- GRUFFAT, D., RÉMOND, C., DURAND, D., LOREAU, O. et BAUCHART, D., 2008. 9cis,11trans conjugated linoleic acid (CLA) is synthesised and desaturated into conjugated 18:3 in bovine adipose tissues. *animal*. avril 2008. Vol. 2, n° 04, pp. 645-652.
- GRUNDY, S.M, 1994. Influence of stearic acid on cholesterol metabolism relative to other long-chain fatty acids. *Am J Clin Nutr*. décembre 1994. Vol. 60, n° 6 Suppl, pp. 986S-990S.
- GUTHMANN, J.-F, 2017. Arrêté du 17 mars 1992 relatif aux conditions auxquelles doivent satisfaire les abattoirs d'animaux de boucherie pour la production et la mise sur le marché de viandes fraîches et déterminant les conditions de l'inspection sanitaire de ces établissements. *Legifrance* [en ligne]. 1 décembre 2017. [Consulté le 17 octobre 2017]. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006060018>

HAZLEWOOD, G. et DAWSON, R. M., 1979. Characteristics of a lipolytic and fatty acid-requiring *Butyrivibrio* sp. isolated from the ovine rumen. *Journal of General Microbiology*. mai 1979. Vol. 112, n° 1, pp. 15-27.

HEINRICHS, J et JONES, C.M, 2013. Penn State Particle Separator. *Penn State Extension* [en ligne]. septembre 2013. [Consulté le 22 juin 2018]. Disponible à l'adresse : <https://extension.psu.edu/penn-state-particle-separator>

HUBER, T.L, 1976. Physiological Effects of Acidosis on Feedlot Cattle. *Journal of Animal Science*. octobre 1976. Vol. 43, n° 4, pp. 902-909.

IACONO, J.M et DOUGHERTY, R.M, 1991. Lack of effect of linoleic acid on the high-density-lipoprotein-cholesterol fraction of plasma lipoproteins. *The American Journal of Clinical Nutrition*. mars 1991. Vol. 53, n° 3, pp. 660-664.

IDELE et CNE, 2017. *Chiffres-clés Ovins Lait et Viande 2017* [en ligne]. [Consulté le 4 octobre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://idele.fr/domaines-techniques/economie/economie-des-filieres/publication/idelesolr/recommends/chiffres-cles-ovins-lait-et-viande-2017.html> chiffres clé production ovine jusqu'en 2016

IFIP, 2015. Résultats des élevages GTTT GTE. In : Institut du porc Recherche et Expertise pour la filière porcine [en ligne]. 2015. [consulté le 09 février 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.ifip.asso.fr/fr/resultats-economiques-gttt-graphique.html>

INAO, 2017. Fiche produit Roquefort. *INAO | Institut National de l'Origine et de la Qualité* [en ligne]. 23 novembre 2017. [Consulté le 24 février 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.inao.gouv.fr/produit/3291>

INSTITUT DE L'ELEVAGE ET RACES DE FRANCE, 2015. France Génétique Elevage - Lacaune viande. *France Génétique Elevage* [en ligne]. 20 octobre 2015. [Consulté le 21 novembre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://fr.france-genetique-elevage.org/Lacaune-viande.html>

INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2017a. Résultats de Contrôle Laitier - France 2016. *idele.fr* [en ligne]. 24 mars 2017. [Consulté le 8 février 2018]. Disponible à l'adresse : <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/resultats-de-contrôle-laitier-france-2016.html>

INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2017b. *L'élevage et la finition des agneaux | Aide au diagnostic et recommandations* [en ligne]. mars 2017. Disponible à l'adresse : file:///C:/Users/Lucie/Downloads/Plaque%20elevation%20et%20finition%20des%20agneaux_vdef_bdef.pdf

INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2018a. Un bâtiment spécialisé pour la finition des agneaux. *Inn'ovin* [en ligne]. 2018. [Consulté le 30 août 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.inn-ovin.fr/batiment-specialise-finition-agneaux-2/>

INSTITUT DE L'ELEVAGE, 2018b. Evaluer l'état d'engraissement des agneaux. *Institut de l'Elevage | Idele* [en ligne]. 16 mars 2018. [Consulté le 30 août 2018]. Disponible à l'adresse : http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/evaluer-letat-dengraissement-des-agneaux.html

IP, C, SINGH, M, THOMPSON, H.J et SCIMECA, J.A, 1994. Conjugated linoleic acid suppresses mammary carcinogenesis and proliferative activity of the mammary gland in the rat. *Cancer Res*. mars 1994. Vol. 54, n° 5, pp. 1212-1215.

JAMI, E., et MIZRAHI, I., 2012. Composition and Similarity of Bovine Rumen Microbiota across Individual Animals. *PLOS ONE*. 14 mars 2012. Vol. 7, n° 3, pp. e33306.

- JACQUES, M., 2007. Les agneaux engraissement et renouvellement. In : Une exploitation agricole en brebis lainières et agneaux calmels et le viailla 12400 [en ligne]. Février 2007. [Consulté le 06 Mars 2018]. Disponible à l'adresse : <http://brebislait.net/article-1835660.html>
- JENKINS, T. C., WALLACE, R. J., MOATE, P. J. et MOSLEY, E. E., 2008. Board-invited review: Recent advances in biohydrogenation of unsaturated fatty acids within the rumen microbial ecosystem. *Journal of Animal Science*. février 2008. Vol. 86, n° 2, pp. 397-412.
- JENKINS, T. C., 2010. Technical note: common analytical errors yielding inaccurate results during analysis of fatty acids in feed and digesta samples. *Journal of Dairy Science*. mars 2010. Vol. 93, n° 3, pp. 1170-1174.
- JIANG, F. G., LIN, X. Y., YAN, Z. G., HU, Z. Y., LIU, G. M., SUN, Y. D., LIU, X. W. et WANG, Z. H., 2017. Effect of dietary roughage level on chewing activity, ruminal pH, and saliva secretion in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. avril 2017. Vol. 100, n° 4, pp. 2660-2671.
- KAMANO, K, OKUYAMA, H, KONISHI, R et NAGASAWA, H, 1989. Effects of a high-linoleate and a high-alpha-linolenate diet on spontaneous mammary tumourigenesis in mice. *Anticancer Res*. décembre 1989. Vol. 9, n° 6, pp. 1903-1908.
- KAUFMAN, W, HAGEMEISTER, H et DURKSEN, G, 1980. Adaptation to changes in dietary composition level and frequency of feeding. In : *Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants*. AVI Publishing. Westport : Y. Ruckebusch et P. Thivend. pp. 587.
- KELLY, F.D, SINCLAIR, A.J, MANN, N.J, TURNER, A.H, ABEDIN, L et LI, D, 2001. A stearic acid-rich diet improves thrombogenic and atherogenic risk factor profiles in healthy males. *Eur J Clin Nutr*. février 2001. Vol. 55, n° 2, pp. 88-96.
- KHAFIPOUR, E., KRAUSE, D. O. et PLAIZIER, J. C., 2009. A grain-based subacute ruminal acidosis challenge causes translocation of lipopolysaccharide and triggers inflammation. *Journal of Dairy Science*. mars 2009. Vol. 92, n° 3, pp. 1060-1070.
- KHAFIPOUR, E., LI, Shucong, PLAIZIER, J. C. et KRAUSE, D. O., 2009. Rumen Microbiome Composition Determined Using Two Nutritional Models of Subacute Ruminal Acidosis. *Applied and Environmental Microbiology*. novembre 2009. Vol. 75, n° 22, pp. 7115-7124.
- KIM, J.H., KIM, Y., KIM, Y.J. et PARK, Y., 2016. Conjugated Linoleic Acid : Potential Health Benefits as a Functional Food Ingredient. *Annu. Rev. Food Sci. Technol*. 2016. Vol. 7, pp. 221-244.
- KIM, M., KIM, J., KUEHN, L. A., BONO, J. L., BERRY, E. D., KALCHAYANAND, N., FREETLY, H. C., BENSON, A. K. et WELLS, J. E., 2014. Investigation of bacterial diversity in the feces of cattle fed different diets. *Journal of Animal Science*. février 2014. Vol. 92, n° 2, pp. 683-694.
- KONONOFF, P. J., HEINRICHS, A. J. et BUCKMASTER, D. R., 2003. Modification of the Penn State forage and total mixed ration particle separator and the effects of moisture content on its measurements. *Journal of Dairy Science*. mai 2003. Vol. 86, n° 5, pp. 1858-1863.
- KOTT, R.W., HATFIELD, P.G., BERGMAN, J.W., FLYNN, C.R., VAN WAGONER, H. et BOLES, J.A., 2003. Feedlot performance, carcass composition, and muscle and fat CLA concentrations of lambs fed diets supplemented with safflower seeds. *Small Ruminant Research*. juillet 2003. Vol. 49, n° 1, pp. 11-17.
- KRAUSE, K. M., COMBS, D. K. et BEAUCHEMIN, K. A., 2002. Effects of forage particle size and grain fermentability in midlactation cows. I. Milk production and diet digestibility. *Journal of Dairy Science*. août 2002. Vol. 85, n° 8, pp. 1936-1946.

- KRAUSE, K. Marie et OETZEL, Garrett R., 2006. Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: A review. *Animal Feed Science and Technology*. 9 mars 2006. Vol. 126, n° 3-4, pp. 215-236.
- KRÖGER, I., HUMER, E., NEUBAUER, V., REISINGER, N., ADITYA, S. et ZEBELI, Q., 2017. Modulation of chewing behavior and reticular pH in nonlactating cows challenged with concentrate-rich diets supplemented with phytogetic compounds and autolyzed yeast. *Journal of Dairy Science*. décembre 2017. Vol. 100, n° 12, pp. 9702-9714.
- LAMY, Philippe, 2018. *Interview de M Philippe Lamy, directeur général de l'entreprise Ovi Plateau Central*. 28 juin 2018.
- LESSIRE, F et ROLLIN, F, 2013. L'Acidose Subaigüe du Rumen : une pathologie encore méconnue. *Ann. Med. Vét.* 2013. Vol. 157, pp. 82-98.
- LETTAT, A, 2011. *Efficacité et mode d'action des bactéries propioniques et/ou lactiques pour prévenir l'acidose latente chez les ruminants*. Ecole doctorale des Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement. Clermont-Ferrand : Blaise Pascal.
- LI, F, YANG, X.J., CAO, Y.C., LI, Xnkiller, YAO, J.H., LI, Zongjun et SUN, F.F., 2014. Effects of dietary effective fiber to rumen degradable starch ratios on the risk of sub-acute ruminal acidosis and rumen content fatty acids composition in dairy goat. *Animal Feed Science and Technology*. 1 mars 2014. Vol. 189.
- LOPES, L. D., DE SOUZA LIMA, A. O., TAKETANI, R. G., DARIAS, P., DA SILVA, L. R. F., ROMAGNOLI, E. M., LOUVANDINI, H., ABDALLA, A. L. et MENDES, R., 2015. Exploring the sheep rumen microbiome for carbohydrate-active enzymes. *Antonie Van Leeuwenhoek*. juillet 2015. Vol. 108, n° 1, pp. 15-30.
- LOURENÇO, M., RAMOS-MORALES, E. et WALLACE, R. J., 2010. The role of microbes in rumen lipolysis and biohydrogenation and their manipulation. *animal*. juillet 2010. Vol. 4, n° 07, pp. 1008-1023.
- MACFARLANE, G. T., GIBSON, G. R., BEATTY, E. et CUMMINGS, J. H., 1992. Estimation of short-chain fatty acid production from protein by human intestinal bacteria based on branched-chain fatty acid measurements. *FEMS Microbiology Letters*. 1 juillet 1992. Vol. 101, n° 2, pp. 81-88.
- MACH, N, DEVANT, M et BACH, A, 2006. Rumen Fermentation Parameters and Rumen Papillae Characteristics in Finishing Bulls as Affected by Nonfibrous Carbohydrate Level and Lipid Source of the Diet. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2006. Vol. 5, n° 3, pp. 220-225.
- MAO, S. Y., ZHANG, R. Y., WANG, D. S. et ZHU, W. Y., 2013. Impact of subacute ruminal acidosis (SARA) adaptation on rumen microbiota in dairy cattle using pyrosequencing. *Anaerobe*. 1 décembre 2013. Vol. 24, pp. 12-19.
- MARGUET, C., 2015. *Etude épidémiologique de l'acidose ruminale subaigüe dans les élevages bovins laitiers français : prévalence, persistance et lien avec la production laitière*. Thèse pour soutenir le grade de Docteur Vétérinaire. Nantes.
- MCCANN, J. C., LUAN, S., CARDOSO, F. C., DERAKHSHANI, H., KHAFIPOUR, E. et LOOR, J. J., 2016. Induction of Subacute Ruminal Acidosis Affects the Ruminal Microbiome and Epithelium. *Frontiers in Microbiology* [en ligne]. 18 mai 2016. Vol. 7. [Consulté le 22 octobre 2018]. DOI 10.3389/fmicb.2016.00701. Disponible à l'adresse : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4870271/>

- MEYNADIER, A., ZENED, A., FARIZON, Y., CHEMIT, M.-L. et ENJALBERT, F., 2018. Enzymatic Study of Linoleic and Alpha-Linolenic Acids Biohydrogenation by Chloramphenicol-Treated Mixed Rumen Bacterial Species. *Frontiers in Microbiology* [en ligne]. 3 juillet 2018. Vol. 9. [Consulté le 19 novembre 2018]. DOI 10.3389/fmicb.2018.01452. Disponible à l'adresse : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6037716/>
- MINUTI, A., AHMED, S., TREVISI, E., PICCIOLI-CAPPELLI, F., BERTONI, G., JAHAN, N. et BANI, P., 2014. Experimental acute rumen acidosis in sheep: consequences on clinical, rumen, and gastrointestinal permeability conditions and blood chemistry. *Journal of Animal Science*. septembre 2014. Vol. 92, n° 9, pp. 3966-3977.
- MOHAMMED, R., STEVENSON, D. M., WEIMER, P. J., PENNER, G. B. et BEAUCHEMIN, K. A., 2012. Individual animal variability in ruminal bacterial communities and ruminal acidosis in primiparous Holstein cows during the periparturient period. *Journal of Dairy Science*. novembre 2012. Vol. 95, n° 11, pp. 6716-6730.
- MOHARRERY, A., 2004. Effect of isoacids on some rumen enzymes. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 30 août 2004. Vol. 13, n° Suppl. 1, pp. 159-161.
- MONTOSSI, F., FONT-I-FURNOLS, M., DEL CAMPO, M., SAN JULIAN, R., BRITO, G. et SAÑUDO, C., 2013. Sustainable sheep production and consumer preference trends: Compatibilities, contradictions, and unresolved dilemmas. *Meat Science*. décembre 2013. Vol. 95, n° 4, pp. 772-789.
- MORA, O., ROMANO, J. L., GONZALEZ, E., RUIZ, F. et SHIMADA, A., 2000. Low cleavage activity of 15,15'-dioxygenase to convert beta-carotene to retinal in cattle compared with goats, is associated with the yellow pigmentation of adipose tissue. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*. septembre 2000. Vol. 70, n° 5, pp. 199-205.
- MOSONI, P., CHAUCHEYRAS-DURAND, F., BÉRA-MAILLET, C. et FORANO, E., 2007. Quantification by real-time PCR of cellulolytic bacteria in the rumen of sheep after supplementation of a forage diet with readily fermentable carbohydrates: effect of a yeast additive. *Journal of Applied Microbiology*. décembre 2007. Vol. 103, n° 6, pp. 2676-2685.
- MOZAFFARIAN, D et RIMM, E.B, 2006. Fish intake, contaminants, and human health : evaluating the risks and the benefits. *JAMA*. octobre 2006. Vol. 296, n° 15, pp. 1885-1899.
- NAGARAJA, T. G., BARTLEY, E. E., FINA, L. R., ANTHONY, H. D., BRENT, B. E. et SAPIENZA, D. A., 1979. Chemical characteristics of rumen bacterial endotoxin. *Journal of Animal Science*. mai 1979. Vol. 48, n° 5, pp. 1250-1256.
- NAGARAJA, T. G., BARTLEY, E. E., FINA, L. R. et ANTHONY, H. D., 1978. Relationship of rumen gram-negative bacteria and free endotoxin to lactic acidosis in cattle. *Journal of Animal Science*. décembre 1978. Vol. 47, n° 6, pp. 1329-1337.
- NAGARAJA, T. G. et LECHTENBERG, Kelly F., 2007. Acidosis in feedlot cattle. *The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice*. juillet 2007. Vol. 23, n° 2, pp. 333-350.
- NAKAYAMA, M, JU, H.R, SUGANO, M, HIROSE, N, UEKI, T, DOI, F et EYNARD, A.R, 1993. Effect of dietary fat and cholesterol on dimethylbenz[a]-anthracene-induced mammary tumorigenesis in Sprague-Dawley rats. *Anticancer Res*. mai 1993. Vol. 13, n° 3, pp. 691-698.
- NOCEK, J. E., 1997. Bovine acidosis: implications on laminitis. *Journal of Dairy Science*. mai 1997. Vol. 80, n° 5, pp. 1005-1028.

NORRISH, A.E., SKEAFF, C.M., ARRIBAS, G.L.B., SHARPE, S.J. et JACKSON, R.T., 1999. Prostate cancer risk and consumption of fish oils: a dietary biomarker-based case-control study. *Br J Cancer*. décembre 1999. Vol. 81, n° 7, pp. 1238-1242

OFFICE DES PUBLICATIONS OFFICIELLES DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 1993. Grille communautaire de classement des carcasses d'ovins. In : Web-agri [en ligne]. [consulté le 28 Février 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.web-agri.fr/finc/observatoire/marches_wa/pages_internes/classification/ovins/ovins.pdf

OWENS, F. N., SECRIST, D. S., HILL, W. J. et GILL, D. R., 1998. Acidosis in cattle: a review. *Journal of Animal Science*. janvier 1998. Vol. 76, n° 1, pp. 275-286.

OZUTSUMI, Y., TAJIMA, K., TAKENAKA, A., et ITABASHI, H., 2005. The effect of protozoa on the composition of rumen bacteria in cattle using 16S rRNA gene clone libraries. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. mars 2005. Vol. 69, n° 3, pp. 499-506.

PALMQUIST, D. L., ST-PIERRE, N. et MCCLURE, K. E., 2004. Tissue Fatty Acid Profiles Can Be Used to Quantify Endogenous Rumenic Acid Synthesis in Lambs. *The Journal of Nutrition*. 9 janvier 2004. Vol. 134, n° 9, pp. 2407-2414.

PENNER, G., ASCHENBACH, J. R., GÄBEL, G., RACKWITZ, R., et OBA, M., 2009. Epithelial Capacity for Apical Uptake of Short Chain Fatty Acids Is a Key Determinant for Intraruminal pH and the Susceptibility to Subacute Ruminal Acidosis in Sheep. *The Journal of Nutrition*. 1 septembre 2009. Vol. 139, n° 9, pp. 1714-1720.

PENNER, G., TANIGUCHI, Masaaki, GUAN, L., BEAUCHEMIN, K., et OBA, M., 2009. Effect of dietary forage to concentrate ratio on volatile fatty acid absorption and the expression of genes related to volatile fatty acid absorption and metabolism in ruminal tissue. *Journal of dairy science*. 1 juillet 2009. Vol. 92, pp. 2767-81.

PETRI, R. M., FORSTER, R. J., YANG, W., MCKINNON, J. J. et MCALLISTER, T. A., 2012. Characterization of rumen bacterial diversity and fermentation parameters in concentrate fed cattle with and without forage. *Journal of Applied Microbiology*. juin 2012. Vol. 112, n° 6, pp. 1152-1162.

PHILLIPSON, A T et MCANALLY, R A, 1942. Studies on the Fate of Carbohydrates in the Rumen of the Sheep. *Journal of Experimental Biology*. 28 juin 1942. Vol. 19, pp. 199-214.

PLAIZIER, J; C., LI, S; , TUN, H. M. et KHAFIPOUR, E., 2017. Nutritional Models of Experimentally-Induced Subacute Ruminal Acidosis (SARA) Differ in Their Impact on Rumen and Hindgut Bacterial Communities in Dairy Cows. *Frontiers in Microbiology* [en ligne]. 25 janvier 2017. Vol. 7. [Consulté le 15 juin 2018]. DOI 10.3389/fmicb.2016.02128. Disponible à l'adresse : <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2016.02128/full>

PLAIZIER, J.C, KHAFIPOUR, E, LI, S, GOZHO, G.N et KRAUSE, D.O, 2012. Subacute ruminal acidosis (SARA), endotoxins and health consequences - ScienceDirect. *Animal Feed Science and Technology*. février 2012. Vol. 172, n° 1-2, pp. 9-21.

PONCELET, J.-L., 2010. Production et engraissement des agneaux dans le Bassin de Roquefort. *Fiches ovines SNGTV* [en ligne]. novembre 2010. [Consulté le 4 octobre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://ovine.sngtv.pagesperso-orange.fr/Engraissement%20agneaux.pdf>

PRACHE, S., AUROUSSEAU, B., THERIEZ, M. et RENERRE, M., 1990. Les défauts de couleur du tissu adipeux sous-cutané des carcasses d'ovins. *INRA Productions Animales*. 1990. Vol. 3, n° 4, pp. 275-285.

PRIOLO, A., MICOL, D., AGABRIEL, J., PRACHE, S. et DRANSFIELD, E., 2002. Effect of grass or concentrate feeding systems on lamb carcass and meat quality. *Meat science*. 2002. Vol. 62, n° 2, pp. 179–185.

PRIOLO, A., MICOL, D., et AGABRIEL, J., 2001. Effects of grass feeding systems on ruminant meat colour and flavour. A review. *Animal Research*. 2001. Vol. 50, n° 3, pp. 185–200.

RAHMANI, H., 2009. Effect of Live Yeast and Mannan- oligosaccharides on Performance of Early- lactation Holstein Dairy Cows. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*. 1 janvier 2009.

RITZENTHALER, K. L., MCGUIRE, M. K., FALEN, R., SHULTZ, T. D., DASGUPTA, N. et MCGUIRE, M. A., 2001. Estimation of Conjugated Linoleic Acid Intake by Written Dietary Assessment Methodologies Underestimates Actual Intake Evaluated by Food Duplicate Methodology. *The Journal of Nutrition*. 1 mai 2001. Vol. 131, n° 5, pp. 1548-1554.

ROBELIN, J., THERIEZ, M., 1981. Fixation des protéines chez les ruminants : évolution en fonction du poids des animaux et variation selon la race, le sexe ou le niveau des apports alimentaires. *Reprod. Nutr. Dévelop.* 1981. Vol. 21, n° 2, pp. 335-353.

ROCHE, H. M., NOONE, E., SEWTER, C., BENNETT, S. Mc, SAVAGE, D., GIBNEY, M. J., O'RAHILLY, S., et VIDAL-PUIG, A. J., 2002. Isomer-Dependent Metabolic Effects of Conjugated Linoleic Acid: Insights From Molecular Markers Sterol Regulatory Element-Binding Protein-1c and LXR α . *Diabetes*. 1 juillet 2002. Vol. 51, n° 7, pp. 2037-2044.

ROSE, D.P, CONNOLLY, J.M, RAYBURN, J et COLEMAN, M, 1995. Influence of diets containing eicosapentaenoic or docosahexaenoic acid on growth and metastasis of breast cancer cells in nude mice. *J Natl Cancer Inst.* avril 1995. Vol. 87, n° 8, pp. 587-592.

ROSENBERGER, G., DIRKSEN, G., GRUNDER, H.-D., GRUNERT, E., KRAUSE, D., STOBBER, M. et MACK, R. (Translator), 1979. *Clinical examination of cattle*. [en ligne]. Berlin. [Consulté le 6 septembre 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19792242196>

ROWE, A, MACEDOB, F.A.F, VISENTAINERA, J.V., SOUZAA, N.E. et MATSUSHITAA, M., 1999. Muscle composition and fatty acid profile in lambs fattened in drylot or pasture. *Meat Science*. avril 1999. Vol. 51, n° 4, pp. 283-288.

RUSSELL, J. R. et HINO, T., 1985. Regulation of lactate production in *Streptococcus bovis*: A spiraling effect that contributes to rumen acidosis. *Journal of Dairy Science*. juillet 1985. Vol. 68, n° 7, pp. 1712-1721.

SAGOT, L. et POTTIER, E., 2012. Gras mou origines et solutions techniques.pdf. *Institut de l'Élevage | Idele* [en ligne]. 28 juin 2012. [Consulté le 17 octobre 2017]. Disponible à l'adresse : http://idele.fr/no_cache/recherche/publication/idelesolr/recommends/divers-fiches-idele-ciirpo.html

SAGOT, L, 2017. Semaine 14_2017/ Le chlorure d'ammonium pour limiter les risques de gravelle. *Inn'ovin | Site des partenaires de la production ovine en France* [en ligne]. avril 2017. [Consulté le 4 septembre 2018]. Disponible à l'adresse : http://www.inn-ovin.fr/actualite/semaine-14_2017-chlorure-dammonium-limiter-risques-de-gravelle/

SAKATA, T. et TAMATE, H., 1978. Rumen Epithelial Cell Proliferation Accelerated by Rapid Increase in Intraruminal Butyrate. *Journal of Dairy Science*. août 1978. Vol. 61, n° 8, pp. 1109-113.

SAKATA, T. et TAMATE, H., 1979. Rumen epithelium cell proliferation accelerated by propionate and acetate. *Journal of Dairy Science*. janvier 1979. Vol. 62, n° 1, pp. 49-52.

- SAUVANT, D., et GIGER-REVERDY, S., 2015. Approche quantitative de l'acidose chez les ruminants. *Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France*. 2015. N° 3, pp. 260.
- SCHLOSS, I, KIDD, M.S., TICHELAAR, H.Y., YOUNG, G.O. et O'KEEFE, S.J., 1997. Dietary factors associated with a low risk of colon cancer in coloured west coast fishermen. *South African Medical Journal*. février 1997. Vol. 87, n° 2, pp. 152-158.
- SCOTT, A et GARDNER, I.C, 1973. Papillar form in the forestomach of the sheep. *Journal of Anatomy*. novembre 1973. Vol. 116, n° 2, pp. 255-267.
- SHEN, Z, KUHLA, S, ZITNAN, R, SEYFERT, H.M, HAGEMEISTER, H, CHUDY, A, LÖHRKE, B, BLUM, J.W, HAMMOM, H.M et VOIGT, J, 2005. Intraruminal infusion of n-butyric acid induces an increase of ruminal papillae size independent of IGF-1 system in castrated bulls. *Archives of Animal Nutrition*. août 2005. Vol. 59, n° 4, pp. 213-225.
- SMITH, E. A. et MACFARLANE, G. T., 1998. Enumeration of amino acid fermenting bacteria in the human large intestine: effects of pH and starch on peptide metabolism and dissimilation of amino acids. *FEMS Microbiology Ecology*. 1 avril 1998. Vol. 25, n° 4, pp. 355-368.
- SOHN, K. S., KIM, M. K., KIM, J. D. et HAN, In K., 2000. The Role of Immunostimulants in Monogastric Animal and Fish - Review -. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 1 août 2000. Vol. 13, n° 8, pp. 1178-1187.
- STEELE, M. A., GREENWOOD, S. L., CROOM, J. et MCBRIDE, B. W., 2012. An increase in dietary non-structural carbohydrates alters the structure and metabolism of the rumen epithelium in lambs. *Canadian Journal of Animal Science*. juin 2012. Vol. 92, pp. 123-130.
- STENDER, S., ASTRUP, A., et DYERBERG, J., 2008. Ruminant and industrially produced trans fatty acids: health aspects. *Food & Nutrition Research* [en ligne]. 12 mars 2008. Vol. 52. [Consulté le 3 septembre 2018]. DOI 10.3402/fnr.v52i0.1651. Disponible à l'adresse : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2596737/>
- SUN, D.M, ZHU, W.Y, MAO, S.Y et LIU, J, 2018. Effect of starter diet supplementation on rumen epithelial morphology and expression of genes involved in cell proliferation and metabolism in pre-weaned lambs. *animal*. février 2018. pp. 1-10.
- SYNDICAT GÉNÉRAL DES CUIRS ET PEAUX, 2017. Qualité des Peaux | Amélioration en élevage. *Syndicat Général des Cuirs et Peaux* [en ligne]. 2017. [Consulté le 9 novembre 2017]. Disponible à l'adresse : <http://cuirsetpeaux.org/fr/>
- TAJIMA, K., ARAI, S., OGATA, K., NAGAMINE, T., MATSUI, H., NAKAMURA, M., AMINOV, R. I. et BENNO, Y., 2000. Rumen Bacterial Community Transition During Adaptation to High-grain Diet. *Anaerobe*. 1 octobre 2000. Vol. 6, n° 5, pp. 273-284.
- TERRE - NET, 2018. Grilles de cotations Ovins. *Web-agri* [en ligne]. 25 juin 2018. [Consulté le 27 février 2018]. Disponible à l'adresse : <http://www.web-agri.fr/ovins/359>
- THE REFERENCE ADVISORY GROUP ON FERMENTATIVE ACIDOSIS OF RUMINANTS, 2007. *Ruminal acidosis - understandings, prevention and treatment* [en ligne]. A review for veterinarians and nutritional professionals. [Consulté le 6 septembre 2018]. Disponible à l'adresse : https://www.ava.com.au/sites/default/files/documents/Other/RAGFAR_doc.pdf
- THERION, J. J., KISTNER, A. et KORNELIUS, J. H., 1982. Effect of pH on growth rates of rumen amyolytic and lactilytic bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. août 1982. Vol. 44, n° 2, pp. 428-434.

- TROEGELER-MEYNADIER, A., BRET-BENNIS, L., et ENJALBERT, F., 2006. Rates and efficiencies of reactions of ruminal biohydrogenation of linoleic acid according to pH and polyunsaturated fatty acids concentrations. *Reproduction, Nutrition, Development*. décembre 2006. Vol. 46, n° 6, pp. 713-724.
- TUAH, A. K. et TAIT, R. M., 1985. Protein metabolism of sheep fed formaldehyde treated forage supplemented with iso-acids and sulfur. *Nutrition reports international (USA)*. 1985. Vol. 32, pp. 892-900.
- UNNI, K. N., PRIJI, P., SAJITH, S., FAISAL, P. A. et BENJAMIN, S., 2016. Pseudomonas aeruginosa strain BUP2, a novel bacterium inhabiting the rumen of Malabari goat, produces an efficient lipase. *Biologia*. 2016. Vol. 71, n° 4, pp. 378–387.
- VALDÉS, C., SANTOS, A., FRUTOS, J., GIRALDEZ, F. J., et ANDRÉS, S., 2018. Effects of birth weight on meat fatty acid profile of fattening lambs. In : *Advances in Animal Biosciences | Herbivore nutrition supporting sustainable intensification and agro-ecological approaches*. Clermont-Ferrand : Cambridge University Press. septembre 2018.
- VAN NEVEL, C. J. et DEMEYER, D. I., 1996. Influence of pH on lipolysis and biohydrogenation of soybean oil by rumen contents in vitro. *Reproduction, Nutrition, Development*. 1996. Vol. 36, n° 1, pp. 53-63.
- WAHLE, K.-W., 1983. Fatty acid modification and membrane lipids. *Proc. Nutr. Soc.* 1983. Vol. 42, n° 2, pp. 273-287.
- WILLIAMS, A. G. et COLEMAN, G. S., 1992. *The rumen protozoa* [en ligne]. New York : Springer-Verlag. [Consulté le 6 septembre 2018]. ISBN 978-94-009-1453-7. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-94-009-1453-7_3
- YANG, W. Z. et BEAUCHEMIN, K. A., 2006. Increasing the physically effective fiber content of dairy cow diets may lower efficiency of feed use. *Journal of Dairy Science*. juillet 2006. Vol. 89, n° 7, pp. 2694-2704.
- YU, S, DERR, J, ETHEERTON, T D et KRIS-ETHEERTON, P M, 1995. Plasma cholesterol-predictive equations demonstrate that stearic acid is neutral and monounsaturated fatty acids are hypocholesterolemic. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 1 mai 1995. Vol. 61, n° 5, pp. 1129-1139.
- ZEBELI, Q., ASCHENBACH, J.R., TAJAJ, M., BOGUHN, J., AMETAJ, B.N. et DROCHNER, W., 2012. Invited review: Role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle. *Journal of Dairy Science*. mars 2012. Vol. 95, n° 3, pp. 1041-1056.
- ZHANG, Wangang, XIAO, Shan, SAMARAWEERA, Himali, LEE, Eun Joo et AHN, Dong U., 2010. Improving functional value of meat products. *Meat Science*. septembre 2010. Vol. 86, n° 1, pp. 15-31.
- ZHAO, X. H., ZHANG, T., XU, M. et YAO, J. H., 2011. Effects of physically effective fiber on chewing activity, ruminal fermentation, and digestibility in goats. *Journal of Animal Science*. 1 février 2011. Vol. 89, n° 2, pp. 501-509.
- ZYMO RESEARCH CORP., 2018. Quick-DNA™ Fecal/Soil Microbe. *ZYMO RESEARCH | The Beauty of science is to Make Things Simple* [en ligne]. 2018. [Consulté le 14 novembre 2018]. Disponible à l'adresse : <https://www.zymoresearch.eu/quick-dna-fecal-soil-microbe>

Annexe 1 : Mode opératoire du dosage des AGV dans le jus de rumen

Méthode utilisée pour déterminer la concentration des AGV dans le jus de rumen ainsi que dans les in vitro comme témoin fermentaire.



1. Principe de la méthode

Les acides gras volatils (AGV), contenus dans le jus de rumen, déprotéinisé puis dilué, sont dosés par chromatographie en phase gazeuse munie d'un détecteur à ionisation de flamme, selon une méthode de dosage par étalon interne.

2. Réactifs (chimiques et biologiques)

Tous les réactifs sont de qualité analytique.

- Acide métaphosphorique 25% (p/v)
- Etalons des AGV : acides acétique, propionique, butyrique et isobutyrique, valérique et isovalérique.
- Etalon interne : acide 4-méthylvalérique à 0.2% (v/v) : diluer 100 µl d'acide 4-méthylvalérique dans 50 ml d'eau ultra pure et soniquer la solution pour une meilleure solubilisation.

Réactif	Formule	N° CAS	Masse moléculaire (g/mol)	Point ébullition (°C)	Phrase de Risque	Phrase de Sécurité
Acide métaphosphorique	(HPO ₃) _n	37267-86-0			R34	S26
Acide acétique	C ₂ H ₄ O ₂	64-19-7	60,1	118	R10-35	S1/2-23-26-45
Acide propionique	C ₃ H ₆ O ₂	79-09-4	74,1	141	R10-34	S2-23-26
Acide isobutyrique	C ₄ H ₈ O ₂	79-31-2	88,1	154	R21/22	S26
Acide n-butyrique	C ₄ H ₈ O ₂	107-92-6	88,1	163	R34	S1/2-26-36-45
Acide isovalérique	C ₅ H ₁₀ O ₂	503-74-20	102,1	176	R34	S26
Acide n-valérique	C ₅ H ₁₀ O ₂	109-52-4	102,1	186	R34	S26-36
Acide 4-méthylvalérique	C ₆ H ₁₂ O ₂	646-07-1	116,1		R34	S26

3. Mode opératoire

- Prélèvement des échantillons de contenu ruminal

Déposer 5 ml d'échantillon de contenu ruminal dans un tube en polypropylène contenant 0,5 ml d'une solution à 25% (v/v) d'acide sulfurique concentré. Agiter le tube par retournement puis congeler immédiatement.

- **Préparation des échantillons**

Mettre à décongeler les échantillons, à température ambiante. Agiter manuellement les échantillons.

Centrifuger à 4000 tr/min et à 4°C pendant 20 min pour éliminer les particules grossières. Dans un microtube à centrifuger, déposer 200 µl d'acide métaphosphorique à 25% (p/v) puis 1 ml de surnageant. Agiter vigoureusement. Centrifuger à 14770 tr/min et à 4°C pendant 15 min (**extrait 1**).

Dans un flacon d'injection, déposer 75 µl d'étalon interne (acide 4-méthylvalérique à 0,2 % (v/v)), 900 µl d'eau et 100 µl du surnageant provenant de l'**extrait 1**.

Note :

Les AGV étant très volatils, il est préférable de traiter les échantillons par petites séries.

- **Préparation des solutions de calibration**

Préparer une solution mère contenant :

Acide acétique	30 g/l	soit	500 mmole/l
Acide propionique	12 g/l	soit	161,9 mmole/l
Acide isobutyrique	1,5 g/l	soit	17 mmole/l
Acide butyrique	11 g/l	soit	124,8 mmole/l
Acide isovalérique	2,0 g/l	soit	19,6 mmole/l
Acide valérique	1,5 g/l	soit	14,7 mmole/l
Acide 4-méthylvalérique (0.2% v/v)	1,84 g/l	soit	15,9 mmole/l (avec d = 0.922 g/ml)

Diluer cette solution mère afin d'obtenir les concentrations suivantes.

SOL	Dilution	Concentration des AGV (mmole/l)					
		Acide acétique	Acide propionique	Acide isobutyrique	Acide butyrique	Acide isovalérique	Acide valérique
A	1/200 ^{ème}	2,5	0,810	0,085	0,625	0,098	0,074
B	1/100 ^{ème}	5,0	1,620	0,170	1,250	0,196	0,147
C	1/50 ^{ème}	10,0	3,24	0,340	2,500	0,392	0,294
D	1/20 ^{ème}	25,0	8,1	0,850	6,250	0,98	0,735
E	3/20 ^{ème}	75,0	24,3	2,550	18,750	2,94	2,205
F	6/20 ^{ème}	150,0	48,6	5,1	37,5	5,88	4,410

Dans un micro tube à centrifuger, déposer 200 µl d'acide métaphosphorique puis 1 ml de chaque point de gamme (**SOL A à F**). Agiter vigoureusement.

Dans un flacon d'injection, déposer 75 µl d'étalon interne (acide 4-méthylvalérique), 100 µl du mélange préparé ci-dessus et 900 µl d'eau.

- **Conditions chromatographiques (privilégier le mode splitless)**

Attention : injecter en mode split avec un injecteur splitless donne des résultats non répétables.

Les échantillons sont analysés par chromatographie en phase gazeuse munie d'un détecteur à ionisation de flamme (CPG/FID).

Appareillage

Chromatographe en phase gazeuse : 7890A Agilent Technologies
Passeur automatique d'échantillons : 7683B Agilent Technologies

Acquisition du signal

Module d'acquisition (UCI-50, Dionex)
Logiciel d'acquisition : Chromquest (version 6.60 build 1428, Dionex)

Injection en mode splitless (front inlet)

Liner HP : 5062-3587
Volume injecté : 1 µl
Solvant de rinçage A : méthanol
Solvant de rinçage B : eau ultra-pure

NB : l'injection en mode split (utilisation d'un liner 5183-4711) donne des résultats non répétables.

Séparation

Température de l'injecteur : 250 °C.
Gaz vecteur : azote
Débit du gaz vecteur : 4 ml/min

Colonne : Alltech EC-1000 (PEG Acid Modified) : L=15 m, dc =
0.53 mm et épaisseur de film : 1.2 µm
Programmation de température : 100°C (5 min) 6°C/min 148°C 20°C/min 188°C (6 min)

Détection FID

Température du détecteur : 250 °C.
Débit du make-up : 8 ml/min
Débit d'hydrogène : 35 ml/min
Débit d'air : 350 ml/min

Dans ces conditions chromatographiques, le temps de rétention est de 3.99 min pour l'acide acétique, 5.03 min pour l'acide propionique, 5.38 min pour l'acide iso butyrique, 6.24 min pour l'acide butyrique, 6.82 min pour l'acide iso valérique, 7.85 min pour l'acide valérique et 8,72 min pour l'acide méthyle-4 iso valérique.

4. Expression des résultats

Les concentrations en AGV sont exprimées en millimoles par litre. Pour prendre en compte la dilution engendrée par l'ajout de chlorure mercurique dans le jus de rumen, il faut multiplier par 5,5 et diviser par 5 pour avoir la concentration exacte de chaque AGV dans le jus de rumen.

5. Références bibliographiques

Playne M.J. (1985). Determination of ethanol, fatty acids, lactic acid and succinic acid in fermentation liquids by gas chromatography. *J.SCI.Food Agric.* 36 : 638-644

Annexe 2 : Mode opératoire du dosage des AG longs

Station d'acquisition et traitement du signal

SLI

Logiciel de retraitement : peakwin (version 3.28)



1. Réactifs et solvants utilisés

Solvants	qualité	Fournisseur, référence
Méthanol	HPLC grade	Fisher Scientific, M/4056/15
Hexane	HPLC grade	Fisher Scientific, H/0406/15
Dichlorométhane	Multisolvant	Scharlau
Eau	ultra-pure	Système Pur1te select
Standard interne	qualité	Fournisseur, référence
Acide nonadécanoïque (C19:0)	Standard for GC	Fluka, 72332 5 g
Filtres, cartouches		
Hydroxyde de sodium	Pour analyses	Fisher Scientific, S/4920/60
Acétylchlorure	analytical reagent grade	Fisher Scientific, A/0920/PB05
K ₂ CO ₃	qualité analytique	Merck, 104298.1000

- **Extraction méthylation in-situ.**

Dans un tube en verre Pyrex, muni d'un bouchon à vis, peser environ 100mg* (entre 95 et 100mg) d'extrait « in vitro » lyophilisé.

Déposer dans le tube, à l'aide d'une micropipette « Transferpettor Fix », 200 µl de standard interne (4 mg/ml de C19:0 dans le dichlorométhane) et 200 µl de dichlorométhane. Le standard doit être conservé au congélateur et maintenu à température ambiante avant pipetage. Pour l'ajout de standard interne, il est recommandé d'utiliser une micropipette en verre pour une meilleure précision des prélèvements.

- **Dérivation en milieu basique (dérivation des triglycérides/ transestérification).**

A l'aide d'une pipette à répétition « HandyStep® » muni d'un « Combitips », ajouter 2 ml de soude méthanolique à 0.5M (1 g pour 50 ml), préparée extemporanément. Boucher fermement le tube à centrifuger pour éviter toute évaporation de composés méthylés. Agiter à l'aide d'un vortex pendant une durée de 60 secondes à la vitesse de 1000 tr/min.

Laisser réagir pendant 10' à 50°C dans un bain thermostaté. Refroidir le tube pendant 7 minutes dans un bain d'eau froide.

- **Dérivation en milieu acide (dérivation des acides gras libres et des phospholipides).**

A l'aide d'une pipette à répétition HandyStep® muni d'un Combitips, ajouter dans le tube, 3 ml d'acétylchlorure à 10% préparé extemporanément. Agiter à l'aide d'un vortex pendant une durée de 60 secondes à la vitesse de 1000 tr/min.

Laisser réagir pendant 10' à 80°C dans un bain thermostaté. Refroidir le tube pendant 7 minutes dans un bain d'eau froide.

A l'aide d'une pipette à répétition HandyStep® muni d'un Combitips, ajouter délicatement 5 ml d'une solution de K₂CO₃ à 6% (p/v), préparée extemporanément puis 1,6 ml d'hexane HPLC. Prendre des précautions lorsque le K₂CO₃ est déposé dans le tube, car au contact de l'acétylchlorure, une effervescence se produit.

Agiter le tube rapidement à la main puis pendant 5 min, à l'aide d'un agitateur rotatif. Centrifuger à 4000 tr/min pendant 10 min à une température de 10°C. Prélever délicatement une partie de la phase supérieure puis la répartir dans 2 flacons ambrés.

Attention, l'opération de prélèvement final est délicate. Il ne faut surtout pas prélever de la phase aqueuse inférieure, néfaste pour la colonne chromatographique.

L'extrait final présente une concentration en matrice de 0,05 g d'extrait/ml de solvant. Injecter en CPG/FID

2. Dosage par chromatographie en phase gazeuse.

Les extraits sont dosés par chromatographie gazeuse couplée à une détection par ionisation de flamme (CPG/FID) selon 2 méthodes chromatographiques afin de séparer au mieux tous les C18:1 cis et trans ainsi que les CLA :

Les conditions opératoires sont les suivantes :

- **Méthode 2 (in-vitro)**

Acquisition des données

Module d'acquisition (Model 202, SRI Instruments)

Logiciel d'acquisition (PeakSimple : version 2.83)

Injection

injecteur automatique : 7683 Series AGILENT technologies

split ratio : 50

T° injecteur : 255°C

Pression : 118 kPa (à 60°C)

Séparation

chromatographe en phase gazeuse : 6890N AGILENT technologies

gaz vecteur : hydrogène (débit 1 ml/min) **débit constant**

volume injecté : 1 µl (split)

chromatographe : AGILENT 6890N avec détecteur FID

colonne : CP7489 : WCOT fused silica CP-Sil88 100 m, ø interne 0,25 mm, épaisseur phase stationnaire 0.2 µm

T° colonne : départ: 60°C (2 min) gradient 8°C/min 150°C (12 min) 2°C/min 175°C (20 min) 5°C/min 225°C (10 min) 5°C/min 240°C (10 min)

Dosage

T° détecteur : 260°C

Débit des gaz vecteur : H₂: 35 ml/min et débit Air : 400 ml/min

Front Inlet :	split
Temp :	255°C
Pression :	118 (à 60°C)
Split ratio :	50
Split flow :	20
Total flow :	28.6
Gas saver :	ON
Saver flow :	20
Saver time :	2'

Front injector :	1
Sample pumps :	4
Viscosity delayt :	0
Sample washs :	2
Solvent A washs :	3
Solvent B washs :	3
Slow plunger :	off
Pre dwell time :	0.03
Post dwell time :	0.01
Samp offset :	0.0
Solv A pre wash	Hexane
Solv B pre wash	MeOH

Front detector

Temp :	260°C
H2 flow :	35
Air flow /	400
MoDe Const Make-up	
Mkup N2	25
Flame	ON
Output	5.8

- **Méthode 9 (in-vitro)**

Acquisition des données

Module d'acquisition (Model 202, SRI Instruments)

Logiciel d'acquisition (PeakSimple : version 2.83)

Injection

injecteur automatique : 7683 Series AGILENT technologies

split ratio : 50

T° injecteur : 255°C

Pression : 150 kPa

Séparation

chromatographe en phase gazeuse : 6890N AGILENT technologies

gaz vecteur : hydrogène (débit 1 ml/min) **pression constante**
volume injecté : 1 µl (split)
chromatographe : AGILENT 6890 avec détecteur FID
colonne : WCOT fused silica CP-Sil88 100 m, ø interne 0,25 mm, épaisseur phase stationnaire 0.2 µm
T° colonne : départ: 60°C (3min) gradient 8°C/min 190°C (13 min) 5°C/min 225°C (10 min)
10°C/min 230°C (1 min)

Dosage

T° détecteur : 260°C
Débit : H₂: 35 ml/min et débit Air : 400 ml/min

3. Bibliographie

La méthode utilisée entre 2007 et 2013 (Park et Goin modifiée) a mis en évidence sur certaines expérimentations des problèmes de quantification de certains AG dans des échantillons in-vitro.

C'est pourquoi, nous avons décidé d'améliorer l'ancienne méthode et d'utiliser la méthode de Jenkins.

Cette nouvelle méthode est tirée de :

- Jenkins, T. C. (2010) "Technical note: Common analytical errors yielding inaccurate results during analysis of fatty acids in feed and digesta samples." Journal of Dairy Science **93** (3): 1170-1174.
- Sukhija, P. S. and D. L. Palmquist (1988). "Rapid method for determination of total fatty acid content and composition of feedstuffs and feces." Journal of Agricultural and Food Chemistry **36**(6): 1202-1206.

Annexe 3 : Mode opératoire d'extraction du microbiote

Guide d'utilisation du Quick-DNA™ Fecal/Soil Microbe 96 Kit
(Zymo Research Corp. 2018)



ZYMO RESEARCH

The Beauty of Science is to Make Things Simple

1. Highlights

- Rapid, high-throughput (96-well) method for the isolation of inhibitor-free, PCR-quality DNA from microbes including Gram positive and negative bacteria, fungi, algae, protozoa, etc. in fecal and soil samples in as little as 50 minutes.
- State-of-the-art, ultra-high density **BashingBeads™** are fracture resistant and chemically inert.
- Omits the use of organic denaturants as well as proteinases.

2. Product Contents

Quick-DNA™ Fecal/Soil Microbe 96 Kit (Kit Size)	D6011 (2x96 preps.)	Storage Temperature
ZR BashingBead™ Lysis Rack (0.1 & 0.5 mm)	2	Room Temp.
Lysis Solution	(2) 40 ml	Room Temp.
Genomic Lysis Buffer¹	150 ml	Room Temp.
DNA Pre-Wash Buffer²	50 ml	Room Temp.
g-DNA Wash Buffer	100 ml	Room Temp.
DNA Elution Buffer	(2) 10 ml	Room Temp.
Prep Solution (DNase/RNase-Free)	30 ml	Room Temp.
Deep-Well Block	2	Room Temp.
Silicon-A™ Plate	2	Room Temp.
Silicon-A™-HRC Plate	2	Room Temp.
Collection Plate	2	Room Temp.
Elution Plate	6	Room Temp.
Cover Foil	4	Room Temp.
Instruction Manual	1	-

Note - Integrity of kit components is guaranteed for up to one year from date of purchase. Reagents are routinely tested on a lot-to-lot basis to ensure they provide maximal performance and reliability.

¹For optimal performance, add beta-mercaptoethanol to 0.5%(v/v) i.e., 750 µl per 150 ml.

² A precipitate may have formed in the DNA Pre-Wash Buffer during shipping. To completely resuspend the buffer, incubate the bottle at 30 – 37 °C for 30 minutes and mix by inversion. DO NOT MICROWAVE.

3. Specifications

- **Format** – Bead Beating, 96-Well Plate Purification.
- **Sample Sources** – Host, bacterial, fungal, algal, protozoan, viral DNA can be isolated from ≤ 80 mg sample of mammalian feces or ≤ 135 mg soil. Additionally, 10 – 20 mg (wet weight) fungal/bacterial cells³ can be processed.
- **DNA Purity** – High quality, inhibitor-free DNA is eluted with **DNA Elution Buffer** suitable for the amplification of bacterial, protist, and/or mammalian templates ($A_{260}/A_{280} > 1.8$).
- **DNA Size Limits** – Capable of recovering genomic DNA sized fragments from 100 bp to ≥ 40 kb. Typical fragment sizes range from 25 kb - 35 kb. If present, parasitic and viral DNA will also be recovered.
- **DNA Recovery** – Typically, up to 5 μ g total DNA is eluted into 100 μ l (50 μ l minimum) **DNA Elution Buffer** per sample.
- **Equipment** – Centrifuge w/ microplate carrier, 96-well plate/block disruptor or pulverizer.

4. Product Description

The **Quick-DNA™ Fecal/Soil Microbe 96 Kit** is designed for the simple, rapid, and high-throughput (96-well) isolation of inhibitor-free, PCR-quality DNA from a variety of fecal (including humans, birds, rats, mice, cattle, etc.) and soil (including clay, sandy, silty, peaty, chalky, and loamy soils) samples. The kit can be used to successfully isolate DNA from tough-to-lyse Gram positive and negative bacteria, fungi, algae, protozoa, etc. that inhabit fecal and soil samples. The procedure is easy and can be completed in as little as 50 minutes: fecal samples (≤ 80 mg each) or soil samples (≤ 135 mg) are added directly to a **ZR BashingBead™ Lysis Rack (0.1 & 0.5 mm)** and rapidly and efficiently lysed by bead beating (e.g., 2010 GenoGrinder®, Page 6) without the use of organic denaturants or proteinases. The DNA is then isolated and purified using our Zymo-Spin™ Technology, which is subsequently filtered to remove PCR inhibitors. The DNA is ideal for downstream molecular-based applications including PCR, arrays, genotyping, etc. A schematic of the **Quick-DNA™ Fecal/Soil Microbe 96 Kit** procedure is shown below.

5. Protocol

For optimal performance, add beta-mercaptoethanol (user supplied) to the **Genomic Lysis Buffer** to a final dilution of 0.5%(v/v) i.e., 750 μ l per 150 ml.

1. Add ≤ 80 mg of fecal sample or ≤ 135 mg of soil to the tubes of a **ZR BashingBead™ Lysis Rack (0.1 & 0.5 mm)**. Add 400 μ l **Lysis Solution** to each tube. Cap tubes tightly to prevent leakage.

Note: Alternatively, add 10-20 mg (wet weight) fungal and/or bacterial cells¹ that have been resuspended in up to 50 μ l of water or isotonic buffer (e.g., PBS) to the tubes of a ZR BashingBead™ Lysis Rack.

2. Secure in a 96-well block/plate bead beater (e.g., 2010 GenoGrinder®) and process samples. Optimization of processing time/speed will be necessary for complete sample lysis.

Note: Processing times may be as little as one minute when using high-speed cell disrupters

3. Centrifuge the ZR BashingBead™ Lysis Rack (0.1 & 0.5 mm) at $\geq 3,000 \times g$ (5,000 $\times g$ max.) for 5 minutes.
4. Transfer up to 250 μl supernatant to each well of a **96-Well Block**.
5. Add 750 μl of **Genomic Lysis Buffer** to the supernatant in the 96-Well Block from Step 4. Cover completely with **Cover Foil** and mix thoroughly by vortexing for 2 minutes. Centrifuge the 96-Well Block at $\geq 3,000 \times g$ (5,000 $\times g$ max.) for 5 minutes.
6. Remove or pierce foil and transfer 500 μl from the wells of Step 5 to the wells² of a **Silicon-A™ Plate**, mounted on a **Collection Plate**. Centrifuge the assembly at $\geq 3,000 \times g$ (5,000 $\times g$ max.) for 5 minutes.
7. Discard the flow-through from the Collection Plate and repeat Step 6.
8. Add 200 μl **DNA Pre-Wash Buffer** to the wells of the Silicon-A™ Plate, mounted on the emptied Collection Plate, and centrifuge the assembly at $\geq 3,000 \times g$ for 5 minutes.
9. Add 500 μl **g-DNA Wash Buffer** to the wells of the Silicon-A™ Plate on the Collection Plate and centrifuge the assembly at $\geq 3,000 \times g$ for 5 minutes.
10. Prepare the **Silicon-A™-HRC Plate**³ by mounting it on an **Elution Plate**. Add 150 μl **Prep Solution** to the wells by piercing through the cover foil. Incubate at room temperature for 5 minutes, and centrifuge the assembly at exactly 3,500 $\times g$ for 5 minutes.
11. Place the Silicon-A™ Plate directly onto a prepared Silicon-A™-HRC Plate, and then mount the assembly on a new Elution Plate (this new assembly is a 3 plate stack).
12. Add 100 μl (50 μl minimum) **DNA Elution Buffer** directly to the matrices to the Silicon-A™ Plate on top. Centrifuge the assembly at exactly 3,500 $\times g$ for 3 minutes.

Eluted, ultra-pure DNA is now ready for use in your experiments, or the Elution Plate can be covered with Cover Foil for storage of the DNA.

Annexe 4 : Etude économique du coût lié au changement de litière et de ration

Les calculs pour chaque essai ont été effectués par rapport à la situation du lot témoin de la même année prise comme situation de référence.

Données collectées	2017			2018		
	Témoin	Essai 1	Essai 2	Témoin	Essai 3	Essai 4
Objectif de nombre d'agneaux à engraisser par lot	220	220	220	220	220	220
Taux de mortalité (%)	5	3	7	6	6	5
Poids de carcasse (kg)	18,1	17,8	17,6	19,4	18,9	18,9
Prix de vente au kg (€/kg)	5	5	5	5	5	5
Coût alimentaire (€/agneau)	25,45	26,23	28,61	23,37	24,54	24,54
Coût de la litière (€/agneau)	0,75	6,8	7,68	0,75	6	5,94

1. Essai 1

Eléments favorables		Eléments défavorables	
Valeur (€)		Valeur (€)	
Produits en plus :		Produits en moins :	
Agneaux en plus (mortalité moindre)	391,60	Perte de rendement carcasse	320
Charges en moins :		Charges en plus :	
		Surcoût alimentaire	163
		Surcoût de litière	1264
		Frais d'élevage supplémentaires (mortalité moindre)	145
Total	392	Total	1893
Total : 1893 – 392 = 1501 €			
Solde par agneau : 1501/(0,97*220) = 7,03 €			

2. Essai 2

Eléments favorables		Eléments défavorables	
Valeur (€)		Valeur (€)	
Produits en plus :		Produits en moins :	
		Agneaux non vendus car morts	387
		Perte de rendement carcasse	512
Charges en moins :		Charges en plus :	
Coûts d'élevage (litière + alimentation) animaux morts	160	Surcoût alimentaire	660
		Surcoût de litière	1448
Total	160	Total	3008
Total : 3008 – 160 = 2848 €			
Solde par agneau : 2848/(0,93*220) = 13,91 €			

3. Essai 3

Eléments favorables	Eléments défavorables
Valeur (€)	Valeur (€)
Produits en plus :	Produits en moins :
	Perte de rendement carcasse 517
Charges en moins :	Charges en plus :
	Surcoût alimentaire 242
	Surcoût de litière 1086
Total 0	Total 1845
Total : 1845 €	
Solde par agneau : $1845 / (0,94 * 220) = 8,92 \text{ €}$	

4. Essai 3

Eléments favorables	Eléments défavorables
Valeur (€)	Valeur (€)
Produits en plus :	Produits en moins :
Agneaux en plus (mortalité moindre) 207,90	Perte de rendement carcasse 523
Charges en moins :	Charges en plus :
	Surcoût alimentaire 242
	Surcoût de litière 1086
	Frais d'élevage supplémentaires (mortalité moindre) 67
Total 207,90	Total 1917
Total : $1917 - 207,9 = 1709,1 \text{ €}$	
Solde par agneau : $1709,1 / (0,95 * 220) = 8,18 \text{ €}$	

Effets de l'alimentation sans fibre longue chez l'agneau à l'engraissement

Résumé

L'engraissement des agneaux de Roquefort repose sur l'utilisation de paille. Celle-ci garantit un bon déroulement des fermentations ruminales à l'origine des qualités organoleptiques et nutritionnelles de la viande. Sans fibres longues le risque de subacidose ruminale est augmenté et la qualité de la viande, la productivité et la santé des animaux sont altérés. Cette étude vise à objectiver les conséquences sur le milieu ruminal du retrait des fibres longues de la ration d'agneaux Lacaune à l'engraissement. Quatre rations associant des granulés de paille à un aliment finition de composition spécifique ont été comparées à une ration d'engraissement comprenant des fibres longues de paille. L'association des granulés de paille à un aliment de teneur réduite en amidon, augmentée en cellulose brute et bicarbonates et enrichi en levures par rapport à un aliment classique conduit à la diversité de microbiote et au profil lipidique ruminal les plus favorables sans altérer le gain de poids quotidien.

Mots-clés

ALIMENTATION – FIBRES – RUMEN – ACIDOSE – CARCASSE – CROISSANCE – OVINS

Effects of feeding fattening lambs without long forage particles

Abstract

Fattening lambs of Roquefort are fed with straw. Straw promotes optimal rumen fermentation which leads to meat quality traits and nutritional value. Feeding diets without long-fiber particles enhances the risk of subacute ruminal acidosis. In these circumstances meat quality, lamb productivity and health are worsened. The aim of this study is to evaluate the consequences of diets without long forage particles on rumen fermentation of Lacaune fattening lambs. Four diets with straw pellets and a specific finishing diet were compared to the traditional finishing diet including straw in long form. Feeding lambs with straw pellets and a finishing diet formulated with live yeast, a lower dietary starch content and a higher cellulose and bicarbonate content than the traditional finishing diet increases bacterial diversity and provides a better lipid profile. No significant differences in the daily gain were observed.

Key-words

FEEDING – FIBERS – RUMEN – ACIDOSIS – CARCASS – GROWTH - LAMBS