



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : [http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID : 8308](http://oatao.univ-toulouse.fr/Eprints/ID%3A8308)

To cite this version :

Guihard, Justine. *Intérêts d'une supplémentation en acides gras oméga-3 sur la production et la santé des vaches laitières*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT, 2011, 85 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr.

ANNEE 2011 THESE : 2011 – TOU 3 – 4094

INTÉRÊTS D'UNE SUPPLÉMENTATION EN ACIDES GRAS OMEGA-3 SUR LA PRODUCTION ET LA SANTÉ DES VACHES LAITIÈRES : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET ENQUÊTE DE TERRAIN

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE
DIPLOME D'ETAT

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

par

GUIHARD Justine

Née, le 21 Novembre 1985 à EVREUX (27)

Directeur de thèse : M. Francis ENJALBERT

JURY

PRESIDENT :
M. Robert SALVAYRE

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :
M. Francis ENJALBERT
Mme Nicole HAGEN-PICARD

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

**Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE**

Directeur : M. A. MILON
Directeurs honoraires : M. G. VAN HAVERBEKE.
M. P. DESNOYERS

Professeurs honoraires :

M. L. FALIU	M. J. CHANTAL	M. BODIN ROZAT DE MENDRES NEGRE
M. C. LABIE	M. JF. GUELFY	M. DORCHIES
M. C. PAVAU	M. EECKHOUTTE	
M. F. LESCURE	M. D.GRIESS	
M. A. RICO	M. CABANIE	
M. A. CAZIEUX	M. DARRE	
Mme V. BURGAT	M. HENROTEAUX	

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

M. AUTEFAGE André, *Pathologie chirurgicale*
M. BRAUN Jean-Pierre, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. CORPET Denis, *Science de l'Aliment et Technologies dans les Industries agro-alimentaires*
M. ENJALBERT Francis, *Alimentation*
M. EUZEBY Jean, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
M. FRANC Michel, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
M. MARTINEAU Guy, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
M. PETIT Claude, *Pharmacie et Toxicologie*
M. REGNIER Alain, *Physiopathologie oculaire*
M. SAUTET Jean, *Anatomie*
M. TOUTAIN Pierre-Louis, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 1° CLASSE

M. BERTHELOT Xavier, *Pathologie de la Reproduction*
Mme CLAUW Martine, *Pharmacie-Toxicologie*
M. CONCORDET Didier, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
M. DELVERDIER Maxence, *Anatomie Pathologique*
M. SCHELCHER François, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 2° CLASSE

Mme BENARD Geneviève, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
M. BOUSQUET-MELOU Alain, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme CHASTANT-MAILLARD Sylvie, *Pathologie de la Reproduction*
M. DUCOS Alain, *Zootéchnie*
M. DUCOS DE LAHITTE Jacques, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
M. FOUCRAS Gilles, *Pathologie des ruminants*
Mme GAYRARD-TROY Véronique, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. GUERRE Philippe, *Pharmacie et Toxicologie*
Mme HAGEN-PICARD Nicole, *Pathologie de la Reproduction*
M. JACQUIET Philippe, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. LEFEBVRE Hervé, *Physiologie et Thérapeutique*
M. LIGNEREUX Yves, *Anatomie*
M. PICAVET Dominique, *Pathologie infectieuse*
M. SANS Pierre, *Productions animales*
Mme TRUMEL Catherine, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
M **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants.*
Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*

MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mlle **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mme **BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
Mlle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
M. **CUEVAS RAMOS Gabriel**, *Chirurgie Equine*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
Mlle **FERRAN Aude**, *Physiologie*
M. **GUERIN Jean-Luc**, *Elevage et Santé avicoles et cunicoles*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mlle **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique des animaux de rente*
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
Mlle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
Mme **TROEGELER-MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie (disponibilité à cpt du 01/09/10)*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

MAITRES DE CONFERENCES et AGENTS CONTRACTUELS

- M. **BOURRET Vincent**, *Microbiologie et infectiologie*
M. **DASTE Thomas**, *Urgences-soins intensifs*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mlle **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophtalmologie*
Mlle **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
Mlle **PASTOR Mélanie**, *Médecine Interne*
M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales*
Mlle **TREVENNEC Karen**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*
M **VERSET Michaël**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

A Monsieur le Professeur Robert Salvayre

Professeur des Universités
Biochimie

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre thèse.
Hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Francis Enjalbert,

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Alimentation

Qui nous a fait l'honneur de diriger cette thèse.
Merci pour votre disponibilité, votre écoute et vos conseils éclairés.
Veuillez trouver ici le témoignage de notre reconnaissance et de notre profond respect.

A Madame le Professeur Nicole Hagen-Picard,

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse
Reproduction

Qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury de thèse.
Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance et de nos sincères remerciements.

A mes parents, Clémence, Manon, Bonne-Maman, Véro, pour tout leur amour et leur aide dans ces études,

A Bon-Papa, qui aurait été ravi de savoir que je fais aujourd'hui ce que j'aime,

A Simon,

A ma famille,

A Papy, Mamie, Josiane et Didier, pour la passion des vaches qu'ils m'ont transmise,

A mon équipe toulousaine de Water-Polo, avec qui j'ai partagé tant de choses durant ces cinq ans : victoires, défaites, soirées, traversées de la France (pas toujours par le plus court des chemins !) ... Merci pour tous ces supers moments passés.

A mes amis de tous horizons : Estelle, Camille, Charlotte, Laure, Anne-Laure, Candice, Cécile, Laétitia, Kévin, Victor, Geoffrey... et tous les autres.

Une pensée aussi à ceux qui ont partagé ma vie : Molly, Toska, Minette, Mistou, Mémère, Nimbus, Rubis ; et ceux qui la partagent toujours : Alfa, Fripouille, Chocolatine, Greenkie et la petite Pirouette.

Table des matières

Table des matières.....	6
Liste des tableaux	8
Liste des figures	9
Liste des abréviations.....	10
Introduction.....	11
1.Etude bibliographique.....	13
1.1. Intérêts des matières grasses du lait en alimentation humaine.....	14
1.1.1.Effets biologiques des oméga 3 sur la santé humaine	14
1.2.Relation entre les apports dans la ration des vaches laitières et la composition du lait	16
1.2.1.Sources d'AGPI en alimentation animale	16
1.2.2.Devenir digestif des AGPI ingérés	18
1.2.3.Effets d'une alimentation enrichie en oméga 3 sur la composition du lait	20
1.2.3.1.Les matières grasses du lait.....	20
1.2.3.2.Effets d'une ration enrichie en AGPI sur la composition du lait	22
1.3.Intérêts d'une alimentation enrichie en oméga 3 chez les vaches laitières	24
1.3.1.Production de méthane	24
1.3.2.Quantité de lait, taux protéique, taux butyreux, composition du lait	28
1.3.3.Gestion du risque de cétose	30
1.3.4.Reproduction	32
1.3.4.1.Introduction.....	32
1.3.4.2.Dynamique folliculaire	32
1.3.4.3.Progestérone et corps jaune.....	33
1.3.4.4.PGF _{2α}	34
1.3.4.5.Synthèse des prostaglandines (PGE ₂ , PGI ₂) par l'embryon.....	43
1.3.4.6.Les lignanes, de puissants antioxydants.....	43
1.3.4.7.Retard de mise bas	44
1.3.4.8.Conclusion	45
1.3.5.Immunité.....	46
2. Enquête.....	50
2.1. Le programme Linus	50
2.1.1.Pour répondre aux objectifs de Bleu-Blanc-Cœur.....	50
2.1.2.Conditions à remplir pour s'engager dans le programme Linus	51
2.1.2.1.Zone géographique.....	51
2.1.2.2.IT3.....	51

2.2.Objectif de l'enquête et protocole	54
2.2.1.Objectif.....	54
2.2.2.Protocole.....	54
2.2.2.1.Elaboration du questionnaire	54
2.2.2.2.Questionnaires et lettres accompagnatrices	55
2.2.2.3.Collecte des données	55
2.3.Résultats	56
2.3.1.Résultats bruts	56
2.3.2.Exploitation des résultats.....	60
2.3.2.1.Réussite en première insémination	60
2.3.2.2.Poids de carcasse des vaches de réforme	61
2.3.2.3.Santé des veaux	62
2.3.2.4.Points positifs constatés	62
2.3.2.5.Points négatifs constatés	63
2.4.Discussion	63
2.4.1.Protocole et difficultés rencontrées	63
2.4.2.Impact économique	65
2.4.3.Résultats	67
Conclusion	69
Annexes.....	70
Annexe n°1 : Courriers et questionnaires.....	70
Annexe n°2 : Synthèse à destination des éleveurs ayant participé à l'enquête.	74
Annexe n°3 : Une autre voie d'approche de la modification de la composition du lait : génétique et génomique.	75
Bibliographie.....	78

Liste des tableaux

Tableau 1 : Teneur des différents acides gras majoritaires dans la matière grasse du lait.....	22
Tableau 2 : Synthèse bibliographique de l'évolution des paramètres de production laitière avec une supplémentation en graines de lin extrudées.	29
Tableau 3 : Quelques valeurs indicatives de l'IT3.....	52
Tableau 4 : Ration hivernale avec complémentation en graines de lin.....	53
Tableau 5 : Ration hivernale avec complémentation en graines de lin.....	53
Tableau 6 : Ration de printemps.	53
Tableau 7 : Résultats des élevages engagés dans la démarche Linus	57
Tableau 8 : Résultats des élevages témoins.....	59
Tableau 9 : Variation du pourcentage de réussite en 1 ^{ère} insémination entre 2006 et 2009.	60
Tableau 10 : Variation du poids de carcasse entre 2006 et 2009.....	61
Tableau 11 : Eléments collectés quant à la santé des veaux d'élevage.....	62
Tableau 12 : Points positifs notés par les éleveurs depuis leur entrée dans la démarche Linus. ..	62
Tableau 13 : Points négatifs notés par les éleveurs depuis leur entrée dans la démarche Linus. .	63
Tableau 14 : Comparaison économique de deux systèmes utilisant différemment le silo de maïs.	66

Liste des figures

Figure 1 : Biochimie des acides gras oméga 3.....	13
Figure 2 : Hydrolyse d'un triglycéride.....	18
Figure 3: Voie supposée principale de la biohydrogénation de l'ALA.	19
Figure 4 : Origine des acides gras du lait.....	21
Figure 5 : Récapitulatif du mode d'action et des conséquences d'une ration riche en C18:3 sur la composition en acides gras du lait.	24
Figure 6 : Résumé des voies biochimiques de la dégradation des glucides dans le rumen.	25
Figure 7 : Effet de l'EPA après stimulation des cellules endométriales au PDBu.	35
Figure 8 : Origine des 3 séries de prostaglandines.....	37
Figure 9 : Voie de biosynthèse de $\text{PGF}_{2\alpha}$ a au niveau de l'endomètre des ruminants.....	38
Figure 10 : Concentrations en $\text{PGF}_{2\alpha}$ dans le milieu de culture (moyenne ajustée \pm écart type).	40
Figure 11 : Schéma des principaux mécanismes affectant le début de la gestation chez les vaches laitières recevant une alimentation enrichie en AGPI n-3.	46
Figure 12 : Pourcentage de réussite en 1 ^{ère} insémination en fonction du pourcentage d'ALA moyen sur le lait de tank en 2009.	60
Figure 13 : Héritabilité moyenne des différents acides gras du lait.....	76

Liste des abréviations

AA : Acide Arachidonique

AG : Acide Gras

AGMI : Acide Gras MonoInsaturé

AGPI : Acide Gras PolyInsaturé

AGPI n-3 : Acide Gras PolyInsaturé oméga 3

AGPI n-6 : Acide Gras PolyInsaturé oméga-6

AGS : Acide Gras Saturé

AL : Acide Linoléique

ALA : Acide Alpha-Linolénique

DHA : Acide DocosaHexaénoïque

EPA : Acide EicosaPentaénoïque

IGF-1 : Insulin-Like Growth Hormone

MS : Matière Sèche

Introduction

L'élaboration d'un produit doit permettre de répondre aux exigences du consommateur dans tous les domaines y compris dans l'agro-alimentaire. Aujourd'hui, le consommateur veut consommer des produits avec non seulement des qualités organoleptiques, un coût réduit mais également qui soit « bon » pour la santé. Les allégations publicitaires concernant l'intérêt diététique sur la santé sont des arguments vendeurs, si bien que les industriels les utilisent.

Depuis quelques années, les études médicales qui mettent en avant les effets bénéfiques des oméga 3 sont nombreuses. Or d'après les différentes études conduites permettant d'estimer les apports journaliers en acide gras oméga 3 dans la population française et en prenant en compte leurs imprécisions et leurs limites méthodologiques, les données amènent à considérer que l'apport en acide alpha-linolénique est loin de couvrir les apports nutritionnels conseillés, en particulier en ce qui concerne le rapport acide linoléique (AL) / acide alpha-linolénique (ALA) (Martin, 2001). Il est en effet recommandé de consommer deux grammes d'oméga 3 par jour or en France on ne consommerait qu'un tiers de cette dose recommandée. Dans la situation actuelle, pour la population française, les produits issus d'animaux terrestres constituent 40% de l'apport journalier en acide alpha-linolénique et peuvent constituer un vecteur potentiel d'enrichissement de la ration en cet acide gras : le lait, les œufs en sont les meilleurs exemples (Afssa, 2009).

Ainsi l'enrichissement du lait en oméga 3 a suscité l'intérêt de plusieurs industriels. La matière grasse du lait de vache contient environ 5% d'acides gras poly-insaturés (AGPI), 70% d'acides gras saturés (AGS), et 25% d'acides gras monoinsaturés. Or, une matière grasse de composition idéale pour la santé humaine doit contenir 2 fois plus d'AGPI (soit 10%), 9 fois moins d'AGS (soit 8%) et 3 fois plus d'AGMI (soit 82%) (Grummer, 1991). Ces proportions sont impossibles à obtenir en pratique dans un produit laitier mais on peut essayer de s'en rapprocher en modifiant la ration des vaches laitières.

Nous savons qu'en enrichissant en oméga 3 la ration des vaches laitières, la teneur dans le lait produit est augmentée. Or les aliments riches en oméga 3, tels que le lin et la luzerne, sont peu utilisés. Une des limites majeures évoquées quant à leur incorporation plus importante est le surcoût alimentaire engendré. Les laiteries qui incitent leurs adhérents à produire un lait enrichi en oméga 3 proposent des primes, loin de couvrir le surcoût aux dires des producteurs. Ainsi les laiteries ont tout intérêt à mettre en avant d'autres effets positifs d'une alimentation enrichie en oméga 3 sur les troupeaux pour convaincre les producteurs d'adhérer à cette démarche et justifier le surcoût.

L'objet de cette étude est de mettre en parallèle les différents effets d'une ration enrichie en oméga 3 sur des troupeaux laitiers d'après la bibliographie avec ceux relevés sur le terrain dans le bassin de collecte de Ferrières-en-Bray (76).

1. Etude bibliographique

Tout d'abord, présentons l'objet de cette thèse : les acides gras oméga 3 :

Ils sont dits polyinsaturés en effet leur chaîne carbonée possède plusieurs doubles liaisons.

Les principaux acides gras du groupe oméga 3 sont :

- l'acide α -linoléique (nomenclature : C18:3 n-3 ; abréviation : ALA)
- l'acide éicosapentaénoïque (nomenclature : C20:5 n-3; abréviation : EPA)
- l'acide docosahexaénoïque (nomenclature : C22:6 n-3; abréviation : DHA)

La nomenclature utilisée signifie que ces trois acides ont respectivement 3, 5 et 6 doubles liaisons dans leur chaîne composée de 18, 20 et 22 atomes de carbone. Toutes ces doubles liaisons sont en configuration cis, c'est-à-dire que leurs deux atomes d'hydrogène se trouvent du même côté du plan formé par la double liaison carbone-carbone. Toute cette famille possède une double liaison placée en position 3 de la chaîne carbonée à partir de son extrémité non carboxylique, différentes réactions chimiques permettent le passage de l'un à l'autre (figure 1). Ce sont des acides gras essentiels c'est-à-dire qu'ils ne sont pas synthétisés par l'organisme.

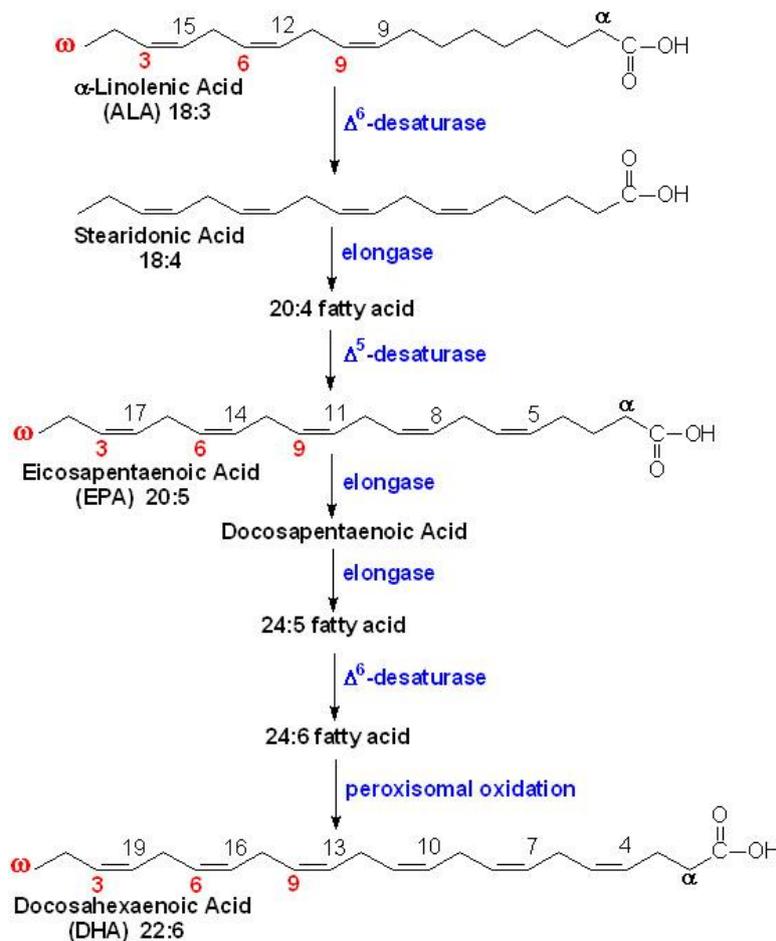


Figure 1 : Biochimie des acides gras oméga 3.

Source : <http://supplementscience.org/pufas.html>, consultée le 10.09.2011.

Nous étudierons tout d'abord l'intérêt des matières grasses du lait en alimentation humaine, puis la relation entre les apports alimentaires d'AGPI et la composition du lait. Enfin nous traiterons des effets d'une alimentation enrichie en AGPI n-3 chez les vaches laitières.

1.1. Intérêts des matières grasses du lait en alimentation humaine

1.1.1. Effets biologiques des oméga 3 sur la santé humaine

➤ Immunité et inflammation

Une étude a montré que chez 64 patients souffrant de bronchite chronique, randomisés en deux groupes recevant un supplément nutritionnel de 400 kcal, l'un riche en n-3, l'autre en n-6, l'état clinique et les marqueurs de l'inflammation avaient été modifiés favorablement dans le groupe n-3. Les auteurs concluent qu'un support nutritionnel riche en AG n-3 est une méthode sûre et pratique à utiliser comme traitement adjuvant de la bronchite chronique (Laurent-Jaccard, 2006).

Des essais cliniques ont été réalisés utilisant les AGPI n-3 comme traitement adjuvant de la polyarthrite rhumatoïde. Dans la plupart des cas, une amélioration significative des paramètres cliniques de la maladie a été observée sous traitement par AGPI n-3 (NUTRANEWS, 2003).

Chez les patients souffrant d'asthme, l'utilisation des AGPI n-3 est aussi préconisée, diminuant ainsi les médiateurs de l'inflammation (inhibition des médiateurs dérivés de l'AA, production de médiateurs moins puissants (leucotriènes et prostaglandines séries 3 et 5 contre ceux de la série 2) et en modulant la réponse immunitaire du type TH₂ (pro-allergique) vers une réponse du type TH₁ (réponse inflammatoire) (Sterescu, 2008).

➤ Cellules nerveuses

Les membranes des cellules nerveuses sont particulièrement riches en DHA. Une carence alimentaire en AGPI n-3 ou un déséquilibre du rapport AGPI n-6/AGPI n-3 (il devrait être de 5 et est de 20 avec les régimes actuels) se répercute sur l'incorporation membranaire des AGPI à longue chaîne, tels que le DHA, et peut altérer les processus relevant de la plasticité cérébrale comme l'apprentissage et la mémorisation. Ainsi, des altérations de la teneur membranaire en AGPI ont été mises en évidence au cours du vieillissement et dans des maladies neuro-dégénératives (Champeil-Potokar, 2002).

Le DHA constitue 56% des acides gras des membranes des cellules photoréceptrices de la rétine. Une consommation suffisante de DHA réduit le risque de dégénérescence maculaire liée à l'âge (Seddon, 2003).

➤ Effets sur le système cardio vasculaires (Lecerf et al, 2008)

Les données sur les AGPI n-3 sont considérables et cohérentes en termes de prévention cardiovasculaire. La quasi totalité des études d'observation relatives à la consommation de poisson et d'AGPI n-3 ou au statut de ces acides gras via la teneur tissulaire, reflet des apports alimentaires, montrent une réduction des événements cardiovasculaires, coronariens, de la mortalité par cardiopathie ischémique de 30 % à 40 % lorsque l'apport est élevé. En ce qui concerne l'ALA, les études d'observation sont également très cohérentes, avec un effet protecteur d'autant plus net que l'apport en AGPI n-3 total est faible, ce qui s'expliquerait par un accroissement de la bio-transformation de l'ALA en EPA dans ce cas.

Plusieurs études épidémiologiques notamment les études américaines, Physicians' Health Study ont également montré une association entre apport et teneur tissulaire en AGPI n-3 et en ALA, et risque de mort subite avec une très forte diminution statistique du risque chez de jeunes adultes.

Trois études d'intervention portant presque exclusivement sur un accroissement de l'apport en EPA/DHA ont confirmé de façon spectaculaire et rapide, en prévention secondaire chez des sujets ayant fait un infarctus du myocarde, une réduction importante du risque de mortalité coronarienne et de mort subite.

L'effet rapide des AGPI n-3 ne passe vraisemblablement pas par un effet sur les lipides plasmatiques, malgré un effet hypotriglycéridémiant notamment en période post-prandiale : il semble dû principalement à un effet antiarythmique très bien documenté, qui serait responsable de la réduction du risque de mort subite chez le patient coronarien, et à un effet antiagrégant plaquettaire et anti-inflammatoire, le rendant moins vulnérable et diminuant le risque de thrombose. D'autres mécanismes pourraient être en cause, notamment un effet antihypertenseur avec l'ALA.

➤ Et aussi ...

On trouve également dans la littérature, d'autres rôles positifs attribués aux AGPI n-3, comme un rôle protecteur contre l'insulino-dépendance, un rôle positif dans les dyslexie et troubles de l'attention chez l'enfant (Richardson et al., 2005).

➤ Mais ...

Les poissons gras, excellentes sources d'AGPI n-3, sont aussi d'excellents accumulateurs de métaux lourds. N'oublions pas non plus que les AGPI n-3 fluidifient le sang, ce qui peut aussi en faire une contre-indication.

Ces nombreux effets bénéfiques qui sont attribués aux AGPI n-3 font d'eux un véritable slogan publicitaire à utiliser par les industriels. Les industriels valorisent ainsi en plus des qualités organoleptiques, des qualités nutritionnelles.

1.2. Relation entre les apports dans la ration des vaches laitières et la composition du lait

1.2.1. Sources d'AGPI en alimentation animale

En alimentation animale, différentes sources d'AGPI n-3 existent que ce soit des fourrages ou des concentrés. Un certain nombre d'entre eux ne sont pas utilisables en France soit parce qu'ils sont interdits, soit par manque de disponibilité. Ne seront traitées dans cette brève présentation que les aliments autorisés et utilisables dans les pratiques des élevages français.

- **Pâtures**

L'herbe fraîche contient 1 à 3% d'AG par rapport à la MS. L'acide gras dominant est l'ALA (Arkaim, 2005). Dans une étude, menée sur des brebis (Meluchová et al., 2008), il a été montré que l'ALA, est le composé le plus variable dans les pâtures, sa teneur est maximale au printemps et à l'automne, périodes auxquels on trouve la plus grande proportion de feuilles. La teneur en ALA varie de 62% à 39% des AG ($p < 0,001$) entre mai et août pour remonter lentement entre août et septembre. Des variations existent aussi en fonction du cycle végétatif, plus la plante vieillit, moins la teneur en ALA est élevée. Les graminées sont moins riches que les légumineuses.

- **Herbe conservée**

L'ensilage d'herbe est moins riche en oméga 3 que l'herbe pâturée. Une ration à base de foin présente une plus faible concentration en AGPI n-3 qu'une ration à base d'ensilage d'herbe. En effet, l'herbe est récoltée à un stade physiologique plus avancée pour les foins et lors du fanage une

partie des acides gras sont oxydés, d'autant plus intensément que les conditions météorologiques seront mauvaises.

- **Luzerne déshydratée**

La luzerne déshydratée est une des solutions pour réduire la dépendance européenne en protéines en offrant aux éleveurs une alternative économique pérenne au soja importé. En France, la luzerne déshydratée fournit ainsi 10% des besoins en protéines végétales à destination de l'alimentation animale sur 70 000 ha (Coop de France). Elle présente aussi un profil d'acides gras très équilibré avec une teneur en ALA (Lebois et al., 2007) comprise entre 4 et 14g/kg MS qui présente un réel intérêt pour la qualité du lait. Un process de concentration des éléments nutritifs, composé de quatre étapes : pressage, chauffage, séparation et séchage, permet d'obtenir des aliments à 34,5g d'ALA / kg de MB (Désialis). La teneur en ALA diminue avec une durée de stockage croissante (Maleplate et al., 2009).

- **Graine de lin extrudée**

L'utilisation de graines de lin permet à une partie de la matière grasse d'échapper à la biohydrogénation ruminale puisqu'elle est protégée par la structure même de la graine. La mastication endommageant les enveloppes de la graine, cette protection n'est que partielle. Différents procédés industriels ont été élaborés afin de limiter le plus possible cette biohydrogénation ruminale : traitement au xylose, micronisation, extrusion. Le procédé le plus efficace pour enrichir le lait en oméga 3 est le processus de «cuisson-extrusion». Outre cette protection, ces procédés réduisent les effets négatifs observés avec de grandes quantités d'acides gras non protégés sur la digestibilité, les fermentations ruminales, l'ingestion ou le taux butyreux (Woods, 2009).

Ce procédé consiste à appliquer sur des graines préalablement moulues, voire préchauffées dans une atmosphère plus ou moins humide, une forte pression et une température avoisinant les 150°C pendant un temps très court (moins de 30 secondes) suivies d'un passage forcé dans une filière à l'aide d'une ou plusieurs vis (pression entre 30 et 80 bars). Ce processus permet la destruction d'une grande partie des composés cyanogènes contenus dans la graine de lin. Un tel traitement réalisé dans des conditions satisfaisantes ne modifie généralement pas la composition lipidique de la graine (Morand-Fehr et al., 2001), mais l'huile est présente sous forme libre en plus grande proportion que dans la graine entière ou moulue.

1.2.2. Devenir digestif des AGPI ingérés

➤ Hydrolyse des lipides alimentaires = lipolyse ruminale

La première étape de transformation des lipides dans le rumen est la lipolyse des triglycérides, glycolipides et phospholipides, très rapide et presque complète (Chilliard et al., 2001) (figure 2).

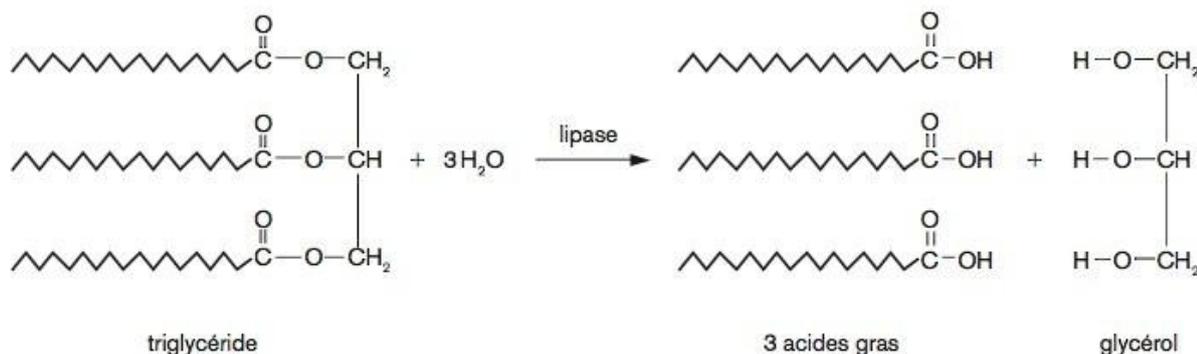


Figure 2 : Hydrolyse d'un triglycéride.

➤ Biohydrogénation ruminale

Les acides gras insaturés ainsi libérés subissent dans le rumen des étapes d'hydrogénation et d'isomérisation de tout ou partie de leurs doubles liaisons. La biohydrogénation de l'ALA est presque complète (Doreau et al., 1994). Malgré cette biohydrogénation intense, il semble que la composition de la ration en AGPI ait une certaine influence sur la composition en AGPI du plasma. En effet une partie des AGPI du rumen peut échapper à la biohydrogénation et ainsi être absorbée au niveau de l'intestin (Akraim, 2005). Ainsi l'augmentation de la teneur de la ration en C18:3 induit une plus grande quantité de ce composé et de ses produits d'hydrogénation dans le rumen : C18:0, C18:1 (trans11-C18:1 principalement, cis9-C18:1 en moindre proportion et plus rarement trans10-C18:1) et C18:2 (cis9trans11-C18:2 principalement). La biohydrogénation complète de C18:3 en C18:0 (figure 3) implique deux groupes de bactéries : le groupe A, composé de bactéries capables d'hydrogéner les AGPI en trans11-C18:1 et le groupe B qui hydrogène le trans11-C18:1 en C18:0.

Le C18:3, bien qu'il subisse une biohydrogénation similaire au C18:2, conduit à la production d'isomères trans-C18:1, mais les acides linoléiques conjugués (CLA) ne font pas partie de ses intermédiaires réactionnels (Troegeler et al., 2005). Les CLA sont des isomères géométriques et positionnels de l'acide linoléique (C18:2), dont les plus importants sont le

cis9trans11-CLA et le trans10cis12-CLA en raison de leurs propriétés biologiques et de leurs applications potentielles en santé humaine (cancer, obésité). Les trans-C18:1 ont eux des effets plutôt négatifs pour la santé humaine. Or Lock et Garnsworthy (2002) ont constaté que l'apport simultané en même quantité de C18:2 et de C18:3 augmentait de manière plus prononcée les teneurs en trans-C18:1 et CLA dans la phase liquide duodénale et dans le lait des vaches plus que des apports séparés. Aussi la synergie entre C18:2 et C18:3 s'expliquerait-elle par une inhibition de la biohydrogénation de C18:2 par C18:3, avec accumulation de trans11-C18:1 et cis9trans11-CLA, et non par une production directe de cis9trans11-CLA et de trans11-C18:1 à partir du C18:3.

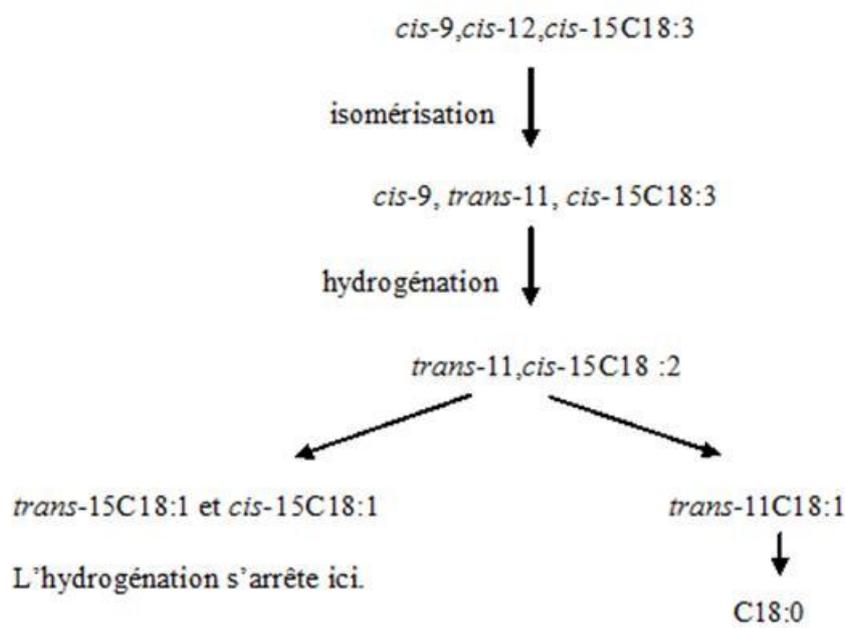


Figure 3: Voie supposée principale de la biohydrogénation de l'ALA.
Source : Harfoot et Hazlewood, 1988.

Les AG n-3 qui ne subissent pas la biohydrogénation arrivent au duodénum, ainsi que les trans11-C18:1 et cis9trans11-CLA d'où une augmentation de leurs taux plasmatiques et donc un enrichissement du lait. Cet enrichissement sera d'autant plus important que la biohydrogénation sera ralentie.

➤ Facteurs de variation de la biohydrogénation

La biohydrogénation de C18:3 n'est généralement pas affectée par l'apport d'un supplément de matières grasses (Akraim, 2005). La biohydrogénation de C18:3 n'est pas affectée par la diminution de pH ruminal (Van Nevel et Demeyer, 1996) mais pourrait l'être par la teneur de la ration en amidon (Loor et al., 2004).

La teneur en AGPI n-3 peut elle-même influencer l'avancement de la biohydrogénation et donc la teneur en intermédiaires. En effet, Arkaim (2005) indique qu'avec une concentration initiale élevée en C18:3 n-3, seulement 10,2% de la quantité initiale était totalement hydrogénée en C18:0 après 24 heures d'incubation in vitro dans du jus de rumen alors que seulement 63% de la quantité initiale était convertie en C18:0 avec une quantité initiale plus pauvre. Les biohydrogénations de l'EPA et du DHA sont réduites avec une dose croissante d'huile de poisson (Chow et Fievez, 2004).

L'extrusion du lin n'a pas significativement protégé le C18:3 de la biohydrogénation ruminale par rapport à la graine de lin crue mais a eu comme conséquence une augmentation des intermédiaires de biohydrogénation (Akraim, 2005).

Ainsi moins les AGPI seront biohydrogénés, meilleure sera la quantité retrouvée dans le sang.

1.2.3. Effets d'une alimentation enrichie en oméga 3 sur la composition du lait

1.2.3.1. Les matières grasses du lait

Les matières grasses sont présentes dans le lait sous forme d'une émulsion de globules gras, elles sont composées très majoritairement de lipides. De tous les composants du lait de vache, les lipides sont ceux qui, quantitativement et qualitativement, varient le plus : d'un animal à l'autre, d'une saison à l'autre. Les taux moyens précisés dans la littérature (38g/L) peuvent être retenus en pratique industrielle lorsque le lait est un mélange provenant de plusieurs animaux.

• Origine des AG du lait

Les acides gras que l'on retrouve dans le lait de vache ont une double origine (figure 4) :

- une fraction est synthétisée dans la glande mammaire : les acides gras courts et moyens de C4:0 à C16:0.
- et l'autre est directement prélevée dans la circulation sanguine et subit éventuellement une étape de désaturation : C16:0, C18:0, C18:1, C18:2, C18:3.

La synthèse *de novo* des acides gras nécessite deux types de substrats :

- des acides gras avec une chaîne carbonée courte dont les précurseurs sont le β -hydroxybutyrate, et l'acétate, tous deux issus de la digestion ruminale (Bauman et Griinari, 2003)
- et des équivalents réducteurs NADPH_2 ce qui nécessite du glucose.

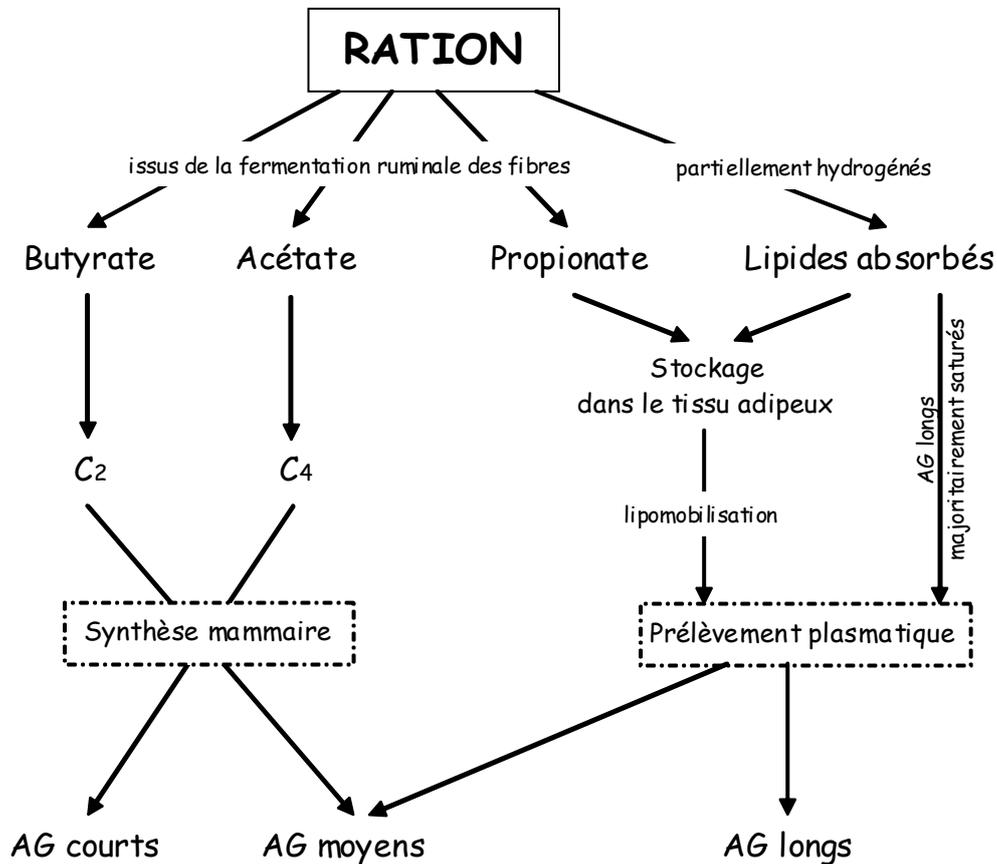


Figure 4 : Origine des acides gras du lait.
Source : Institut de l'élevage, 2006.

- **Les acides gras majoritaires du lait de vache**

Les acides gras insaturés constituent environ un tiers de la matière grasse du lait (en poids). La teneur en ALA varie de 0,5 à 2% (tableau 1).

Acide gras		% (poids)
C4:0	acide butyrique	2-5
C6:0	acide caproïque	1-5
C8:0	acide caprylique	1-3
C10:0	acide caprique	2-4
C12:0	acide laurique	2-5
C14:0	acide myristique	8-14
C15:0	acide pentadécanoïque	1-2
C16:0	acide palmitique	22-35
C16:1	acide palmitoléique	1-3
C17:0	acide margarique	0,5-1,5
C18:0	acide stéarique	9-14
C18:1	acide oléique	20-30
C18:2	acide linoléique	1-3
C18:3	acide linoléique	0,5-2

Tableau 1 : Pourcentage des différents acides gras majoritaires dans la matière grasse du lait.
Source : Jensen et al., 2002.

1.2.3.2. Effets d'une ration enrichie en AGPI sur la composition du lait

Dans les systèmes d'élevage où la ration des vaches laitières varie au cours de l'année, la composition du lait en AGPI et notamment en oméga -3 varie elle aussi.

Avec une ration contenant des graines de lin extrudées (2,6 % de la MS), dans le plasma 13,6% des AGT sont des C18:3 et dans le lait seulement 0,70% (Gonthier et al, 2005). Cette forte concentration plasmatique en AGPI s'explique par le fait que les AGPI à 18 carbones semblent être préférentiellement inclus dans les esters de cholestérol et les phospholipides dans le plasma or ces derniers représentent 95% des lipides du plasma (Arkaim, 2005). Les proportions restent faibles dans le lait, puisque les acides gras longs du lait sont principalement issus des triglycérides sanguins (Courtet Laymarios, 2010).

Une étude sur la composition du beurre français au cours de l'année montre qu'aux mois de janvier et de mars, dans 100 g de beurre il y a 0,25g de C18:3, 0,60g en mai/juin, 0,53g en

juillet/août, 0,46g en novembre (Jensen et al., 2002 d'après Wolff et al.,1995). Une seconde étude menée en Allemagne (Precht et al.,1999) rapporte également une différence de la teneur en C18:3 entre le lait d'été (avec 0,61 g dans 100 g de lait) et le lait d'hiver (avec 0,42 g dans 100 g de lait). Cette variation saisonnière met en avant un effet de l'alimentation.

Le remplacement partiel du pâturage par de l'ensilage d'herbe n'entraîne qu'une faible modification du profil en acides gras du lait. Ainsi, le passage de 20h de pâturage à 7h de pâturage et 13h d'accès libre à l'ensilage d'herbe modifie peu les teneurs en ALA (C18:3 n-3 0,63% des acides gras totaux contre 0,67% avec de l'ensilage d'herbe) (Rego et al., 2008).

Par contre, le lait d'une vache nourrie au foin sera plus riche en AGPI n-3 que le lait d'une vache nourrie avec de l'ensilage d'herbe puisque le foin présente une meilleure efficacité du transfert des AG au lait que l'ensilage d'herbe (29% contre 15%) (Shingfield et al., 2005).

In vivo, Ballard et al. (2010) rapportent que la luzerne déshydratée présente un meilleur taux de transfert des AGPI dans le lait que les graines de lin extrudées.

Slots et al. (2009) ont mené une étude sur l'effet de la ration sur la composition du lait, il a été constaté que le lait produit par des animaux dont la ration est basée sur des céréales, du pâturage, et de l'ensilage d'herbe, est un lait riche en ALA (C18:3 n-3 $9,4 \pm 0,2$ mg/kg des AGT) et en AGPI ($3,66 \pm 0,07$ mg/kg des acides gras totaux). A l'inverse, un système fourrager basé sur de l'ensilage de maïs et des concentrés divers est associé à une teneur élevée en acide linoléique, en AGMI et un rapport AL / ALA important. L'ensilage de maïs est donc un facteur dégradant beaucoup plus fort que l'ensilage d'herbe.

De plus une alimentation enrichie en AGPI peut conduire à une augmentation des CLA dans le lait selon deux voies : la première est la formation des CLA durant la BH ruminale du cis9cis12-C18:2 et la seconde est une synthèse de cis9trans11-CLA par le tissu mammaire à partir de l'acide vaccénique (trans11-C18:1), un autre intermédiaire de la BH ruminale des AGPI.

En résumé, il est possible d'accroître les apports en acides gras polyinsaturés chez les ruminants en leur servant des fourrages verts sous forme fraîche et récoltés jeunes, et en choisissant des espèces qui ont une concentration élevée comme le ray-grass ou le trèfle blanc. Compte tenu du grand nombre de facteurs de variation, il est aisé de comprendre que les résultats sont très différents d'une étude à l'autre et que les comparaisons sont parfois difficiles.

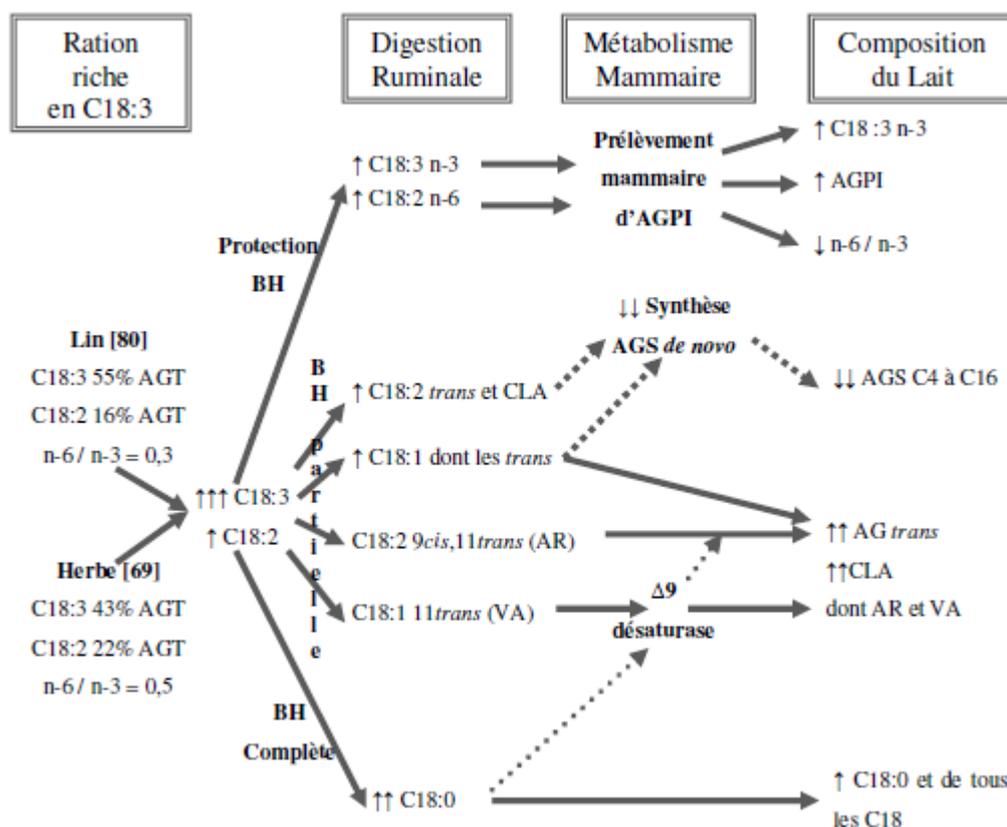


Figure 5 : Récapitulatif du mode d'action et des conséquences d'une ration riche en C18:3 sur la composition en acides gras du lait. Source : Courtet Leymarios, 2010.

1.3. Intérêts d'une alimentation enrichie en oméga 3 chez les vaches laitières

1.3.1. Production de méthane

Un enjeu écologique :

Le méthane (CH₄) est l'un des principaux gaz à effet de serre, 25 fois plus puissant que le dioxyde de carbone (CO₂), et est au cœur des discussions entreprises pour réduire l'émission de gaz à effets de serre. Or on sait qu'une vache produit par éructation entre 400 et 600 L de CH₄ par jour (Réduire la production de méthane chez les ruminants, INRA, 2008). La contribution de la fermentation entérique des bovins à l'ensemble des gaz à effet de serre en France représente 5% des émissions et 3 % au niveau mondial (Civam, Bretagne). La réduction des émissions de méthane par les ruminants est désormais une préoccupation environnementale de premier plan.

Chez le ruminant, le méthane est un produit formé naturellement pendant le processus de fermentation microbienne des aliments dans le rumen, situé au début du tube digestif. Le méthane ainsi produit est rejeté dans l'atmosphère par voie orale (95%), au cours d'éructations régulières et

par les poumons après passage dans le sang, mais très peu par flatulences (5%) contrairement à une affirmation courante. Outre l'aspect environnemental, le méthane éructé constitue pour le ruminant une perte en énergie sous forme gazeuse estimée à environ 6-10% de l'énergie brute ingérée. La réduction de la méthanogenèse présente donc non seulement un intérêt environnemental pour l'homme et la planète, mais aussi un intérêt nutritionnel pour le ruminant (Martin et al., 2006).

La production ruminale de méthane :

La digestion des glucides alimentaires s'effectue en deux étapes. Les glucides complexes sont d'abord dégradés en glucides simples (oses) puis, par glycolyse, sont à l'origine du pyruvate. Le passage du pyruvate à l'acétyl CoA, par décarboxylation, puis aux acides acétique (C2) (65%) et butyrique (C4) (10%), par fermentation, produit de l'hydrogène. A l'inverse, le passage du pyruvate au propionate (C3) (20%), par fermentation, consomme de l'hydrogène (figure 6).

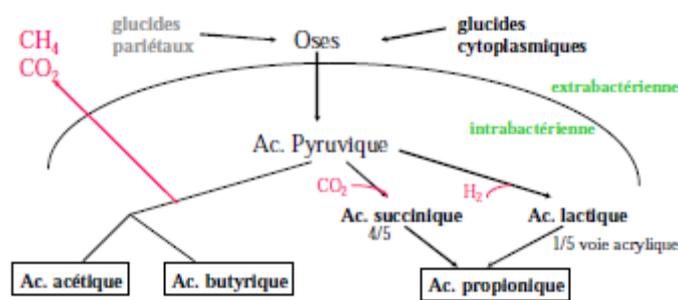


Figure 6 : Résumé des voies biochimiques de la dégradation des glucides dans le rumen.

Source : F.Enjalbert.

L'émission de méthane par un ruminant a toujours pour origine une production d'hydrogène (H_2) provenant de la digestion microbienne des glucides alimentaires. Les archées méthanogènes (*Methanobacterium ruminantium* et *M. mobile*) produisent du méthane suivant la réaction : $CO_2 + 4 H_2 + 1ADP \rightarrow CH_4 + 2 H_2O + 1 ATP$. Ainsi, la production de méthane est essentiellement couplée avec les productions d'acide acétique (C2) et d'acide butyrique (C4) par décarboxylation (Chevallier, 2001). Les protozoaires ciliés du rumen sont, eux, responsables de 9 à 25 % de la méthanogenèse (Moss et al., 2000).

Parmi les deux voies principales de fermentation, dont l'activité relative est fonction du régime des vaches, l'une produit le substrat nécessaire à la production de méthane, l'autre en consomme. Ainsi, plus le rapport (C2+C4) / C3 au sein des acides gras volatils du rumen est élevé, plus la vache produit de méthane (Moss et al., 2000).

Lin et réduction de la production ruminale de méthane :

Les lipides peuvent remplacer partiellement les céréales pour accroître le niveau énergétique de la ration. Ils présentent l'avantage de ne pas modifier le pH ruminal et de pouvoir diminuer la méthanogenèse (Jouany, 1994). L'inhibition de la méthanogenèse dépend de la nature et de la quantité de lipides ajoutés, les acides gras étant plus efficaces que les triglycérides, et les acides gras longs polyinsaturés (en particulier l'acide linoléique, ALA) étant plus actifs que les acides gras saturés ou monoinsaturés.

D'un point de vue pratique, la graine de lin, riche en ALA, peut être utilisée dans l'alimentation des ruminants. Sur animaux en production, un apport de lin a diminué la production de méthane de 10% chez des agneaux supplémentés avec 2,5% de lipides du lin (Machmüller et al., 2003) et de 38% chez des moutons à l'entretien recevant une ration de foin supplémentée avec 5% d'huile de lin (Czerkawski et al., 1966). La quantité d'hydrogène utilisée pour réduire les acides gras insaturés n'intervient que de manière très limitée dans la diminution de la synthèse de méthane. L'ALA limiterait la méthanogenèse en inhibant les micro-organismes producteurs (protozoaires, bactéries cellulolytiques) et/ou utilisateurs (archées) de l'hydrogène ruminal. Les lipides ont un effet persistant sur la méthanogenèse (Martin et al., 2006).

Des réductions de 12, 38 et 64% ont été observées en ajoutant à une ration à base d'ensilage de maïs 5% de lipides du lin, respectivement, sous forme de graines entières, de graines extrudées ou d'huile libre, respectivement (Martin et al., 2008). Il s'agit d'essais réalisés sur la durée d'une lactation dont les résultats devront être confirmés sur des périodes plus longues. D'autres études confirment ces résultats et montrent des réductions croissantes de la production de méthane (- 10, - 16 et - 41%) lors d'ajouts croissants (5, 10 et 15% de graines extrudées dans la ration, respectivement) (Martin et al., 2009).

Cet effet semble se maintenir après 18 mois de supplémentation continue en graine de lin extrudée (Martin et al., 2010), et persiste donc au-delà de la seule période d'adaptation de la flore ruminale. Sur des brouillards charolais à l'engraissement recevant une ration contenant 87% de MS riche en amidon, supplémentée à 6% de MS avec des graines de lin extrudées, les émissions de méthane quotidiennes sont réduites de 20% par rapport celles obtenues avec une ration témoin, non supplémentée avec du lin (Eugène et al., 2009).

Il est rapporté deux moyens d'action du lin sur la méthanogenèse :

- une action sur les protozoaires :

Des études conduites sur la défaunation du rumen de boeuf ont montré qu'elle était presque toujours accompagnée d'une diminution considérable de la méthanogenèse (de 20 à 50 %) (Kreuzer et al., 1986 ; Williams, 1992). L'élimination des protozoaires du rumen permet à la fois de diminuer la production d'hydrogène et de supprimer la fraction d'archées méthanogènes fixée à la surface et dans les cellules des protozoaires ciliés entodiniomorphes, ce qui explique la baisse de la méthanogenèse de 30 à 45% généralement observée après défaunation du rumen (Vermorell et al., 1989). On sait que les bactéries méthanogènes fixées sur les ciliés sont responsables de 9 à 25 % de la méthanogenèse du rumen (Newbold et al., 1995). Cependant, des études récentes conduites à l'INRA ont montré que l'effet de la défaunation sur la production de méthane disparaît après une longue période (environ 12 mois selon Ranilla et al., 2004).

La défaunation modifie également l'orientation fermentaire dans le sens d'une augmentation de la production de propionate aux dépens de la production de butyrate et, à un degré moindre, de l'acétate. La plus grande mobilisation d'hydrogène métabolique au cours de la synthèse de propionate entraîne une baisse de la production de méthane et améliorerait le bilan énergétique de l'animal (Jouany, 1994).

- une action sur les archées :

Les acides gras à longues chaînes, notamment l'huile de lin, semblent également avoir une action toxique sur les archées méthanogènes, ce qui contribue majoritairement à diminuer la production de méthane (Chouinard, 2002 ; Demeyer et al., 1967 ; Dong et al., 1997 ; Prins et al., 1972 ; Czerkawski et al., 1966). En culture in vitro, la croissance de *Methanobacterium ruminantium* est inhibée par les acides gras à longue chaîne de façon croissante par C₁₈, C₁₆, C₁₂, C₁₄ et C_{18:1} (Prins et al., 1972 ; Henderson et al., 1973). L'inhibition de la méthanogenèse est aussi liée à la nature des lipides : les acides gras libres sont plus efficaces que les triglycérides (Van Nevel et al., 1991).

Influence de la ration sur la production de méthane

Une herbe pâturée au stade début épiaison entraîne également une émission de méthane plus faible de 10% que la même herbe pâturée à un stade avancé, et donc plus riche en parois et moins digestible (Pinares-Patiño et al., 2003). L'herbe jeune pâturée contient également de l'ALA et, bien que sa teneur soit plus faible que celle du lin, les apports en ALA qu'elle représente peuvent être significatifs puisqu'elle peut constituer la totalité de la ration du ruminant. Un ensilage d'herbe

récolté en coupe directe est également riche en acide linoléique. De plus, les quantités ingérées élevées et le transit rapide de l'herbe dans le rumen favoriseraient une diminution de la méthanogenèse. Ces fourrages sont donc susceptibles de limiter la méthanogenèse, mais cela n'a pas été démontré. Les résultats cités ci-dessus vont toutefois dans ce sens, l'effet des lipides et du temps de séjour s'ajoutant à l'effet de la faible teneur en parois dans le cas de l'herbe jeune (Martin et al., 2006)

L'introduction des légumineuses a permis une diminution de 10% de la production de méthane par kg de poids vif sur des bovins viande pâturant une prairie composée de 70% de luzerne et 30% de graminées par rapport à ceux dont la prairie était composée de 100% de graminées (McCaughey et al., 1999). Cet effet pourrait s'expliquer par un niveau d'ingestion plus élevé et un temps de séjour dans le rumen plus faible avec la luzerne.

Profil des AG du lait et émission de méthane

Compte-tenu de variations simultanées de la méthanogenèse ruminale, de la biohydrogénation ruminale et de la sécrétion des différents AG du lait, des équations de prédiction de la production de CH₄ ont pu être établies en fonction de la consommation de fourrage, et du profil des AG du lait (notamment saturés à chaîne moyenne de C₈ à C₁₆, et monoinsaturés de structure *trans*, issus de C₂ et C₄), au sein de lots de vaches supplémentées ou non en graine ou huile de lin (Chilliard et al., 2009).

D'autres approches sont à l'heure actuelle étudiées pour limiter les émissions ruminales de méthane, notamment la sélection génétique sur le temps de séjour dans le rumen, la capacité à valoriser la ration et la production naturelle de méthane (Martin et al., 2006).

1.3.2. Quantité de lait, taux protéique, taux butyreux, composition du lait

De multiples enquêtes se sont intéressées aux variations des paramètres de production laitière avec des régimes enrichis en graines de lin extrudées. Brunschwig et al. (2010) ont synthétisé les résultats obtenus dans le tableau ci-dessous (tableau 2).

	Régimes témoins	Graine de lin extrudée
Lipides ajoutés (g/j)		362,9 ± 62,1 (17)
% Matière grasse de la ration	3,4 ± 0,22 (27)	5,48 ± 0,65 (7)
Matière sèche ingérée (kg/j)	20 ± 0,46 (39)	-0,66 ± 0,28 (13)
Lait (kg/j)	27,3 ± 1,02 (44)	-0,59 ± 0,48 (15)
Taux butyreux (g/kg)	39 ± 0,8 (44)	-3,2 ± 0,8 (15)
Taux protéique (g/kg)	33 ± 0,4 (41)	-0,5 ± 0,2 (15)
En gras : valeurs significatives, entre parenthèses le nombre d'études considérées.		

Tableau 2 : Synthèse bibliographique de l'évolution des paramètres de production laitière avec une supplémentation en graines de lin extrudées. Source : Brunschwig et al., 2010.

Une baisse de production laitière de 0,4 à 0,8 kg/jour, non significative, est rapportée d'après des synthèses de 8 et 15 études (Chillard et Ferlay, 2004 ; Brunschwig, 2011) Une absence d'effet est rapportée par Bork et al. (2010), Petit et al. (2003), Gonthier et al. (2005), Fuentes et al. (2008). La production laitière est en moyenne altérée par la supplémentation en graines de lin extrudées d'après les 15 études qui ont été considérées. Cependant une étude menée par l'institut de l'élevage en Normandie et en Picardie note une baisse de 0,4 kg/jour dans les trois premiers mois de lactation et une hausse d'1 kg/jour le reste de la lactation, en cohérence avec les résultats de Brunschwig et al. (1996 ; 1998). Les études conduites sur une lactation entière sont rares, en effet la plupart ne sont menées que jusqu'à la confirmation de la gestation (soit environ 3 mois). Aucune étude ne s'est intéressée à la courbe globale de la lactation : valeur du pic, persistance de la lactation.

Les régimes riches en concentrés et pauvres en fourrages, principalement lorsqu'ils sont associés à une addition de graines oléagineuses, entraînent une diminution de la quantité des MG ans le lait des vaches (Chouinard et al., 1999). Les rations enrichies en graines de lin extrudées n'y font pas exception comme le confirme la baisse significative de 3,2g/kg de lait obtenue par Brunschwig et al. (2010). L'étude menée par l'institut de l'élevage montre une baisse de 3,5g/kg de lait constante au cours de la lactation.

Enfin le TP baisse significativement de 0,5g/kg de lait en moyenne, en début de lactation la chute est moins importante qu'en milieu et fin de lactation (Institut de l'élevage, 2006). Cette baisse peut être amoindrie par un apport excédentaire d'azote et d'énergie (Mathieu et al., 2008).

On sait qu'une alimentation enrichie en CLA chez la vache laitière entraîne des diminutions de la production et de la concentration en matière grasse, ainsi que de la teneur en acides gras à courtes et moyennes chaînes dans la matière grasse du lait. Il en résulte une corrélation négative entre la teneur en matière grasse et la teneur en CLA du lait (Loor et al., 1998). Les effets d'une supplémentation en AGPI n-3 sur la production laitière peuvent s'expliquer au moins en partie par l'action des CLA.

Une alimentation enrichie en AGPI n-3 a pour conséquence une baisse des taux, plus marquée pour le TB et une baisse de la production laitière au moins en début de lactation.

1.3.3. Gestion du risque de cétose

En cas de forte production laitière et d'apports énergétiques insuffisants, la lipomobilisation est importante tandis que l'utilisation du glucose dans les tissus autres que le parenchyme mammaire diminue. Des AGNE sont libérés dans le sang à partir du tissu adipeux pour être transformés dans le foie où ils doivent subir une β -oxydation afin d'être utilisables pour la production d'énergie. Dans le cas où l'oxydation est partielle, il y a formation de corps cétoniques. Si la voie de β -oxydation est saturée, il y a alors formation de triglycérides dans le foie, mais la faible synthèse de VLDL empêche l'exportation de ces triglycérides vers le sang, d'où une éventuelle stéatose hépatique.

L'apport d'AG n-3 sous forme de lin dans la ration peut contribuer à abaisser les concentrations sanguines en AGNE (Petit et al., non publié in Petit et Benschaa, 2007). Mashek et al. (2005) obtient, lui aussi, une diminution des concentrations plasmatiques d'AGNE, de β -hydroxybutyrate, et des concentrations hépatiques de triglycérides à la suite d'une administration par voie veineuse d'émulsion de triacylglycérols dérivés d'une infusion de graines de lin par rapport une émulsion issue du suif, chez des vaches qui ne sont ni pleines ni lactation.

Une explication possible de ce phénomène est que le PPAR α (peroxisome proliferator-activated receptor) augmente l'activité des enzymes hépatiques impliquées dans la β -oxydation. Mashek et al. (2005) attribuent ces modifications induites par l'apport de graines de lin à une modification de la sensibilité à l'insuline ce qui augmenterait l'inhibition de la lipolyse. Le peroxisome proliferator-activated receptor ou récepteur au facteur activé de prolifération des peroxysomes, ou encore PPAR, est une protéine de la superfamille des récepteurs nucléaires liant naturellement les lipides et agissant comme facteur de transcription des gènes cibles impliqués

notamment dans le métabolisme lipidique et l'adipogénèse. D'autres encore expliquent que les graines de lin affecteraient la sécrétion de l'insuline induite par la glycémie (Xiao et al. 2006 cités par Andersen et al., 2008).

D'autres études ne montrent pas de différence significative pour les glycémies, concentrations plasmatiques en AGNE et quantité ingérée lors d'enrichissement des rations avec différents graines riches en AGPI (lin, lin extrudé, tournesol) chez des vaches en lactation (Petit et al., 2004), voire une augmentation des AGNE et une baisse plus marquée de la NEC dans les neuf semaines suivants le vêlage pour des vaches recevant du lin en comparaison avec celles recevant du soja (Ponter et al., 2006).

De même, l'apport de lin en prépartum n'a pas diminué les concentrations plasmatiques d'AGNE et de β -hydroxybutyrate mais a détérioré la glycémie en post-partum. L'insuline n'est affectée qu'en prépartum ainsi le lin ne semble pas voir d'effets sur l'incidence des cétozes (Andersen et al., 2008).

Les conditions expérimentales peuvent en partie expliquer ces différences, en effet, il est important de considérer le stade dans la lactation, et le passé alimentaire de ces animaux « d'expérimentation », souvent utilisés pour plusieurs manipulations.

Généralement, la quantité de matière sèche ingérée est proportionnellement inverse aux concentrations plasmatique en AGNE et hépatique en triglycérides (Bertics et al., 1992 in Petit et al., 2007), ce qui est en accord avec les études menées par Petit et al. (2007) où la quantité ingérée est plus faible et les AGNE plasmatiques plus élevés pour les vaches nourries avec un aliment riche en C16:0 et C18:1 (Megalac) que celles nourries avec des graines de lin.

De plus, une ration enrichie en MG avant vêlage diminue l'accumulation de triglycérides dans le foie au vêlage, signe d'une meilleure capacité à réaliser l'oxydation des AG selon Grum et al. (1996) (cités par Petit et al., 2007). Ainsi une ration enrichie en AG n-3, débutée au cours du tarissement, réduirait les risques de stéatose-cétose.

1.3.4. Reproduction

1.3.4.1. Introduction

Depuis le milieu des années 1980, le constat est unanime, on observe une baisse de la réussite en 1^{ère} insémination chez les vaches Prim'Holstein. Royal et al. (2000) indiquent une baisse du pourcentage de réussite en 1^{ère} insémination d'un point par an. Une étude menée dans le grand Ouest a montré une baisse de 4,1 % à 7,9 % entre 1995 et 2002, selon les centres d'insémination considérés (Le Mezec et al., 2005). L'Association Française des Eleveurs de la race Prim'Holstein fait état d'une baisse de 42 à 38% entre 2000 et 2008. La dégradation de la qualité de l'oocyte et celle de l'embryon sont les 2 principaux facteurs évoqués pour expliquer la baisse du taux de conception et la hausse de la mortalité embryonnaire précoce (Leroy et al., 2008). Les études se sont alors multipliées afin de proposer aux éleveurs laitiers de nouvelles alternatives en matière de conduite d'élevage pour palier à cette baisse. La supplémentation en AGPI a été une des solutions abondamment étudiée. Nous nous intéresserons à la supplémentation en AGPI n-3 avec des aliments utilisés dans le cadre de l'étude de terrain mais aussi des aliments issus de poisson.

1.3.4.2. Dynamique folliculaire

La dynamique folliculaire est identique pour les 3 traitements (graines de lin tanné, huile de poisson ou mélange des deux) testés par Petit et al. (2002). Le nombre de follicules sur des vaches recevant du lin aplati ou du tournesol aplati n'est pas significativement différent pour Ambrose et al., 2006. De même, lors de collecte d'ovocytes sans traitement de super ovulation, le nombre n'est pas modifié par le traitement subi (AGPI n-3 ou AGPI n-6) (Saint-Dizier et al., 2010). Au contraire, le nombre moyen de follicules de 2 à 5 mm aux jours 5 et 9 du cycle a été plus élevé chez des vaches qui recevaient 1 kg/j de lipides encapsulés riches en C18:3 par rapport à une ration riche en AG n-6 (Zachut et al., 2010).

Ambrose et al. (2006) rapportent qu'une supplémentation en lin aplati augmente le diamètre moyen des follicules ovariens par rapport à une supplémentation en tournesol aplati, en effet le diamètre moyen du follicule préovulatoire est de $16,9 \pm 0,9$ mm pour les vaches recevant une ration contenant des graines de lin alors qu'il n'est que de $14,1 \pm 0,9$ mm pour les vaches recevant une ration contenant des graines de tournesol le jour de la première insémination sur huit vaches dans chacun des deux groupes. Mattos et al. (2000) rapportent une explication en lien avec une augmentation du pic de LH. Une fertilité plus importante a été rapportée chez des vaches avec de

grands follicules sans une augmentation des concentrations en progestérone dans la phase lutéale suivante. L'ovulation de plus grands follicules chez les vaches supplémentées en lin pourrait contribuer à l'amélioration du taux de conception, peut-être due à un ovocyte plus viable, le nombre de follicules et la taille du corps jaune n'ayant pas été affectés.

Chez des vaches recevant des rations très riches en AGPI n-3 (lin ou huile de poisson), on trouve des corps jaunes de plus grand diamètre qu'avec des rations non supplémentées en matière grasse (Petit et al., 2002 ; Petit et Twagiramungu, 2006 ; Childs et al., 2008). Au contraire Ambrose et al. (2006), bien que faisant état de follicule pré-ovulatoire de plus grande taille (lin vs. tournesol) ne rapportent aucune différence significative sur la taille du corps jaune. Childs et al. (2008) montrent une augmentation de la taille du CJ à J₇ mais que l'on ne retrouve plus à J₁₅, sur des nullipares après deux injections de prostaglandines. De même, des vaches recevant directement des AGPI n-3 dans le duodénum présentent des corps jaunes de plus petit diamètre que les témoins (Petit et al. 2002), peut-être par trop forte concentration en ALA puisque que la biohydrogénation ruminale est évitée.

Ainsi, les données concernant la dynamique folliculaire semblent être tout autant dépendantes de la ration que du moyen thérapeutique utilisé pour obtenir l'ovulation. Les facteurs pouvant expliquer l'amélioration de la reproduction avec une ration enrichie en lin doivent être recherchés ailleurs.

1.3.4.3. Progestérone et corps jaune

On sait qu'une partie des avortements précoces est due à un déficit de production de progestérone (PGR) et que des teneurs élevées de PGR avant et après IA sont associées à des taux de gestation plus élevés (Lamming et al., 1998 ; Starbuck et al., 2004).

La bibliographie rapporte des données contradictoires quant à l'effet d'une supplémentation en AGPI n-3 sur la quantité de progestérone produite qu'elle soit mesurée sur le plasma ou sur le lait. Une augmentation de la progestérone plasmatique est constatée à J₇ et J₈ après ovulation par Thangavelu et al. (2007) qui comparent les graines de lin à des acides gras saturés et par Petit et al. (2006) à J₁₇ et J₂₁ qui comparent du lin avec du soja. Aucun effet sur la quantité de progestérone n'est constaté suite à l'apport d'huile de poisson (Mattos et al., 2002 ; Heravi et al., 2007) ou de graines de lin par rapport à une ration enrichie en acides gras saturés (Fuentes et al., 2008) ou par rapport à une ration enrichie en AGPI n-6 (Ponter et al., 2005 ; Thangavelu et al., 2007 ; Ambrose et al., 2006 ; Robinson et al., 2002). Enfin une diminution de la quantité de progestérone est relatée

par Robinson et al. (2002) avec une ration enrichie avec du lin et par Hinckley et al. (1996) avec une ration enrichie avec de l'huile de poisson.

Les mécanismes permettant d'expliquer les variations de la quantité de progestérone sont encore inconnus. Plusieurs hypothèses sont proposées :

*Une taille de follicule plus importante peut avoir des effets bénéfiques sur la qualité de l'oocyte et sur le fonctionnement du corps jaune (Vasconcelos et al., 2001).

*Une altération de la capacité de synthèse de la progestérone par le corps jaune chez les animaux en déficit énergétique est largement supposée (Leroy et al., 2008). Ainsi la période par rapport au vêlage à laquelle l'expérimentation est conduite peut influencer les résultats.

*Une baisse de la clairance de la progestérone chez les animaux supplémentés avec des matières grasses a été démontrée expérimentalement en enlevant le corps jaune par ovariectomie, et en mesurant la décroissance de la progestéronémie (Hawkins et al., 1995).

Enfin la majeure partie du catabolisme de la progestérone a lieu dans le foie via les cytochromes P450 2C et 3A. En diminuant l'expression des enzymes impliquées dans le catabolisme de la progestérone en tout début de gestation, et donc en augmentant le temps de demi-vie de cette dernière, on peut augmenter les concentrations de progestérone plasmatique. La décroissance constante de la progestérone peut être sévèrement réduite par l'insuline, qui induirait une baisse des ARNm codant pour ces deux cytochromes (Lemley et al., 2008). Ainsi tous les régimes entraînant une insulinémie haute, favorisent une concentration en progestérone plasmatique élevée. Selon Andersen et al. (2008), l'insulinémie n'est pas affectée par une supplémentation de graines de lin (cf. paragraphe : Gestion du risque de cétose).

1.3.4.4. PGF_{2α}

On estime qu'au moins 40 % de la mortalité embryonnaire survient entre J₈ et J₁₇ de la gestation (Bilby et al., 2006d). Cette mortalité précoce coïncide avec la période durant laquelle l'embryon inhibe la sécrétion de PGF_{2α} (J₁₅ à J₁₇), ce qui suggère qu'une part de la mortalité embryonnaire trouve son origine dans l'incapacité de l'embryon à inhiber la sécrétion utérine de PGF_{2α}. A J₁₇, la taille des embryons est très variable ; une taille insuffisante peut réduire la capacité de ce dernier à contrôler la sécrétion de PGF_{2α}. Des stratégies permettant de réduire la sécrétion de PGF_{2α} pourraient favoriser la survie de ces embryons insuffisamment développés (Childs et al., 2008). Or on sait (cf précédemment) que le bon développement embryonnaire précoce dépend d'une quantité de progestérone suffisante et que la quantité de progestérone sécrétée est fonction de la

présence du corps jaune. Enfin la sensibilité du corps jaune à $\text{PGF}_{2\alpha}$ sera d'autant plus retardée, que sa capacité à sécréter de la progestérone sera forte.

Notons également que dans les 10 premiers jours suivant le vêlage, une décharge de $\text{PGF}_{2\alpha}$ a lieu, mise en évidence par un taux élevé de 13,14-dihydro-15-keto- $\text{PGF}_{2\alpha}$ plasmatique (Guilbault et al., 1984) ; chez les vaches ne développant pas de métrite, cette décharge est élevée (Seal et al., 2002 ; Silvestre et al., 2009). Ainsi une altération de la synthèse des prostaglandines en post partum immédiat peut être néfaste à un retour rapide à un utérus apte à recevoir une nouvelle gestation.

- **Les constatations expérimentales**

De nombreuses études s'accordent à dire que l'apport d'AGPI n-3 diminue la synthèse endométriale des prostaglandines de la série 2 (Petit et al., 2002 (graines de lin); Mattos et al., 2000, 2002 (farine de poisson), 2004 ; Thatcher et al., 1997 (EPA et DHA)).

L'EPA et le DHA sont de puissants inhibiteurs de la production de $\text{PGF}_{2\alpha}$ alors que l'acide linoléique n'a pas d'effets lors de la stimulation des cellules endométriales avec du phorbol 12,13 dibutyrate (PDBu). Une des méthodes pour évaluer la sécrétion de $\text{PGF}_{2\alpha}$ est de stimuler les cellules endométriales avec une molécule activatrice des protéines kinases C, le PDBu. Cette activation induit l'expression du gène codant pour le gène PGHS-2 et stimule la sécrétion de $\text{PGF}_{2\alpha}$ (figure 7).

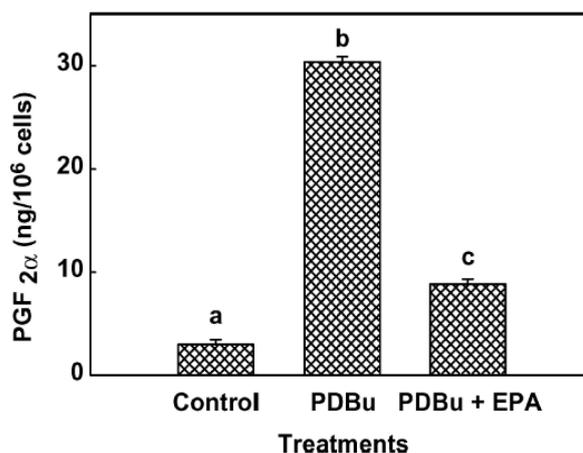


Figure 7 : Effet de l'EPA après stimulation des cellules endométriales au PDBu.

In vitro, les cellules endométriales bovines, préalablement incubées pendant 24 heures avec de l'EPA, produisent 75% de $\text{PGF}_{2\alpha}$ en moins ($p < 0,01$) que les cellules seulement stimulées avec le PDBu (Mattos et al., 2003).

Cependant l'effet d'une supplémentation sur la sécrétion de prostaglandines est inconstant selon les études. Heravi Moussavi et al. (2007) ont observé que la supplémentation de la ration en AG (huile de poisson) n'affecte pas la concentration plasmatique en 13,14-dihydro-15-keto- $\text{PGF}_{2\alpha}$ suite à un challenge à l'ocytocine. D'autres sont parvenus aux mêmes conclusions (Petit et al., 2006 (graine de lin entière); Petit et al., 2004 (graine de lin) ; Childs et al., 2008 (huile de poisson); Wamsley et al., 2005 ; Cheng et al., 2001 (graines de lin)). La nature de la MG utilisée peut

expliquer les différences entre les études (ALA, EPA, DHA), le moment du cycle auquel les mesures sont réalisées doit aussi être pris en compte (Childs et al., 2008).

Il n'y a pas de différence significative de la concentration en PGF à 9 semaines post-partum sur des vaches synchronisées (Petit et Twagiramungu, 2006). Les différences qu'il existe entre les expériences présentées sont dues au jour du cycle où sont effectuées les mesures de concentration en prostaglandines. Childs et al. (2008) rapportent des concentrations en PGF_{2α} plus élevées en réponse à une injection d'ocytocine pour des vaches supplémentées avec une source d'AGPI n-6 (soja) que pour des vaches supplémentées avec une source d'AGPI n-3 (huile de poisson) au jour 15 du cycle mais pas au jour 16 du cycle.

Enfin d'autres montrent une augmentation en PGF_{2α} chez des vaches ayant reçu du lin tanné (graines) avec de l'huile de poisson par rapport à celles n'ayant reçu que du lin tanné (p=0,07) (Petit et al., 2002).

A ces effets si contrastés, Wamsley et al. (2005) proposent une explication en lien avec la progestéronémie : la farine de poisson, via EPA et DHA, pourrait réduire la synthèse de prostaglandines uniquement chez les animaux dont la progestéronémie est faible. De plus, il est important distinguer les effets in vivo des effets in vitro.

- **Synthèse des prostaglandines**

L'acide arachidonique ou AA, l'acide eicosapentaénoïque ou EPA et l'acide eicosatriénoïque sont les substrats respectifs pour la synthèse des prostaglandines des séries 1, 2 et 3 (Staples et al., 1998) (figure 8). L'ALA peut être désaturé (2 étapes) et élongué (1 étape) pour former l'EPA (Wathes et al., 2007). Les prostaglandines de la série 3 ont une activité biologique plus faible que celles de la série 2 produites à partir d'AG oméga 6 (Fly et Johnston, 1990).

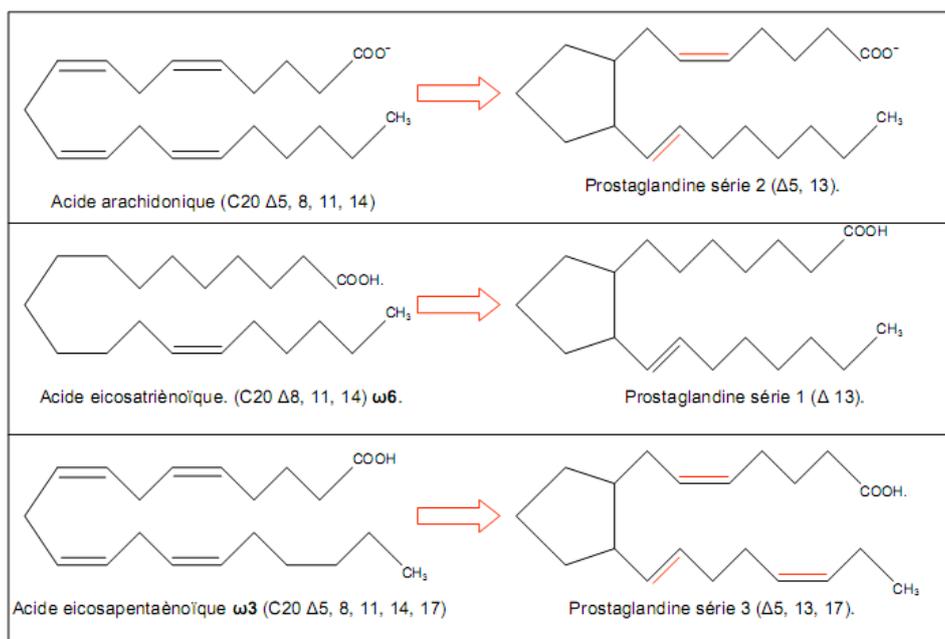


Figure 8 : Origine des 3 séries de prostaglandines.

Au cours des 10 à 12 premiers jours du cycle, la progestérone stimule la synthèse de phospholipides et leur stockage dans l'endomètre en vue de leur utilisation ultérieure dans la synthèse de $\text{PGF}_{2\alpha}$. L'ocytocine libérée par le corps jaune stimule la production par l'endomètre de $\text{PGF}_{2\alpha}$, via des récepteurs membranaires. Les œstrogènes favorisent la libération de l'AA des phospholipides puis sa transformation en prostaglandines de type F en agissant sur les phospholipases A_2 et C (Coyne et al., 2008) et le complexe prostaglandine-synthétase PGHS, connue aussi sous le nom de cyclooxygénase (COX). Il existe deux enzymes PGHS, PGHS-1 (ou COX-1) et PGHS-2 (ou COX-2), dont les structures et les fonctions sont identiques. Les prostaglandines sont obtenues après être passées par un stade intermédiaire instable, par exemple PGH_2 lorsque le précurseur est l'AA (Coyne et al., 2008). Le PGH_2 formé est converti soit en PGE_2 par PGES, soit en $\text{PGF}_{2\alpha}$ par PGFS. Une enzyme permet d'obtenir $\text{PGF}_{2\alpha}$ à partir de PGE_2 , il s'agit de PGE_2 9-ketoreductase (Coyne et al., 2008) (figure 9).

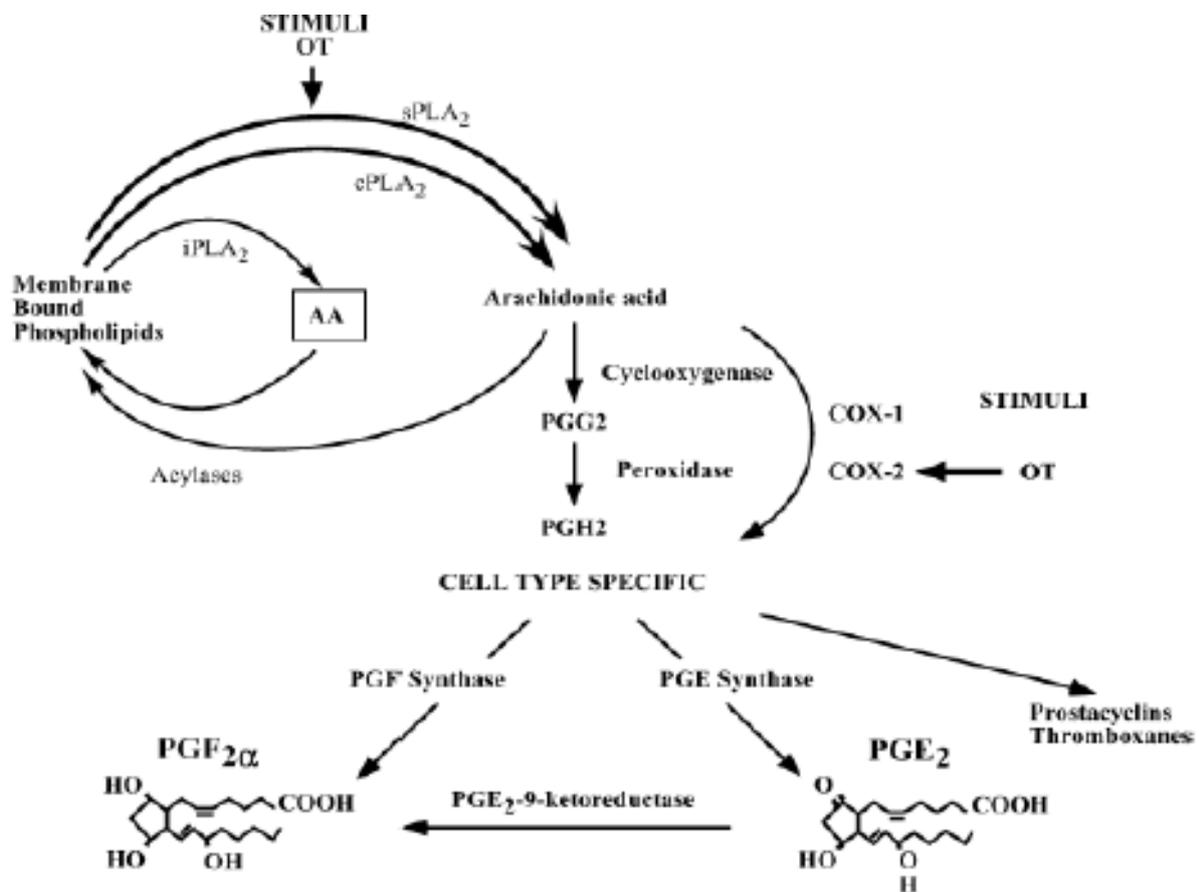


Figure 9 : Voie de biosynthèse de PGF₂α au niveau de l'endomètre des ruminants
Source : Goff, 2004.

- **Mécanismes d'inhibition de la synthèse des prostaglandines**

Alors que la synthèse des prostaglandines dépend de l'apport en AG, ces AG peuvent aussi l'inhiber (Staples et al., 1998). Cette inhibition de la synthèse de PGF₂α se fait par différents mécanismes.

Successivement les différents mécanismes impliqués dans la modification de PGF₂ seront exposés.

- ✓ *Réduction de la disponibilité membranaire en acide arachidonique*

Les prostaglandines sont synthétisées à partir de l'AA présent dans la membrane plasmique des cellules de l'endomètre, ainsi une réduction de sa disponibilité ou de sa synthèse peut diminuer la sécrétion de PGF₂ au niveau de l'utérus (Mattos et al., 2003).

La proportion des différents AG dans la ration modifie la composition de la membrane plasmique en phospholipides (Wathes et al., 2007), par exemple une disponibilité réduite en AA, ayant pour origine le C18:2, entraîne une plus grande incorporation des autres AG dans les

phospholipides des membranes plasmiques des cellules. Ceci est décrit par Bilby et al. (2006c) avec l'augmentation de la proportion d'EPA et de DHA au sein des membranes au détriment de l'AA. Un changement dans la composition membranaire n'est détectable que 3 semaines après la mise en place d'un régime enrichi en AG n-3.

Trujillo et Broughton (1995), cités par Mattos et al. (2000), ont montré une réduction significative de la proportion d'AA parmi les phospholipides extraits sur des cellules hépatiques de rats recevant une alimentation enrichie en AG n-3. A l'inverse, Howie et al. (1992) (cités par Mattos et al. (2000)) montrent une relative stabilité de la teneur en AA même après une longue période de privation et un remplacement à hauteur de 50 % des AG n-6 présents dans les phospholipides de cellules utérines de rat, par des AG n-3.

Plusieurs études, cités par Guelou (2010) ont mis en évidence l'incorporation de DHA (Mattos et al., 2004 ; Bilby et al., 2006c ; Heravi Moussavi et al., 2007 ; Coyne et al., 2008) et d'EPA (Burns et al., 2003 ; Mattos et al., 2004 ; Bilby et al., 2006 ; Heravi Moussavi et al., 2007 ; Coyne et al., 2008 ; Childs et al., 2008) au sein des membranes des tissus utérins lorsque les animaux reçoivent de la farine ou de l'huile de poisson, et ainsi la disponibilité en AA est moindre.

Deux mécanismes peuvent expliquer cette moindre disponibilité d'AA dans les membranes plasmiques des cellules de l'endomètre.

D'une part accroître la disponibilité d'AGPI n-3 (ALA, EPA, DHA) a pour conséquence de diminuer la disponibilité en AA, en effet l'AA est issu d'AGPI n-6 et un AGPI n-3 ne peut être converti en AGPI n-6 (Mattos et al., 2000). En effet, le LA et l'ALA sont dits essentiels, aucune cellule n'est capable d'insérer une double liaison entre la terminaison CH₃ et la première double liaison. L'inhibition de la synthèse de PGF_{2α} par les AGPI n-3 dépend donc du ratio n-6 / n-3. Augmenter ce ratio dans le milieu de culture accroît la disponibilité en AA pour le pool membranaire (Caldari Torres et al., 2006).

D'autre part, il existe une compétition des AGPI n-3 pour la Δ-6-désaturase. Elle semble agir préférentiellement sur les AGPI n-3 aux dépens des AGPI n-6 (Sprecher, 1981, cité par Mattos et al., 2000). Chez l'homme, Emken et al. (1990), cités par Mattos et al. (2000), montrent que la conversion de l'ALA en EPA est plus importante que la conversion de AL en AA, en raison d'une compétition entre l'ALA et l'AL pour la Δ-6-désaturase. Ce mécanisme favorise donc la synthèse de l'EPA aux dépens de l'AA. La présence d'EPA et de DHA peut également inhiber la synthèse d'AA à partir de l'AL par inhibition des enzymes de désaturation et d'élongation nécessaires à cette transformation (Tatcher et al. 2004).

✓ *Compétition des AG pour la PGHS, inhibition de sa synthèse et de son activité*

Un autre mécanisme possible pour réduire la synthèse de prostaglandines est la compétition entre les AGPI pour la PGHS (Prostaglandine G/H Synthase). En effet, l'EPA peut aussi entrer en compétition avec l'AA pour la PGHS (Weber et al., 1990 ; cités par Staples et al., 1998). L'effet inhibiteur de l'EPA sur la synthèse de $\text{PGF}_{2\alpha}$ diminue de 88 à 40% quand le ratio n-6/n-3 passe de 0 à 19 (Caldrai-Torres et al., 2006). L'EPA pourrait inhiber l'activité de la PGHS-2 dans des cellules endométriales bovines, en effet des cellules tumorales hépatiques de rat incubées en présence d'AA, d'EPA ou de DHA voient leur activité de la PGHS-2 inhibée (Larsen et al., 1997, cités par Caldari-Torres et al., 2006). L'EPA inactive totalement cette enzyme si, il est ajouté 30 secondes avant l'AA.

Mattos et al. (2003) a mis en culture des cellules avec différentes concentrations d'EPA et d'AA, ce qui a permis de permettre en évidence que l'AA augmente la sécrétion de $\text{PGF}_{2\alpha}$ alors que l'EPA la réduit (figure 10). L'incubation avec la dose la plus importante d'EPA réduit considérablement la sécrétion de $\text{PGF}_{2\alpha}$ (de même que pour Ringbom et al., 2001) mais cette inhibition est levée avec l'apport plus important d'AA. L'inhibition de la synthèse de $\text{PGF}_{2\alpha}$ par les AG n-3 dépend du ratio n-6 /n-3. Augmenter ce ratio dans le milieu de culture réduit la compétition exercée par les AG n-3 pour l'enzyme PGHS-2 (Caldari-Torres et al., 2006).

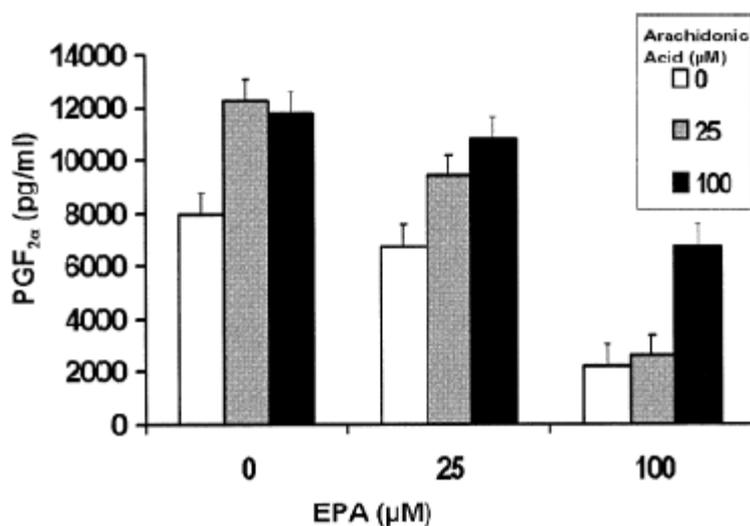


Figure 10 : Concentrations en $\text{PGF}_{2\alpha}$ dans le milieu de culture (moyenne ajustée \pm écart type). Les cellules sont mises en culture pendant 24 heures avec 0, 25 ou 100 μM d'AA et d'EPA. Source : Mattos et al. (2003).

De plus, alors que le DHA n'est pas un substrat de la PGHS, il représente également un inhibiteur de cette enzyme (Thatcher et al., 2004). Enfin, in vitro, les AGPI peuvent inhiber la synthèse de la PGHS (Achard et al., 1997, cités par Mattos et al., 2000, Bilby et al., 2006), et ainsi inhiber la conversion de l'AA en prostaglandines de série 2.

- **Nutrigénomique**

La nutriginomique est une science nouvelle qui s'appuie sur une découverte importante : l'alimentation a une influence sur la quantité de protéines produites, via l'expression des gènes. L'interaction génome-nutriments ne modifie en rien le génome, uniquement elle influence son expression. Ainsi, telle ou telle ration peut favoriser l'expression de certains gènes. Qu'en est-il des AG n-3 ?

L'expression de différents gènes impliqués dans l'établissement de la gestation, dans les tissus embryonnaire et dans l'endomètre, est fortement modifiée par une supplémentation en AGPI n-3 (Palin et al., 2005). Les résultats obtenus par Friggens et al. (2010) montrent qu'une source d'AGPI n-3 (graines de lin) peut avoir un impact direct sur l'endomètre en modulant l'expression des gènes impliqués dans le métabolisme des AG et dans le développement et la survie embryonnaire. Ainsi cela pourrait contribuer à améliorer la fertilité des vaches nourries avec des AGPI n-3 par rapport à celles nourries avec des AGPI n-6 (Ambrose et al., 2006).

Il est possible que certains des effets bénéfiques des AGPI oméga 3 sur la fertilité soient le résultat d'une activation des PPAR, car les AGPI peuvent se lier à ces facteurs. En les activant, les AGPI peuvent affecter les concentrations cellulaires en certaines enzymes impliquées dans la synthèse de prostaglandines. Il en existe 3 sous-types de PPAR (α , δ , γ), chacun d'eux semble avoir une expression et un rôle fonctionnel spécifique.

PPAR δ est exprimé dans plusieurs tissus, et de façon plus importante dans le cerveau, le colon et la peau ; il est impliqué dans le contrôle du catabolisme lipidique et dans la reconnaissance de la gestation chez la vache, ce qui pourrait être en partie responsable des effets bénéfiques des AGPI oméga 3 (Mano et al., 2000 ; Matsuura et al., 1999 cités par Caldari-Torres (2006), Palin et al., 2005). Balaguer et al. (2005) ont mis en évidence une relation inverse entre le PPAR δ , l'expression dans l'utérus du récepteur α aux œstrogènes et les gènes codant pour la PGHS-2, suggérant ainsi l'implication de ce récepteur nucléaire dans la reproduction des mammifères (Caldari-Torres et al., 2006)

L'utilisation d'agoniste activant ces récepteurs augmente l'expression de la PGHS-2 et la production de $\text{PGF}_{2\alpha}$ (MacLaren et al., 2006). Des études ont montré en présence d'EPA une augmentation de l'expression des gènes codant pour PPAR δ associée à une réduction de la sécrétion de $\text{PGF}_{2\alpha}$ par les cellules endométriales bovines (MacLaren et al., 2006). Chez des animaux recevant la supplémentation en AGPI n-3, les teneurs en ARNm associées à PPAR α et δ sont approximativement 1,5 fois plus importantes ($p < 0,05$) (Coyne et al., 2008). De plus, les AGPI peuvent réduire la phosphorylation d'un facteur de transcription USF-2. Cette réduction est responsable de la diminution de la transactivation de PGHS-2 (Wathes et al., 2007).

En comparant deux lots supplémentés, 2 semaines après la mise bas jusqu'à 17 jours de gestation, avec ou non des graines de lin entières, on observe que les niveaux d'ARNm de la PGHS-2 et du PPAR sont réduits dans l'endomètre pour les vaches supplémentées. Ainsi la baisse de synthèse des $\text{PGF}_{2\alpha}$ observée lors de supplémentation en AGPI n-3 peut être une conséquence d'une régulation des ARNm de la PGHS-2 (Palin et al., 2005). En revanche, l'EPA n'a pas d'effet détectable sur les ARN messagers de la PGHS-2 ou du $\text{PPAR}\delta$ après stimulation à la PDBu, et donc n'a pas d'effet sur la synthèse de la PGHS-2 et du $\text{PPAR}\delta$ (Palin et al., 2005 ; Mattos et al., 2000 ; Bilby et al., 2006 ; Coyne et al., 2008). Achard et al. (1997), cités par Mattos et al. (2000), montrent que lorsque des cellules endothéliales sont cultivées en présence de DHA ou d'EPA, la quantité d'ARNm de PGHS-1 est réduite, alors que Coyne et al. (2008) ne notent pas de différence significative.

L'expression de PGFS n'est pas modifiée suite à la supplémentation (Bilby et al., 2006). En revanche, on dénombre 3 fois plus d'ARNm PGES chez le groupe AGPI n-3 par rapport au groupe acide palmitique, ce qui traduit une augmentation de l'expression de ce gène chez les animaux du groupe AGPI n-3, entraînant une augmentation de la quantité de PGE_2 sécrétée par l'endomètre (Coyne et al., 2008). Or PGE_2 est considérée comme un facteur lutéoprotecteur et facilite ainsi l'établissement d'une gestation (Kennedy, 1977 ; Pratt et al., 1977 ; cités par Coyne et al., 2008). Une augmentation de ce facteur dans le fluide utérin pourrait favoriser le développement embryonnaire et sa survie.

L'expression du gène associé à la synthèse de PLA_2 est diminuée pour le groupe AGPI oméga 3 ($p=0,06$). PLA_2 étant impliquée dans la mobilisation de l'AA depuis la membrane cellulaire, une diminution de son expression indique que l'AA est moins disponible pour la production de $\text{PGF}_{2\alpha}$ (Coyne et al., 2008). Cela est validé par la diminution de la concentration en AA dans l'endomètre chez les animaux alimentés avec une ration enrichie en AGPI n-3. L'expression de la PLC n'est pas modifiée par l'apport d'AGPI n-3 selon Coyne et al. (2008).

En résumé, les AGPI n-3 peuvent altérer la synthèse de PG de la série 2 :

- en remplaçant partiellement l'AA du réservoir membranaire, ce qui limite la disponibilité du précurseur pour la synthèse des PG.
- en diminuant la synthèse d'AA par inhibition des delta 5 et delta 6 desaturase nécessaires à la conversion de l'AL en AA.
- en agissant en compétition avec l'AA pour la PGHS.
- en diminuant directement l'expression des gènes codant pour la PGHS-2.

1.3.4.5. Synthèse des prostaglandines (PGE₂, PGI₂) par l'embryon

Les prostaglandines d'origine embryonnaire jouent un rôle clé dans le développement précoce de la gestation avec la PGE₂ qui contribue à accroître la synthèse de progestérone, maintenir le corps jaune et établir la gestation (Weems et al., 2006 ; Weems et al., 2007 ; Wathes et al., 2007). L'embryon bovin produit avant J₁₂ de la PGE₂, puis de J₁₃ à J₁₅ PGE₂ et PGF_{2α}, et en plus à partir de J₁₅ de la PGI₂ (Hwang et al., 1988). PGE₂ étant lutéotrope et antilutéolytique, elle favorise la sécrétion par le corps jaune de progestérone (Weems et al., 2006 ; Weems et al., 2007 ; Shelton et al., 1990), augmente le taux de clivage et la croissance de l'embryon (Gurevich et al., 1993) et protège l'embryon durant cette période du stress oxydatif (Wentzel et al., 1999). PGI₂ potentialise la vasodilatation pendant le gestation (Magness et al., 1985) et pourrait jouer un rôle dans l'implantation de l'embryon (Liu et al., 2006). Une altération de la production en PGE₂ et PGI₂ par l'embryon en début de gestation pourrait alors avoir des effets délétères sur la mise en place de la gestation.

Meier et al. (2009) étudient, in vitro, la quantité de PGE₂ émise par le trophoblaste après une incubation courte dans une solution témoin ou dans une solution contenant de l'EPA, du DHA ou des AGPI n-6. Les sécrétions par l'endomètre de PGF_{2α} et PGE₂ ne sont pas modifiées suite à l'incubation en présence de DHA, EPA et ALA (5h d'incubation à une concentration de 10 μM), Bilby et al. (2006b) ont obtenu des résultats comparables. Le ratio PGF_{2α} sur PGE₂ diminue lorsqu'on compare l'ensemble des 3 traitements avec le témoin (p=0,026). En combinant les données des groupes EPA et DHA, on constate que la synthèse de PGE₂, par l'endomètre et par le trophoblaste, est réduite chez les vaches synchronisées avec le protocole PGF_{2α} mais pas avec OVAGEN® (Verkerk et al., 2000), un protocole de superovulation (FSH>>LH). Ces données soulignent l'importance du contexte hormonal et des protocoles utilisés. De plus des études avec un temps d'incubation plus important seraient nécessaires.

1.3.4.6. Les lignanes, de puissants antioxydants

En médecine humaine, des études consacrées à la physiopathologie des cas d'infertilité non élucidés ont montré que le stress oxydatif pouvait jouer un rôle au moins partiel (Agarwal et al., 2005). Chez les vaches, il est possible qu'une partie des infertilités non expliquées soit attribuable au stress oxydatif.

Le stress oxydatif en s'attaquant à la structure des molécules a des effets délétères sur les fonctions cellulaires (Agarwal et al., 2003). La conséquence du stress oxydatif sur les lipides,

appelée peroxydation lipidique, est un mécanisme en chaîne affectant les acides gras membranaires, conduisant à la formation d'hydroperoxydes (ROOH) instables, responsables de la diminution de la fluidité membranaire.

Les coques de lin, riche en lignanes, sont connues comme étant des antioxydants forts. (Prasad, 2000). Dans la glande mammaire, les coques de lin augmentent l'activité de la superoxyde dismutase, enzyme responsable de la suppression des radicaux libres, principaux acteurs du stress oxydatif, cela contribuerait à améliorer la reproduction. (Petit et al., 2009). En effet, chez la femme, il y a une bonne corrélation entre les niveaux de superoxyde dismutase et de catalase dans le fluide folliculaire et la fertilité (Pasqualotto et al., 2004). Une supplémentation en antioxydants avant et durant une période de stress pourrait améliorer la fertilité en limitant les sécrétions de cortisol et le stress oxydatif, ainsi le taux de gestation en serait amélioré (Megahed et al., 2008).

1.3.4.7. Retard de mise bas

La mise-bas est accompagnée d'une décharge massive de prostaglandines. Or précédemment, il a été montré que la supplémentation en AG n-3 affectait la production des prostaglandines. Olsen et al. (1995) indiquent que les AG n-3 modifient l'activité utérine au cours de la parturition chez des rats et des moutons, et retardent l'accouchement chez les femmes. Des rattes (Leaver et al., 1986) et des brebis (Caldari-Torres et al., 2006), pour lesquelles la source majeure d'acides gras était dans cette expérimentation l'huile de poisson, ont une mise-bas retardée et la synthèse utérine de PGE₂ est inhibée. Chez des brebis gestantes, avant terme, une injection intraveineuse d'une émulsion contenant 20% d'EPA et de DHA retarde le début du part et le rallonge comparativement à l'injection d'une émulsion contenant 20% de lipides dont 7% d'ALA (témoin). Chez les animaux dont le part est allongé, la concentration plasmatique en PGE₂ est plus basse que dans le lot témoin, suggérant ainsi l'implication de PGHS détaillée précédemment (Baguma-Nibasheka et al., 1999).

Une injection de betaméthasone est suivie d'une baisse de la concentration plasmatique en progestérone dans les deux groupes, désignés ci-dessus et d'une hausse de la concentration en œstradiol seulement dans le lot témoin (Baguma-Nibasheka et al., 1999). Ainsi le DHA et l'EPA pourraient agir sur la conversion de la progestérone en œstradiol.

Une autre explication pourrait être que le pool membranaire d'AGPI n-3 ne permet pas la synthèse de prostaglandines de la série 2. En effet, dans les conditions normales, les concentrations membranaires d'EPA baissent significativement dans l'endomètre de brebis au cours du dernier tiers de la gestation (Zhang et al., 1995).

Une supplémentation en AG n-3 chez des femmes enceintes a permis une réduction significative de l'incidence des accouchements prématurés et une augmentation du poids de naissance associée à une grossesse plus longue.

1.3.4.8. Conclusion

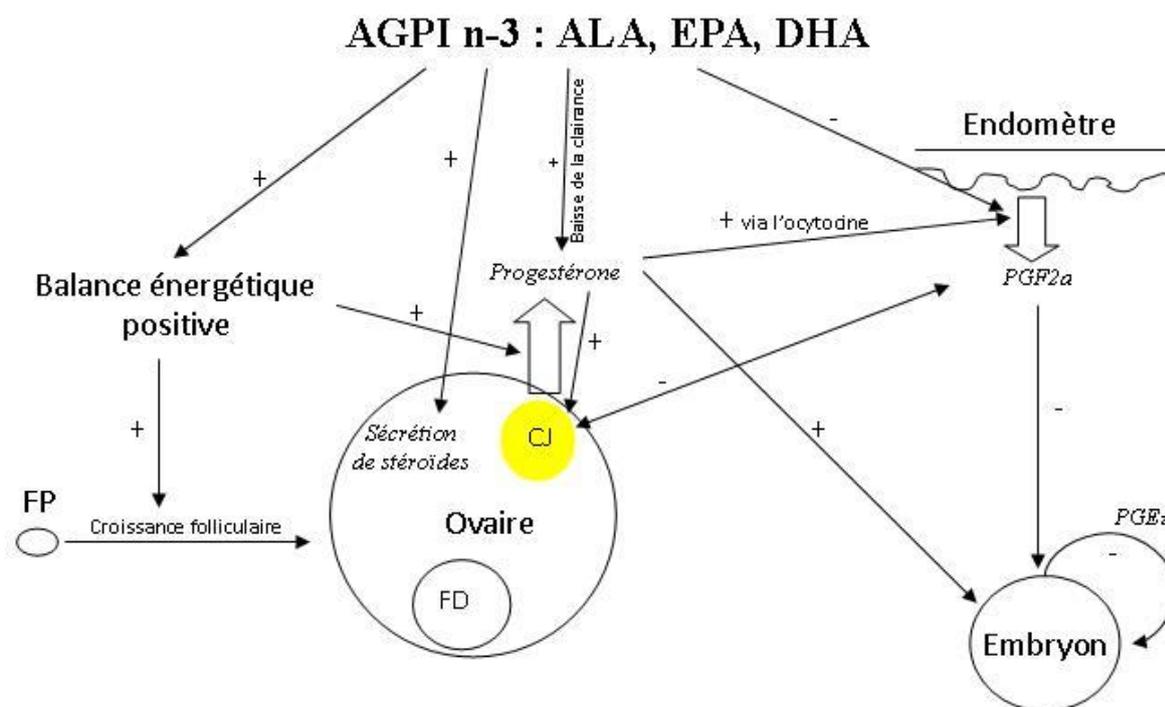
Revenons au plus intéressant à savoir les effets sur la fertilité et la fécondité :

Ambrose et al. (2006; pas de lin vs. lin aplati), Petit and Twagiramungu (2006 ; graines de lin entières vs sels calciques d'huile de palme ou soja micronisé), Fuentes et al. (2008; soja extrudé vs. lin extrude), Petit et al. (2008; graines de lin entières vs. sels calciques d'huile de palme) et Bork et al. (2010; lin aplati vs. pas de lin) n'ont rapporté aucune amélioration du taux de conception chez des vaches laitières recevant une ration contenant du lin sous différentes formes. Une ration enrichie avec de l'huile de poisson distribuée dès 30 jours post-partum, diminue la mortalité embryonnaire après la première insémination, augmente la réussite en 2^{ème} insémination et augmente le nombre de vaches pleines après deux inséminations. Ces résultats sont amplifiés si les vaches ont reçu une alimentation supplémentée en huile de tournesol autour du vêlage suivi de la supplémentation en huile de poisson (Silvestre et al., 2011).

Chez des vaches laitières donneuses d'embryons, en comparant ajout de lin et ajout de sels calciques d'huile de palme, Petit et al. (2008) n'ont montré aucun effet sur le nombre d'embryons viables par vache, le nombre d'embryons dégénérés par vache ou le nombre d'ovocytes non fertilisés par vache. De même, pour Saint-Dizier et al. (2010) la supplémentation en lin n'a pas amélioré significativement le nombre et le taux de clivage des ovocytes après une ponction folliculaire échoguidée et une fécondation in vitro mais tend à augmenter le taux de développement et la qualité morphologique des embryons par rapport à une supplémentation en soja. Le taux de fertilité est globalement diminué (64.3 vs. 78.4%) mais la supplémentation n'a pas d'effet sur la future gestation des receveuses d'embryons de grade 1 (Petit et al., 2008).

Selon Burke et al. (1997), l'huile de poisson augmenterait le taux de gestation seulement dans les élevages dans lesquels la fertilité est mauvaise. Les effets bénéfiques des AGPI n-3 sur la reproduction seraient meilleurs chez les multipares que chez les primipares (Petit et al., 2008).

En résumé, au cours de la mise en place d'une gestation, les AGPI n-3 agissent de façon directe sur le bilan énergétique, la progestéronémie et la synthèse de $\text{PGF}_{2\alpha}$ (figure 11).



(FP : Follicule primaire, FD : Follicule dominant, CJ : Corps jaune)

Figure 11 : Schéma des principaux mécanismes affectant le début de la gestation chez les vaches laitières recevant une alimentation enrichie en AGPI n-3.

1.3.5. Immunité

Chez l'homme, des effets positifs des acides gras poly-insaturés à longue chaîne (EPA, DHA) ont été documentés (Erickson et Hubbard, 1996). Ces acides gras diminuent la production de cytokines proinflammatoires et diminuent l'inflammation dans diverses situations pathologiques (arthrite, psoriasis, colite ulcéreuse). Cependant, en excès (plusieurs grammes par jour), ces acides gras peuvent diminuer la réponse immunitaire des cellules T, ce qui peut se traduire par une moindre résistance aux infections.

➤ Immunité vis-à-vis d'une infestation parasitaire

Muturi et al. (2005) ont étudié la réaction à une infestation parasitaire sur des veaux recevant, en plus du lait, 25g par jour d'huile de poisson ou d'un mélange d'huile palme et d'huile de colza. 16 des 24 veaux étaient infectés par des larves L3 d'*Ostertagia ostertagi* et par *Cooperia oncophora*, 3 fois par semaine pendant 8 semaines. Les comptages d'œufs effectués 2 fois par semaine ne montrent pas d'influence significative de la nature de l'huile employée. Le comptage des formes immatures après abattage montre une hausse significative ($p < 0,05$) pour le groupe

supplémenté avec l'huile de poisson et donc une diminution de la capacité de l'organisme à lutter contre une infestation parasitaire. Les facteurs cellulaires de l'immunité que sont les mastocytes (impliqués dans l'initiation et l'amplification de la réaction inflammatoire) et les éosinophiles (qui réalisent la phagocytose), significativement augmentés pour les groupes infectés, sont significativement plus bas dans les tissus intestinaux pour le groupe infecté et supplémenté avec l'huile de poisson. Ainsi une supplémentation enrichie en oméga 3 telle l'huile de poisson peut influencer les médiateurs cellulaires de l'immunité suite à une infection par des nématodes chez les veaux.

➤ Immunité vis-à-vis d'une infection bactérienne

Ballou et al. (2008) ont montré une atténuation de la réponse de la phase aigue lors d'une infection à *Salmonella typhimurium*, chez des veaux Jersey d'un mois, supplémenté avec de l'huile de poisson ; par exemple l'augmentation de la fréquence respiratoire est atténuée chez les veaux supplémentés en huile de poisson. De plus, il existe une relation linéaire entre le pourcentage d'acides gras remplacés et les effets observés.

Des veaux jersiais, répartis en trois groupes, sont supplémentés en acides gras : le premier avec de l'huile de maïs et de colza, le second avec de l'huile de poisson et le troisième un mélange égal des deux précédents. Il n'y a pas d'effets significatifs de la capacité des monocytes et des neutrophiles à phagocyter *Escherichia coli* entre les différents traitements mais il est rapporté un effet significatif ($p < 0,05$) du traitement sur le pourcentage de neutrophiles actifs, c'est-à-dire réalisant des réactions d'oxydation (Ballou et al., 2008). La phagocytose est un des meilleurs moyens de défense de l'organisme vis à vis des infections bactériennes et fongiques. Elle est aussi modulée par la supplémentation en acides gras, en effet l'activité phagocytaire est positivement corrélée avec le degré d'insaturation des acides gras (augmentation de la fluidité membranaire) (Calder et al., 1990), exception faite des macrophages enrichi en EPA et en DHA. Des données contradictoires existent dans la bibliographie concernant l'activité oxydative des neutrophiles. D'après Rees et al. (2006) cités par Ballou et al. (2008), une supplémentation en EPA irait jusqu'à supprimer l'activité oxydative des neutrophiles chez des enfants, alors que Kew et al. (2003) montrent une corrélation négative entre le ratio n-6/n-3 et l'activité oxydative des neutrophiles. La méthodologie employée, supplémentation ou étude des régimes alimentaires, peut expliquer cette différence (Ballou et al., 2008).

La réponse humorale primaire (reconnaissance de l'antigène, présentation de l'antigène et activation des lymphocytes B et T) n'est pas affectée par une supplémentation avec de l'huile de

poisson (Virella et al., 1991 ; Ballou et al., 2008). Chez des poulets, une telle supplémentation a amélioré la réponse vaccinale primaire (Fritsche et al., 1991). Un effet quadratique sur la réponse immunitaire secondaire a été mis en évidence (Ballou et al., 2008), sans que des explications ne puissent être fournies.

A des doses très importantes de supplémentation avec de l'huile de poisson, Meydani et al. (2001) ont montré une suppression de la réaction immunitaire à médiation cellulaire alors qu'à de faibles doses la supplémentation est sans effet (Yaqoob et al., 2000 cités par Ballou et al., 2008).

➤ Immunité et reproduction

Le maintien d'un environnement immunologiquement favorable et immunosuppresseur dans l'utérus est nécessaire à la survie embryonnaire (Raghupathy, 2001 ; Hunt et al., 2005 in Silvestre et al., 2011). Une réponse immunitaire à un corps étranger commence avec l'induction d'une réponse inflammatoire qui est amplifiée par la production de cytokines. Puisque la production de cytokines par les neutrophiles est moindre chez les vaches recevant de l'huile de poisson, peut-être qu'une moindre réponse inflammatoire pourrait améliorer la tolérance du placenta vis-à-vis du fœtus et donc diminuer la mortalité embryonnaire précoce.

La prolifération des cellules mononuclées est transitoirement réduite pour les vaches recevant une ration 10% de graines de lin en comparaison avec celles recevant de l'aliment enrichi en C16:0 et C18:1 (Megalac) ou du soja (Lessard et al., 2003). Par contre, la réponse immunitaire faisant intervenir les anticorps n'est pas influencée par la supplémentation en acides gras chez les vaches laitières (Lessard et al., 2003), chez les chiens (Wander et al., 1997) et chez les rats (Matsuo et al., 1996).

Des études ont démontré que le LA et l'EPA inhibent la mitose lors de la prolifération des lymphocytes (Khalfoun et al., 1996 ; Purasiri et al., 1997 cités par Lessard et al. 2003), et l'inhibition semble être indépendante de la synthèse des prostaglandines et des leucotriènes (Calder et al., 2002). Les acides gras semblent agir sur l'expression génétique en modulant l'action des facteurs nucléaires de la transcription (Jump and Clarke, 1999 cités par Lessard et al., 2003).

La progestérone peut réduire la prolifération de lymphocytes (Tekin et al., 2005), et elle peut réduire la capacité des macrophages à réaliser des réactions d'oxydation (Siiteri et al. 1982 in Silvestre et al., 2011). Donc plus il y a d'œstrogènes produits, moins bonne sera la réponse immunologique vis-à-vis du fœtus, qui joue le rôle d'un corps étranger et meilleure sera la survie embryonnaire précoce.

Ainsi la supplémentation en AGPI n-3 favorise la survie embryonnaire précoce et améliore la réussite à la reproduction. De plus la consommation d'un lait enrichi en AGPI n-3 par des veaux, via la supplémentation des mères, améliore les capacités immunitaires de ce dernier. L'intérêt chez des vaches allaitantes serait certainement plus important que chez des vaches laitières.

Les nombreuses divergences relevées dans la bibliographie quant aux bienfaits des omégas 3 sur la santé et la production des vaches laitières doivent conduire à des enquêtes de terrain de grande envergure pour valider ou non les effets mis en avant sur des animaux d'expérimentation, souvent avec des conditions éloignées des réalités de l'élevage laitier français.

2. Enquête

2.1. Le programme Linus

Le groupe DANONE® a mis en place, dès 2007, le programme « Linus » dont l'objectif est de produire un lait enrichi en oméga 3 et ainsi référencer un produit sous le label Bleu-Blanc-Cœur. L'engagement des producteurs de lait dans ce programme est une démarche volontaire. Une prime est accordée aux producteurs selon les résultats d'analyse de la qualité du lait.

2.1.1. *Pour répondre aux objectifs de Bleu-Blanc-Cœur*

Bleu-Blanc-Coeur est une association, créée en 2000, qui a pour vocation d'organiser et de promouvoir des filières de production agricole qui intègrent des préoccupations nutritionnelles pour le consommateur (moins de lipides, de graisses saturées, meilleur équilibre oméga 6 / oméga 3 dans les produits animaux). Elle s'appuie sur un constat simple qui est que les animaux procurent les 2/3 des lipides alimentaires de l'homme (beurre, fromage, charcuterie, poisson...) or on a changé l'alimentation de ces animaux avec l'arrivée massive du soja et du maïs. Cumulé à l'utilisation croissante d'huile de palme et de tournesol dans l'assiette du consommateur, le rapport n-6 / n-3 dans l'alimentation humaine est passé de 5 à 20 en seulement 40 ans.

L'association promeut le retour de cultures traditionnelles telles que le lin et l'herbe qui participent à une plus grande biodiversité dans nos paysages. Les animaux de la filière consomment une ration qui intègre ces végétaux, naturellement riches en acides gras n-3 dans le but de produire des aliments mieux équilibrés pour l'homme. Les cahiers des charges prévoient l'emploi de sources végétales tracées et sécurisées en acides gras oméga 3, telles que les graines de lin dans l'alimentation des animaux d'élevage. Le lin ne doit être issu que de variétés françaises cultivées en France ou au Royaume-Uni, sans utilisation d'OGM.

En adhérant à cette association les filières s'engagent :

- à augmenter le nombre d'animaux nourris selon le cahier des charges de l'association, tout en maîtrisant les coûts de production (maximum de 5% de surcoûts) : en 2011, 6,5% de la production laitière française contre 0,1% en 2007.
- à créer de nouveaux produits et à les rendre disponibles sur le marché pour le plus grand nombre : 350 références en 2007 et 550 en 2010. Il existe une diversité de produits : produits laitiers, œufs, charcuterie, farine. Bleu-Blanc-Cœur s'engage à doubler la teneur en acide

gras oméga 3, rééquilibrer le ratio oméga 6 / oméga 3 à une valeur inférieure à 5, à diminuer de 20% la teneur en acide palmitique et de 50% le ratio C16:0 / oméga 3 par rapport aux produits équivalents conventionnels.

- à développer l'information nutritionnelle communiquée au consommateur.

2.1.2. Conditions à remplir pour s'engager dans le programme Linus

2.1.2.1. Zone géographique

Le groupe Danone® a fait le choix de créer une ligne de production dans son usine de Ferrières en Bray (Seine-Maritime) exclusivement dédiée à la fabrication du fromage blanc Jockey®, produit répondant aux critères du cahier des charges Bleu-Blanc-Cœur.

Pour produire du lait de qualité nutritionnelle supérieure, Danone® a recruté des producteurs dans la zone de collecte de l'usine de Ferrières en Bray qui s'étend sur 3 départements : l'Eure, la Seine-Maritime et la Somme. En 2008, lors de la mise en place du programme Linus, tous les producteurs volontaires ont pu adhérer à la démarche Bleu-Blanc-Cœur. Des éleveurs ont par la suite abandonné la démarche pour des raisons économiques ou ont été conviés à se désengager de la démarche en raison d'une qualité du lait non constante. En 2009, 270 exploitations, avec 120 000 vaches, étaient engagées dans le programme Linus.

En 2000, on comptait en Seine-Maritime, département où se concentre la majeure partie de la collecte, 116 000 vaches laitières réparties sur 3000 exploitations, soit 40 vaches par exploitation. Les deux races principales sont la Prim Holstein et la Normande (données AGRESTE).

2.1.2.2. IT3

La mise en place d'une ration enrichie en oméga 3 permettant d'obtenir un lait répondant aux critères imposés par le label Bleu-Blanc-Cœur est effectuée par les techniciens de la société VALOREX®. Elle a pour missions le développement, la fabrication et la commercialisation de produits extrudés à base de lin. Pour fabriquer la ration ils ont recours à un indice technique oméga 3, nommé IT3, qui permet de quantifier les intrants en oméga 3.

IT3 est une valeur synthétique de valorisation des oméga 3 par l'animal. L'IT3 recommandé résulte de l'analyse des données accumulées depuis 15 ans par VALOREX® chez les ruminants et

les monogastriques comme la production de lait, le gain moyen quotidien, la fertilité, la prévention de l'acidose et la diminution des rejets de méthane. L'IT3 permet de définir l'utilisation des compléments alimentaires nécessaires pour satisfaire l'obligation de moyens.

L'IT3 est calculé selon la formule suivante (Chatellier, Valorex):

$$IT3 = \% MG * \% MGE * \% AG \text{ dans la MG} * (ALA - LA/A) * \text{indice d'oxydation}$$

avec :

- MGE, la teneur en matière grasse efficace, c'est-à-dire la matière grasse effectivement digérée par le ruminant. La MGE peut varier entre 20 à 90% de la teneur en lipides.
- ALA, la teneur en ALA
- LA, la teneur en LA

Ci-dessous sont données quelques valeurs de l'IT3 des aliments les plus fréquemment utilisés dans la ration des vaches laitières (tableau 3).

Aliments	IT3 (g/kg MS)
Herbe pâturée de bonne qualité	12 g / kg MS
Ensilage de maïs	-0,9 g / kg MS
Ensilage d'herbe	4 g / kg MS
Tourteau de soja	- 0,1 g / kg MB
Blé	- 0,1 g / kg MB
Graines de lin extrudées (Tradi-Lin®)	153 g / kg MB

Tableau 3 : Quelques valeurs indicatives de l'IT3
Source : VALOREX.

Afin de satisfaire au cahier des charges de BBC :

- il est interdit d'utiliser de l'huile de lin et de l'huile de palme,
- l'utilisation de graines de lin extrudées est autorisée jusqu'à 2 kg, 0,4 kg pour les graines de chanvre extrudées, et 0,35 kg pour les graines de colza extrudées.
- il faut un IT3 supérieur à 100 dans la ration.

Seules les vaches en lactation sont supplémentées en oméga 3.

Ci-dessous sont présentés 3 exemples de rations utilisées conforme au cahier des charges BBC (Chatellier, Valorex®) :

- Ration hivernale avec complémentation en graines de lin (IT 3=113,2) (tableau 4).

Aliment	Quantité	IT3 / kg	IT3 total
Ensilage de maïs	12 kg MS	- 0.9	- 10.8
Ensilage d'herbe	4 kg MS	4	16
Soja	3	0	0
Valoméga 160	1	108	108

Tableau 4 : Ration hivernale avec complémentation en graines de lin.

- Ration hivernale avec complémentation en graines de lin et concentré protéique de luzerne (IT3=106,5) (tableau 5).

Aliment	Quantité	IT3 / kg	IT3 total
Ensilage de maïs	12 kg MS	- 0.9	- 10.8
Ensilage d'herbe	4 kg MS	4	16
Soja	3	0	0
Valoméga 160	0.6	108	64.8
Extraluz	0.5	73	36.5

Tableau 5 : Ration hivernale avec complémentation en graines de lin et concentré protéique de luzerne.

- Ration de printemps (IT3=144) (tableau 6).

Aliment	Quantité	IT3 / kg	IT3 total
Pâturage	18 kg MS	8	144

Tableau 6 : Ration de printemps.

2.2. Objectif de l'enquête et protocole

2.2.1. Objectif

Cette étude a été demandée par le groupe DANONE en 2009. L'objectif est d'étudier l'impact de la mise en place du programme Linus sur quelques résultats zootechniques dans les troupeaux laitiers concernés. La reproduction, au travers du pourcentage de réussite en première insémination et le poids de carcasse à la réforme sont les deux points à aborder en priorité.

En effet le surcoût d'une ration permettant de produire un lait enrichi en oméga 3 est non négligeable (entre 4 et 14€ pour 1000L de lait produit) et n'est pas compensé par la prime accordée à la qualité ni par la hausse de la production laitière. Les bénéfices sur la santé animale sont-ils suffisants pour encourager les éleveurs à poursuivre cette démarche ?

2.2.2. Protocole

Initialement, l'objectif était de collecter les données de 100 producteurs engagés dans la démarche Linus et de 100 producteurs non engagés, dans la même zone de collecte. La comparaison portait sur deux années 2006 et 2009. Ainsi il aurait été possible avec les données obtenues de comparer les paramètres considérés avant et après la mise en place du programme Linus, tout en gommant :

- l'effet « exploitation » grâce au nombre de réponses collectées
- et l'effet « année » avec la comparaison de données issues d'exploitation engagées ou non au cours des mêmes années.

Finalement, il n'a été possible de collecter que des données issues de 50 élevages engagés et 10 élevages témoins. La représentativité des résultats ne peut qu'être mise en question, si bien qu'aucune analyse statistique n'a été menée.

2.2.2.1. Elaboration du questionnaire

Le questionnaire a été élaboré à partir :

- d'une interview de quelques éleveurs, menée le 27 octobre 2009, dans la zone d'étude, par le responsable du projet dans la société Danone®. Elle a permis de mettre en avant des points ayant été positivement impactés suite à la mise en place du programme Linus.
- d'une étude bibliographique,
- de la connaissance des enregistrements de données qui peuvent exister en élevage, permettant ainsi de recueillir des données fiables et précises.

2.2.2.2. Questionnaires et lettres accompagnatrices

Le questionnaire destiné aux éleveurs impliqués dans le programme Linus et celui destiné aux éleveurs témoins sont présentés en annexe, ainsi que les lettres les accompagnants (Annexe 1).

2.2.2.3. Collecte des données

Envoi des questionnaires

Le 16 juin 2010 : envoi du questionnaire à tous les producteurs engagés dans la démarche Linus. Le questionnaire est accompagné d'une lettre ne stipulant pas qu'il s'inscrit dans le cadre d'un travail de thèse, il est demandé une réponse pour le 30 juin 2010.

Le 13 août 2010 : envoi du questionnaire à 43 éleveurs témoins, c'est-à-dire non engagés dans la démarche mais installés dans la même zone de collecte. Le questionnaire est accompagné d'une lettre explicative de la démarche.

A partir de la mi-octobre 2010, date de fin des travaux dans les champs :

- Appel téléphonique à 46 éleveurs engagés, choisis par le responsable des conseillers en élevage de la laiterie Danone® parmi ceux n'ayant pas répondu.
- Appel téléphonique à 48 éleveurs non engagés, choisis par le responsable des conseillers en élevage de la laiterie Danone®.

Lors de cet appel, il a été précisé les objectifs de la démarche. Chaque éleveur qui a souhaité répondre au questionnaire, l'a reçu par fax ou par mail immédiatement après l'appel ou par voie postale dans les 48 heures.

Les réponses pouvaient être retournées par mail, par fax, par voie postale ou encore via le laitier et le responsable des conseillers en élevage de la laiterie Danone®.

Choix du mode de collecte

Le choix de relancer par téléphone les éleveurs pour répondre au questionnaire, et non de les rencontrer directement, permet de ne pas biaiser les réponses en plaçant les éleveurs tous dans les mêmes conditions vis-à-vis du questionnaire.

2.3. Résultats

2.3.1. Résultats bruts

Les résultats issus des questionnaires reçus des élevages engagés dans la démarche Linus ainsi que le pourcentage moyen d'ALA sur le lait livré en 2009 sont consignés dans le tableau ci-après (tableau 7) ainsi que les résultats des élevages témoins (tableau 8).

Tableau 7 : Résultats des élevages engagés dans la démarche Linus.

ALA dans le lait (% des AG)	Nb vaches	Race*	%RIA1 2009 - %RIA1 2006**	PC 2009 -PC 2006 (en kg)***	Veaux d'élevage	Points positifs	Points négatifs
0,547	36	66	18		Absence de diarrhées, +20kg au sevrage	Amélioration de la fécondité, baisse des rétentions placentaires.	Baisse du TP d'1,2 point.
0,562	50	66	-5	10	Absence de diarrhées	Poil plus brillant.	
0,616	28	66	-6	5	Meilleur état corporel, poids plus homogènes	Poids de carcasse plus élevés.	Baisse en IA.
0,632	45	56	20		Poudre de lait	Baisse des frais vétérinaires.	
0,654	65	66	13		Poudre de lait		
0,656	26	56/66	17	20		Augmentation poids carcasse.	
0,663		66/56	0		=		Pas de gain pour l'éleveur, juste de la publicité.
0,663	35	66	5	8		Meilleur poil, meilleur état corporel.	
0,665	45	66	5	34		Meilleure immunité.	Veaux plus gros à la naissance, vêlage plus difficile.
0,665	60		0	5	Poudre de lait	Reprise d'état plus rapide.	
0,674	45	66		-5	Poudre de lait		Coût de la ration élevé.
0,681	45	56	17	0	=	Bon état corporel.	Ration difficile à équilibrer, prix élevé
0,693	40	39	-15	0			Nul et cher.
0,698	40	66	35	20	=	Lait plus riche en matière utile.	Pas moins de frais vétérinaire, pas plus d'état corporel (FCO).
0,705	40	66	-9	10	☒ diarrhées, croissance plus rapide donc durée d'alimentation lactée	Baisse du nombre de mammites, meilleur poil, meilleure persistance des lactations.	
0,719	80	66	-7	15			Obligation de mettre beaucoup de lin et de luzerne.
0,723	45	66 rouge	7	9	Poudre de lait	Meilleure reprise de poids après vêlage.	
0,725	40	66	4	-20	Augmentation du prix de vente à 8 jours +30€	Effet positif.	
0,746	50	66	6	-10	Poudre de lait	Poil plus brillant.	
0,767	50	56/66	5	-7		Prim Holstein : meilleure récupération après vêlage, meilleure fécondité.	Normande : utilisation du lin pour la viande plus que pour le lait.
0,770	40	66	0	30	Poudre de lait	Meilleure reprise d'état après vêlage.	Vaches grasses au tarissement si on ne baisse pas l'IT3.
0,777	45	66	0		Poudre de lait		
0,777	35	66	Monte naturelle	-23			
0,783	30	66	10	-0,1	Veaux plus gros à la naissance	Vaches en meilleur état.	
0,795		56/66	-0,5	25	Poudre de lait	Pas d'effet significatif.	

* : 66 : Prim Holstein / 56: Normande. ** : Différence de réussite en 1ère insémination entre 2009 et 2006. *** : Différence de poids de carcasse des vaches réformées entre 2009 et 2006.

%ALA	Nb vaches	Race*	%RIA1 2009 - %RIA1 2006**	PC2009 - PC2006 (en kg)***	Veaux d'élevage	Points positifs	Points négatifs
0,796	30	mixte	15	30	Moins de consommation de concentrés		
0,806	30	56	0	0	Poudre de lait	Il n'y a pas plus de problèmes.	
0,810	100		Monte naturelle		=	Augmentation de la production laitière de 5%.	Coût
0,813	60		Monte naturelle	2	=	Utilisation maximale des pâtures.	
0,838	30	66	0	30		Augmentation durée lactation, meilleure fertilité, bon aspect général.	
0,842	7	66	14	10			Ne résoud pas les mammites ni l'infertilité à lui seul!
0,846	32	66	0		Poudre de lait		
0,867	35	66	0	20	Moins de diarrhées	Meilleure note d'état corporel.	Vaches grasses, plus d'acétonémie après vêlage.
0,867	55	56	-16	20	Poudre de lait	Augmentation de la production laitière.	Augmentation du poids de carcasse imputable à la génétique.
0,873	60	56/66			Moins de pathologies néonatales	Poil plus brillant, meilleur état corporel, meilleure constance en lactation.	Normande : tendance à l'engraissement.
0,873	45	56/66	14	27	Poudre de lait	Moins d'IA, mammelle plus souple, moins de mammites, note d'état corporel supérieure, poil brillant, moins de	Coût excessif.
0,882	35	66	7	36	Poudre de lait	Meilleure santé, meilleur état général.	
0,884	65	66	2	3	Poil brillant	Meilleur état corporel, poil brillant.	
0,892				15		Augmentation de la production laitière.	Baisse TB.
0,900		66	2	7		Poil plus brillant, augmentation de la production laitière.	Baisse du TB, difficulté à avoir des résultats constants, valorisation insuffisante, coût de la ration élevé.
0,942	42	66	13	25		Moins de métrite, retour en chaleurs plus rapide.	Si IT3>120, acidose.
	55	mixte	0	10	=	Meilleur EC après vêlage, meilleure persistance de la lactation, meilleure fécondité après 3IA, baisse de	
	30	66	Monte naturelle		=	Augmentation de la production en début de lactation, poil plus brillant.	Coût trop élevé.
	60	56	2	10	=		
	60	56	37		Poudre de lait	Reproduction et état corporel.	
	60	66	-16	35			
	60		2	10	Pas de changement	Pas d'effet significatif.	Pas d'effet significatif.
	75	66	10	-3		Permet d'équilibrer la ration en PDIE.	
	120	66	3	0	=	Pas d'effet significatif.	Pas d'effet significatif.
	70	66/56	2	10	Moins de diarrhées	Poil brillant, meilleure résistance aux maladies.	

* : 66 : Prim Holstein / 56: Normande. ** : Différence de réussite en 1ère insémination entre 2009 et 2006. *** : Différence de poids de carcasse des vaches réformées entre 2009 et 2006.

Nombre de vaches	Race*	%RIA1 2006**	%RIA1 2009***	Source	Poids de carcasse 2006 (en kg)	Poids de carcasse 2009(en kg)	% Mammites	% Boiteries	% Caillette	Ration de base en hiver	Intérêts d'introduire des oméga 3 dans la ration ?
45	56	65	70	déclaratif	380	385	30	10	0	Ensilage maïs, luzerne, enrubanage, soja, mélange orge	Coût excessif.
45	56/66	61	47	ctrl laitier	340	320	90	3	0	Ensilage de maïs, foin, concentré.	↗ poids de carcasse et de la santé animale.
40	66	42	38	ctrl laitier	339	341	45	2,5	0	Ensilage de maïs, enrubanage, foin, soja, corn feed.	Coût excessif, augmentation de la charge de travail.
		45	50	ctrl laitier	368	352	5	3	0	Ensilage de maïs, foin, soja, colza, céréales.	Sans intérêt.
					350	327	8	15	0	Ensilage de maïs, enrubanage, soja, colza, cplt de production, paille	Amélioration de la fécondité, du poids de carcasse. Coût ?
		monte naturelle								Ensilage de maïs, paille, foin.	
		66	63	ctrl laitier	380	385	22	7	0	Ensilage de maïs, bettraves, soja, colza, paille.	
		53	45		365	370	55	7	0	Ensilage de maïs et d'herbe, enrubannage, colza, soja.	Sans intérêt si la ration est déjà correctement équilibrée.
		monte naturelle			320	320	5	2	0	Foin de luzerne et de rayg grass, orge, pulpe, tourteau azoté.	Essai peu convaincant.
120	56/66	53	55		358	333	1	5	0		

* : 66 : Prim Holstein / 56: Normande. ** : Réussite en 1ère insémination en 2006. *** : Réussite en 1ère insémination en 2006.

Tableau 8 : Résultats des élevages témoins.

2.3.2. Exploitation des résultats

2.3.2.1. Réussite en première insémination

	Linus			Témoin		
	Données enregistrées	Déclaratif	Total	Données enregistrées	Déclaratif	Total
Nombre d'élevages	13	25	38	4	3	7
Moyenne	4,6	4,1	3,8	-4,0	-1,5	-2,4
Ecart-type	16,1	7,5	10,6	7,8	9,2	7,0
Minimum	-16	-15	-16	-14	-8	-14
Maximum	37	18	37	5	5	5

Tableau 9 : Variation du pourcentage de réussite en 1^{ère} insémination entre 2006 et 2009. (%RIA₁ 2009 - %RIA₁ 2006)

En moyenne sur les 38 élevages engagés dans la démarche Linus, le pourcentage de réussite en première insémination a été augmenté de 3,9 %, et a été dégradé de 2,4% pour les élevages témoins. Notons l'importante disparité des résultats obtenus (tableau 9).

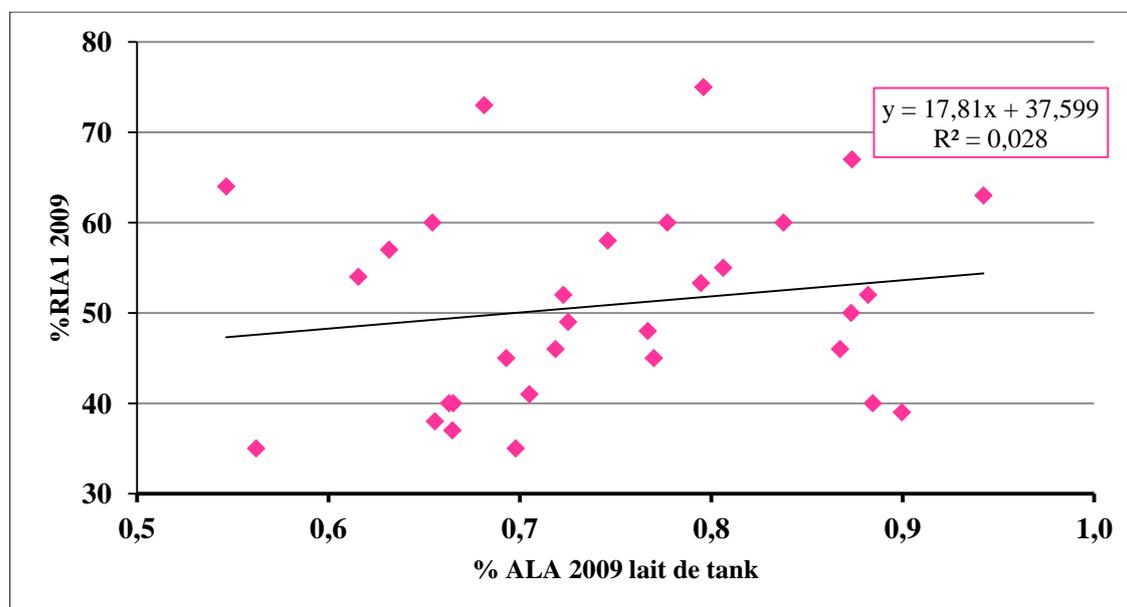


Figure 12 : Pourcentage de réussite en 1^{ère} insémination en fonction du pourcentage d'ALA moyen sur le lait de tank en 2009 dans les élevages engagés dans la démarche Linus.

L'étude de la réussite globale en première insémination sur l'ensemble du troupeau en 2009, sur les 32 élevages considérés, n'est pas corrélée à la teneur croissante en ALA dans le lait de tank (figure 12).

2.3.2.2. Poids de carcasse des vaches de réforme

	Linus	Témoin
Nombre	45	9
Moyenne	10,0	-7,4
Ecart-type	14,3	13,2
Minimum	-23	-25
Maximum	36	5

Tableau 10 : Variation du poids de carcasse entre 2006 et 2009.
(Poids 2009-Poids 2006, en kg)

En moyenne sur les 45 élevages engagés dans la démarche Linus, le poids de carcasse moyen des vaches réformées a augmenté de 10 kg alors qu'il a diminué de 7,4 kg pour les vaches issues d'élevages non engagés dans la démarche (tableau 10).

2 élevages engagés, mais non pris en compte ci-dessus, commercialisent depuis l'entrée dans le programme Linus, les vaches sans engraissement préalable dans la mesure où leur état d'engraissement est désormais suffisant en sortie de période de traite. Le premier cheptel est constitué de Normandes uniquement, en 2006 les vaches commercialisées avec un engraissement préalable ont eu un poids de carcasse de 371 kg, en 2009 sans engraissement, elles atteignent 377 kg en moyenne. Le second cheptel, mixte Normande/ Holstein, vend des vaches, en 2006, après engraissement à 330 kg et en 2009, sans engraissement, à 290 kg.

2.3.2.3. Santé des veaux

Nombre d'exploitations	Absence de changement	Baisse du nombre de diarrhées	Augmentation de la croissance	Poil plus brillant
21	48%	29%	19%	5%

Tableau 11 : Eléments collectés quant à la santé des veaux d'élevage.

Parmi les élevages ayant répondu à cette question, la moitié n'a pas constaté de changement dans l'élevage des veaux (phase lactée). Un tiers a constaté une baisse des diarrhées. Aucun éleveur ne rapporte une augmentation de fréquence des maladies, ni un autre impact négatif (tableau 11).

2.3.2.4. Points positifs constatés

36 exploitants ont répondu à cette question.

Poil plus brillant	Reprise d'état après vêlage	Amélioration de l'état corporel	Amélioration de la reproduction	Baisse des rétentions placentaires et des métrites
28%	19%	28%	19%	8%
Baisse des mammites	Amélioration de l'immunité	Meilleure persistance de la lactation	Augmentation production laitière	
6%	6%	11%	11%	

Tableau 12 : Points positifs notés par les éleveurs depuis leur entrée dans la démarche Linus.

Ci-dessus sont résumés les points positifs relevés par les éleveurs. Deux aspects ressortent de cette étude : amélioration de la reproduction et amélioration de la lactation. On entend par reprise d'état corporel après vêlage, une moindre perte d'état corporel en début de lactation et un retour plus rapide à un état corporel normal (tableau 12).

2.3.2.5. Points négatifs constatés

24 exploitants ont répondu à cette question.

Coût élevé	Engraissement excessif	Pas de changement	Poids des veaux plus élevés au vêlage	Acidose	Dégradation de la reproduction
29%	17%	33%	4%	4%	4%

Tableau 13 : Points négatifs notés par les éleveurs depuis leur entrée dans la démarche Linus.

Un tiers des éleveurs ne constate aucun changement depuis leur adhésion au programme Linus, si ce n'est un coût alimentaire plus élevé (tableau 13).

2.4. Discussion

2.4.1. *Protocole et difficultés rencontrées*

Lors de la collecte des données, plusieurs difficultés ont été rencontrées.

➤ Acheminement des questionnaires

Il avait été choisi, pour plus de praticité, de faire déposer les questionnaires par le laitier avec le relevé de laiterie. Après avoir contacté les éleveurs par téléphone, je me suis rendue compte que la plupart des questionnaires avaient bien été déposés mais n'étaient pas forcément arrivés entre les mains de la personne compétente pour y répondre. Une remise en main propre par les chargés de clientèle Danone® avait été envisagée, mais trop difficile à faire sur un laps de temps court. Cette solution aurait néanmoins dû être préférée.

➤ Intérêt des éleveurs pour l'étude

Début 2010, dans un contexte global de crise du lait, les éleveurs n'étaient que très peu disposés à répondre à des questionnaires émanant du groupe Danone®. Il faut ajouter à cela le fait que l'objet de l'étude, dont le questionnaire était le support, n'a pas été expliqué dans la lettre d'accompagnement. Devant la multiplicité des questionnaires que les éleveurs reçoivent, et l'absence de retour qu'ils en ont, peu ont envie d'y consacrer quelques minutes.

Il est donc important à mes yeux que cette étude fasse l'objet d'une courte synthèse qui sera envoyée à tous les éleveurs qui y ont participé (annexe 2).

➤ Disponibilité des données

Plus de la moitié des éleveurs, contactés dans un second temps par téléphone, ont expliqué leur absence de réponse par une absence de données fiables. Certains ont évoqué leur incapacité à retrouver des données, d'autre le défaut d'enregistrement. Une part non négligeable des éleveurs ont recours à la monte naturelle et ne connaissent pas le taux de réussite en première saillie.

Une dizaine d'éleveurs ont fait part de changements importants dans leur exploitation entre 2006 et 2009, ils n'ont donc pas voulu communiquer de données. Par exemple, la mise aux normes a conduit certains éleveurs à transformer des stabulations à paire paillée en stabulation à logettes.

Enfin l'épisode de fièvre catarrhale ovine survenu en 2009 a biaisé, selon certains éleveurs les résultats de reproduction et ils n'ont pas voulu les communiquer.

➤ Pertinence des questions posées et possibilité d'interpréter les résultats

- La question concernant les mammites a été interprétée de deux façons : nombre de mammites cliniques cumulé sur tout le troupeau ou nombre de vaches atteintes par au moins une mammite lors de la lactation.
- Les boiteries ne sont que trop rarement vues par les éleveurs et *a fortiori* notées. Ainsi les quelques données sont peu fiables et ne sont pas exploitables. Pour étudier un impact des AG n-3 sur les boiteries, il serait nécessaire de différencier les causes.
- Les données à propos des déplacements de caillette sont difficilement interprétables, en effet l'incidence étant faible, la taille des troupeaux est trop petite pour lisser les variations annuelles.
- Certaines vaches laitières réformées sont engraisées avant la vente à la boucherie d'autres sont vendues directement en sortie de période de traite. Il est alors peu significatif de comparer les poids de carcasse, d'autant qu'en fonction du cours de la viande par rapport à celui des céréales, certains éleveurs changent de pratiques d'une année à l'autre.

➤ Partenariat avec une entreprise

Cette étude de terrain n'a pu être convenablement menée à son terme. En effet, les projets d'un groupe agro alimentaire sont menés en fonction des attentes des consommateurs, ainsi les études de ces projets doivent être réalisées rapidement et non en différé. A l'heure actuelle, une priorité est donnée à l'axe environnemental avec les réductions de production de méthane.

2.4.2. Impact économique

Une enquête menée en Haute-Normandie et en Picardie vise à mesurer l'impact économique de la mise en place de rations qui permettent de respecter le cahier des charges de la démarche Linus ou autre démarche similaire visant à améliorer la qualité nutritionnelle du lait. Elle est menée dans 2 exploitations représentatives de la zone géographique concernée. Les effets zootechniques sont mesurés période par période en croisant mode d'alimentation et stade de lactation du troupeau, puis globalisés sur l'année (Beguin et al., 2009).

L'étude a consisté à mesurer les effets techniques et économiques des modifications de conduite alimentaire sur deux modes d'alimentation représentatifs de ces régions : maïs avec moins de 20 ares de pâturage par vache laitière ou silo de maïs fermé 4 mois de l'année avec 40 ares de pâturage l'été. Dans ces deux systèmes, il a été testé 2 types de conduite : l'une où les apports de graine de lin extrudée sont faits sans diminution des apports initiaux en concentrés (A), l'autre où les apports de graine de lin extrudée avec diminution des apports initiaux de concentrés (tourteau de soja) (B). La conduite A bis intègre les constatations de terrain quant au fait que les vaches n'utilisent pas la totalité du lin pour produire du lait, mais qu'une partie participe à l'engraissement.

Type de conduite	Maïs toute l'année				Silo de maïs fermé 4 mois de l'année			
	Témoin	(A)	(A bis)	(B)	Témoin	(A)	(A bis)	(B)
Lait vendu (L)	700 000	748 925	727 620	730 665	300 000	320 390	319 080	312 150
Lait vendu en plus par rapport au témoin (L)	-	7%	4%	4.4%	-	6.8%	6.4%	4.1%
Nb de VL	94	95	93	97	72	42	42	43
Lait vendu/VL (L)	7450	7885	7825	7530	7140	7630	7600	7260
Prix du lait (€/1000 L)	348.4	335.6	340.5	338.8	345.4	333.2	334.0	336.3
TB moyen (g/L)	42.0	38.0	39.75	39.5	42	38.1	38.4	39.7
TP moyen (g/L)	32.8	32.5	32.5	32.3	32.8	32.5	32.5	32.3
Surface fourragère principale (Ha)	70	69.9	69.3	72.7	37.3	37.1	37.1	37.8
Maïs ensilage (Ha)	34	33.9	33.3	35.7	11.3	11.1	11.1	11.8
Prairies (Ha)	36.0	36.0	36.0	37.0	26.0	26.0	26.0	26.0
Quantité concernée/VL/an (kg)	1385	1650	1650	1210	1120	1380	1350	10460
Dont Tourteau de soja /VL (kg)	1220	1220	1220	740	670	670	670	360
Dont concentré à base de lin /VL (kg)	0	250	250	250	0	220	190	190
Dont urée (kg)	0	20	20	57	0	38	34	59
EBE avant charges sociales (€)	220 740	2 124 540	210 800	217 290	67 250	64 290	64 915	65 440
Ecart d'EBE/témoin (€)	-	-8 200	-9940	-3450	-	-2 960	-2 335	-1 810
Compensation minimum /1000L pour maintenir EBE (€)	-	11	13.7	4.7	-	9.2	7.3	5.8

Tableau 14 : Comparaison économique de deux systèmes utilisant différemment le silo de maïs.

Source : Beguin et al., 2009.

A la lecture de ces résultats (tableau 14), pour maintenir l'excédent brut de l'exploitation, il faut une compensation comprise entre 4 et 14€ pour 1000 litres produits dans le système maïs toute l'année et une compensation entre 5 et 10€ pour 1000 litres produits dans le système silo de maïs fermé 4 mois dans l'année. Danone propose à ses adhérents une indemnité comprise entre 9 et 16€/1000L.

La conduite alimentaire (A) qui consiste à apporter le concentré à base de lin sans diminuer les concentrés initialement apportés, actuellement la plus répandue sur le terrain, nécessite pour être intéressante un bon niveau de réponse technique : hausse du lait par vache, chute maîtrisée des taux ainsi qu'un niveau de compensation plus élevé que celui nécessaire avec la seconde conduite alimentaire.

La conduite (B) qui consiste à substituer l'apport du concentré à base de lin aux concentrés initialement distribués, est plus favorable sur le plan économique. Elle nécessite donc d'être plus largement diffusée et accompagnée techniquement. Elle repose en effet sur une utilisation assez importante d'urée et donc impose de respecter les bonnes pratiques de sa distribution :

- mélange du concentré avec la ration,
- fourrage apporté en grande quantité et grossièrement mélangé avec les concentrés,
- une place à l'auge par vache.

Par exemple, une baisse du prix du lait de 33€/1000L soit 10%, la prime minimale pour compenser le surcoût de production d'un lait enrichi en oméga 3 doit augmenter de 1,3 à 2,6€/1000L ; et une baisse de 10% du prix du lin extrudé, soit 60€/tonne diminuerait de 1,5€ à 2,4€/1000L le surcoût engendré.

2.4.3. Résultats

Les résultats collectés concernant la production laitière, n'étant que subjectifs, avec 11% des éleveurs notant une hausse, vont à l'encontre de la baisse globale relevée dans la bibliographie. Une étude plus précise menée sur l'ensemble d'une lactation serait nécessaire. Néanmoins une attention particulière doit être portée quant au fait que l'engagement dans le programme Linus permet aux éleveurs l'intervention régulière (3 à 4 fois par an) d'un technicien les conseillant en matière d'alimentation et plus globalement sur la conduite d'élevage. Ainsi d'importants problèmes de ration sont exclus dans ces élevages suivis, la hausse de la production laitière peut être une des conséquences d'une ration adaptée à la production.

Les données collectées à propos de la reproduction montrent une augmentation du taux de réussite en première insémination. Les données issues de la bibliographie sont plus nuancées concernant une supplémentation avec du lin. Ici, encore le suivi renforcé de ces élevages ne doit pas être négligé dans l'interprétation faite des données collectées. En ce qui concerne la supplémentation des vaches incluses dans le programme Linus, la supplémentation n'étant pas faite au cours de la période de tarissement l'incidence sur le retard de la mise bas et le post-partum immédiat n'a que peu d'intérêt.

La distribution d'un lait enrichi en ALA aux veaux d'élevage ne peut être considérée comme une supplémentation suffisante pour obtenir les effets positifs en matière d'immunité relevé dans la bibliographie. L'impact direct sur les mammites d'une alimentation enrichie en AGPI n-3 doit être considéré comme quasi-nul.

L'engraissement excessif noté par 17% des éleveurs, surtout chez les races avec des aptitudes bouchères n'est pas surprenant. Certains éleveurs valorisent cet effet en n'engraissant plus leur vache de réforme. N'oublions pas qu'à l'heure actuelle, le lin est surtout utilisé pour l'engraissement.

Enfin comme le confirme la bibliographie et les données collectées, il est bien plus facile de produire un lait enrichi en ALA au printemps et à l'automne qu'en été ou qu'en hiver, surtout dans le pays de Bray. Or les laiteries ont besoin d'un approvisionnement de qualité constante au cours de l'année. Cette capacité et/ou volonté des producteurs est un réel problème pour que ce projet s'inscrive dans le long terme.

Conclusion

Les acides gras oméga 3 présentent un intérêt majeur pour la santé humaine, et au vu de leur faible consommation, toute voie d'enrichissement des produits les plus consommés doit être étudiée. Une modification de la ration qui favorise les fourrages issus de l'herbe (pâturage, foin, ensilage d'herbe) et y ajoute des concentrés riches en oméga 3 (lin extrudé, luzerne déshydratée) permet la production d'un lait enrichi en oméga 3 et a des conséquences sur la production des vaches laitières.

Les données de la littérature émanent d'expérimentations menées sur une partie de la lactation, et non sur toute la lactation comme cela est nécessaire pour satisfaire aux impératifs du programme Linus. Une amélioration de l'immunité et de la reproduction est dans l'ensemble constatée.

L'enquête de terrain, avec les difficultés rencontrées dans sa mise en œuvre, doit être considérée à sa juste valeur. Une amélioration de réussite en première insémination et un meilleur état corporel tout au long de la lactation sont les deux aspects positifs majeurs relevés. En plus de l'ajout des oméga 3, il est important de considérer le meilleur encadrement pour la mise en place de la ration chez les éleveurs engagés dans la démarche Linus. Mais le surcoût engendré par la mise en place d'une telle ration est le frein majeur à la pérennisation et au développement de ce type de programme à l'heure actuelle en France. Ainsi d'autres voies d'amélioration de la qualité nutritionnelle du lait doivent être explorées telles que la génomique (annexe 3).

Annexes

Annexe n°1 : Courriers et questionnaires.



Ferrières en Bray, le 16 juin 2010

Objet : Questionnaire santé des troupeaux démarche Linus

Madame, Monsieur,

Votre troupeau fait partie de la démarche Linus depuis plusieurs années. Nous souhaitons avoir votre avis sur les bienfaits de l'alimentation type Linus sur la santé des vaches laitières.

Ce questionnaire est expédié à tous les producteurs dont le troupeau est engagé dans la démarche.

Pouvez-vous consacrer quelques instants à répondre au questionnaire au verso de ce courrier et de le remettre au chauffeur de collecte, avant le 28 juin 2010.

Après dépouillement et analyse des réponses, une synthèse sera établie. Un résumé vous sera communiqué.

Nous vous remercions de votre participation et vous prions de croire, Madame, Monsieur, en nos salutations distinguées.

Le Responsable Relations Producteurs Nord.

QUESTIONNAIRE « ELEVAGE LINUS »

Nom de l'élevage :

Email :

Nombre de vaches laitières en lactation :

Race :

➤ Quel était votre **pourcentage de réussite à la 1ère insémination artificielle** avant votre entrée dans le programme Linus et depuis votre entrée dans le programme ?

☞ *Préciser pour chaque données l'origine des données : document du contrôle laitier ou seulement déclaratif.*

2006

2009

➤ Quel est le poids carcasse moyen à l'abattage des vaches réformées avant et depuis l'intégration dans le programme Linus ?

☞ *S'appuyer sur les relevés d'abattoir*

Poids moyen des carcasses avant intégration dans Linus :

Poids moyen des carcasses après intégration dans Linus :

➤ Sur l'année écoulée (en 2009), quel pourcentage de vaches en lactation a souffert de maladies inflammatoires chroniques (affections de type mammites, boiteries) et de déplacement –torsion de caillette?

☞ *Détailler par type d'affection (mammites, boiteries, caillette).*

% de mammites

% de boiteries

% de caillettes

➤ Avez-vous remarqué un changement sur les veaux, lorsque ces derniers sont nourris avec du lait de tank donc enrichi en oméga 3? Prix de vente à huit jours? Poids des génisses au sevrage si elles sont élevées au lait entier ?

➤ Selon vous, la démarche Linus (complémentation en lin/luzerne (...)) + accompagnement sur la ration avec l'indice IT3) a-t-elle un **effet positif (ou négatif) sur la santé des vaches** ? Si oui, lesquels ?



Ferrières en Bray, le 13 août 2010

Objet : Questionnaire santé des troupeaux démarche Linus

Madame, Monsieur,

Dans le cadre d'une thèse vétérinaire, nous souhaitons étudier l'impact de la démarche Linus sur la santé des troupeaux laitiers. Pour cela nous avons besoin de comparer des données issues d'élevage non impliqués dans cette démarche avec celles issues d'élevage engagés dans la démarche Linus.

Votre troupeau n'étant pas impliqué dans cette démarche Linus, votre réponse au questionnaire nous permettra de mener à bien notre étude scientifique.

Pouvez-vous consacrer quelques instants à répondre au questionnaire au verso de ce courrier et de le remettre au chauffeur de collecte, avant le 10 septembre 2010.

Après dépouillement et analyse des réponses, une synthèse sera établie. Un résumé vous sera communiqué.

Nous vous remercions de votre participation et vous prions de croire, Madame, Monsieur, en nos salutations distinguées.

Le Responsable Relations Producteurs Nord.

QUESTIONNAIRE « ELEVAGE TÉMOIN »

Nom de l'élevage :

Email :

Nombre de vaches laitières en lactation :

Race :

➤ Quel était votre **pourcentage de réussite à la 1^{ère} insémination artificielle** sur les dernières années (dans la mesure du possible pour deux années 2006 et 2009, ce qui nous permettra de comparer au mieux avec les autres élevages) ?

☞ *Préciser pour chaque données l'origine des données : document du contrôle laitier ou seulement déclaratif. Si vous n'avez des données que pour d'autres années, vous pouvez quand même les écrire en précisant l'année.*

2006

2009

➤ Quel est le poids carcasse moyen à l'abattage des vaches réformées sur les dernières années (dans la mesure du possible pour deux années 2006 et 2009) ?

☞ *S'appuyer sur les relevés d'abattoir*

2006

2009

➤ Sur l'année écoulée (en 2009), quel pourcentage de vaches en lactation a souffert de maladies inflammatoires chroniques (affections de type mammites, boiteries) et de déplacement –torsion de caillette ?

☞ *Détailler par type d'affection (mammites, boiteries, caillette).*

% de mammites

% de boiteries

% de caillettes

➤ Quelle est la ration type hivernale ?

➤ Pensez-vous que la complémentation en lin/luzerne de la ration alimentaire pourrait avoir un effet bénéfique sur la santé de votre troupeau ?

Annexe n°2 : Synthèse à destination des éleveurs ayant participé à l'enquête.

Aux éleveurs ayant participé à l'enquête sur l'impact de la démarche Linus sur la santé des troupeaux laitiers,

L'enquête menée dans le Pays de Bray, en collaboration avec Danone, sur l'impact de la mise en place du programme Linus sur la santé des troupeaux ne sera conclue que lors que vous aurez pris connaissance des résultats obtenus. Au vu de la trop faible participation, les résultats communiqués ne sont pas statistiquement significatifs.

Entre 2006 et 2009 la variation du pourcentage de réussite en première insémination est comprise pour les 38 *élevages engagés* dans la démarche Linus, entre -16% et +11%, avec en moyenne une **amélioration de 3,8%** alors que pour les 7 *élevages non engagés*, elle est comprise entre -14% et +5%, avec en moyenne une **dégradation de 2,4%**. Il n'y a pas de lien entre la réussite en première insémination globale sur l'ensemble du troupeau en 2009 et la teneur en ALA (oméga 3) dans le lait de tank, en considérant 32 élevages.

En moyenne sur les 45 *élevages engagés* dans la démarche Linus, le poids de carcasse moyen des vaches réformées a **augmenté de 10 kg** alors que pour les vaches issues d'*élevages non engagés* dans la démarche, il a **diminué de 7,4 kg** pour les vaches. 2 élevages engagés commercialisent depuis l'entrée dans le programme Linus, les vaches sans engraissement préalable dans la mesure où leur état d'engraissement est désormais suffisant en sortie de période de traite.

Pour la moitié des 21 *élevages engagés* ayant répondu à la question concernant la santé des veaux d'élevage, la moitié n'a pas constaté de changement dans l'élevage des veaux (phase lactée). Un tiers a constaté une baisse des diarrhées. Aucun éleveur ne rapporte une augmentation des maladies, ni d'autre impact négatif.

Deux points positifs consécutifs à l'engagement dans la démarche Linus ressortent de l'enquête : amélioration de la reproduction et amélioration de la lactation. Un tiers des éleveurs n'ont constaté aucune amélioration depuis leur entrée dans la démarche Linus.

Je vous remercie de votre contribution à mon travail.

J.GUIHARD

Annexe n°3 : Une autre voie d’approche de la modification de la composition du lait : génétique et génomique.

PhénoFinLait :

Depuis 2009, PhénoFinLait, un programme de recherche et développement de la filière laitière axé autour du phénotypage et génotypage de la composition fine du lait est en cours. Alors que jusqu’à présent le phénotypage avait plutôt porté sur des critères morphologiques ou sur les taux utiles, ce programme de recherche associe le phénotypage sur les caractères fins (nature des acides gras et composition), le génotypage et des enquêtes en élevage à grande échelle. PhénoFinLait est divisé en 3 étapes :

- 1) mise au point des méthodes d'analyses à haut débit des composants fins du lait (spectrométrie en moyen infrarouge),
- 2) collecte des échantillons et enquête en élevage sur l'alimentation du troupeau (20 000 femelles laitières dont 12000 vaches dans près de 1500 élevages répartis dans 26 départements),
- 3) valorisation des données avec pour but ultime une aide à la sélection génomique.

Les premiers résultats issus de PhenoFinLait (Esvan et al., 2010) confirment les données déjà présentes dans la littérature à savoir :

- qu’il y a une influence marquée du régime alimentaire sur la composition fine du lait : l’utilisation d’ensilage de maïs favorise les AGS par rapport à un système herbagé,
- que les AGI (surtout AGPI) sont corrélés négativement avec le TB,
- que la teneur en AGI baisse avec le numéro de lactation et avec l’avancement dans la lactation.

Héritabilité de la composition fine du lait:

Les différents AG ont une héritabilité comprise entre 0,22 et 0,46. Elle est de 0,29 pour les AGPI (figure 13). D’autres valeurs sont proposées par Schenninck et al. (2009) : 0,59 pour les acides gras de C4:0 à C14:0, 0,43 pour C16:0, 0,25 pour les acides gras insaturés avec 18 atomes de carbone et une exception 0,42 pour le C18:2 cis-9 trans-11.

<i>AG saturés</i>	0,43
<i>AG insaturés</i>	0,23
<i>AG monoinsaturés</i>	0,22
<i>AG polyinsaturés</i>	0,29
<i>AG courtes chaines</i>	0,46
<i>AG moyennes chaines</i>	0,44
<i>AG longues chaines</i>	0,23

Figure 13 : Héritabilité moyenne des différents acides gras du lait. Source : Bastin *et al.*, 2010.

Rappelons qu'une héritabilité de 0,29 signifie que 29% de la variation totale du caractère est due aux effets additifs des gènes de l'animal et 71% est due aux effets de l'environnement et aux effets non additifs. Ainsi si la différence de teneur en AGPI entre deux vaches est de 1 g/L cela veut dire que génétiquement la différence entre ces deux animaux est de $1 \text{ g/L} \times 0,29 = 0,29 \text{ g/L}$. D'après les résultats ci-dessus, les acides gras courts à moyennes chaines, issus de la synthèse *de novo*, sont les plus héritables.

Gène SCD :

La stéaroyl-CoA désaturase (SCD), une enzyme présente dans les glandes mammaires et les tissus adipeux des ruminants, a pour fonction de désaturer l'acide stéarique en acide oléique. L'intérêt suscité par la SCD tient à sa capacité à convertir l'acide vaccénique (trans-11 C18:1) en acide linoléique conjugué cis-9, trans-11 (CLA 9,11). La concentration d'CLA 9,11 dans le lait varie beaucoup d'une vache à l'autre, et cette variation pourrait être due, en partie, à la variation de l'activité de la SCD mammaire.

Le balisage du génome bovin par différents marqueurs (cartographie du génome bovin, Leveziel & Cribiu, 2000) a permis l'identification de nombreuses régions d'intérêt impliquées dans l'expression d'un caractère quantitatif (ou « Quantitative Trait Loci », QTL) affectant notamment la composition générale et fine du lait. L'identification des gènes contenus dans une région d'intérêt peut permettre de connaître la ou les mutation(s) causales expliquant la variabilité du caractère associé à cette région. Le séquençage du génome bovin a permis une avancée importante dans l'identification des mutations causales associées aux QTL (Faucon, 2009). Les QTL caractérisant le TB ont été positionnés sur les chromosomes 6

et 14 et ceux expliquant la quantité de matière grasse laitière sont localisés sur les chromosomes 14 et 26 (Jiang et al., 2005 ; Khatkar et al., 2004).

L'examen des séquences d'ADN des gènes codant la SCD chez 44 vaches de race Holstein et 48 vaches de race Jersey a révélé trois SNP (Single Nucleotide Polymorphism) chez les deux races et un quatrième SNP spécifique aux Holstein. Ces SNP se traduisent par 4 génotypes différents de SCD chez les vaches Holstein et seulement 2 génotypes chez les Jersey. Seulement 2 génotypes (les mêmes chez chaque race) codaient des enzymes ayant des séquences d'acides aminés différentes. Ainsi il est possible que ces deux variants d'enzymes puissent contribuer à la variation observée de la concentration d'CLA 9,11 dans le lait (Zhao, 2009).

La génomique est une voie en plein essor pour contribuer à améliorer la qualité nutritionnelle du lait. Les nouveaux moyens d'investigations de la génomique permettent une plus grande accessibilité de cette technique en élevage.

Bibliographie

- ACHARD D., GILBERT M, BÉNISTANT C., SLAMA S.B., DEWITT D.L., SMITH W.L., LAGARDE M. (1997) Eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids reduce PGH synthase 1 expression in bovine aortic endothelial cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 241, 513-518.
- AGARWAL A., GUPTA S., SHARMA R.K. (2005) Role of oxydative stress in female reproduction *Reproductive Biology and Endocrinology*, 3, 28.
- AKRAIM F. (2005) Effet du traitement thermique des graines de lin sur la biohydrogénation ruminale des acides gras polyinsaturés et la qualité des la matière grasse du lait de vache. Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, option agronomie.
- AMBROSE D.J., KASTELIC J. P., CORBETT R., PITNEY P. A., PETIT H. V., SMALL J. A., ZALKOVIC P. (2006) Lower Pregnancy Losses in Lactating Dairy Cows Fed a Diet Enriched in α -Linolenic Acid. *Journal of Dairy Science* 89, 3066-3074.
- BAGUMA-NIBASHEKA M., BRENNAN J.T., NATHANIELSZ P.W. (1999) Delay of preterm delivery in sheep by omega-3 long-chain polyunsaturates. *Biology of Reproduction*, 60, 698-701.
- BALAGUER, S. A., PERSHING R. A., RODRIGUEZ-SALLABERRY C., THATCHER W. W., BADINGA L. (2005) Effects of bovine somatotropin on uterine genes related to the prostaglandin cascade in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 88, 543-552.
- BALLOU M.A., DEPETERS E.J. (2008) Supplementing Milk Replacer with Omega-3 Fatty Acids from Fish Oil on Immunocompetence and Health of Jersey Calves. *Journal of dairy science*, 91, 3488-3500.
- BASTIN C., SOYEURT H. (2010) Utilisation de l'information infrarouge moyen dans l'élevage laitier, Europel, La Roche Sur Foron.
- BAUMAN D.E., GRIINARI J.M. (2003) Nutritional regulation of milk fat synthesis. *Annu. Rev. Nutr.*, 23, 203-27.
- BEGUIN E., BRUNSCHWIG P., HEUMEZ G. GARNIER C., GILLES B. (2009) Enrichir du lait en oméga 3 avec de la graine de lin. Impact technico-économique d'un concentré à base de graine de lin extrudée dans 2 systèmes fourragers. Ed. Réseaux d'élevage pour le conseil et la prospérité. Coll. Théma.
- BERTICS S.J., GRUMMER R.R., CADORNIGA-VALINO C., STODDARD E.E. (1992) Effect of prepartum dry matter intake on liver triglyceride concentration and early lactation. *Journal of Dairy Science*, 75, 1914-1922.
- BILBY T.R., GUZELOGLU A., MACLAREN L.A., STAPLES C.R., THATCHER W.W. (2006b) Pregnancy, bovine somatotropin, and dietary n-3 fatty acids in lactating dairy cows: II. Endometrial gene expression related to maintenance of pregnancy. *Journal of Dairy Science*, 89, 3375-3385.
- BILBY T.R., JENKINS T., STAPLES C.R., THATCHER W.W. (2006c). Pregnancy, bovine somatotropin, and dietary n-3 fatty Acids in lactating dairy cows: III. Fatty acid distribution. *Journal of Dairy Science*. 89, 3386-3399.
- BILBY T.R., SOZZI A., LOPEZ M. M., SILVESTRE F.T., EALY A.D., STAPLES C.R., THATCHER W.W. (2006d) Pregnancy, bovine somatotropin, and dietary n-3 fatty acids in lactating dairy cows: I. Ovarian, conceptus, and growth hormone-Insulin-Like Growth Factor System responses. *Journal of Dairy Science*, 89, 3360-3374.
- BRUNSCHWIG P., HURTAUD C., CHILLIARD Y., GLASSER P. (2010) L'apport de lin dans la ration des vaches laitières : Effets sur la production, la composition du lait et des produits laitiers, les émissions de méthane et les performances de reproduction. *INRA Prod. Anim.*, 23, 4, 307-318.
- BRUNSCHWIG PH., KERNEN P., WEILL P. (1998) Effets d'une supplémentation en acides gras polyinsaturés sur les performances de vaches laitières en milieu de lactation. *Rencontre Recherche Ruminants*, 5, 262.
- BRUNSCHWIG PH., MOREL D'ARLEUX F., COLIN G., EVRARD J. (1996) Effets de l'apport de tourteau de lin sur les performances de vaches laitières à l'ensilage de maïs. *Rencontre Recherche Ruminants*, 3, 285-288.
- CALDARI-TORRES C., RODRIGUEZ-SALLABERRY C., GREENE E.S., BADINGA L. (2006) Differential effects of n-3 and n-6 fatty acids on prostaglandin F2 α production by bovine endometrial cells. *Journal of Dairy Science*, 89, 971-977.

- CALDER P. C., YAQOUB P., THIES F., F. A. WALLACE, MILES E.A. (2002) Fatty acids and lymphocyte functions. *Br. J. Nutr.* 87, 31-48.
- CALDER P.C., BOND J.A., HARVEY D.J., GORDON S., NEWSHOLME E.A.(1990) Uptake and incorporation of saturated and unsaturated fatty acids into macrophage lipids and their effect upon macrophage adhesion and phagocytosis. *Biochem. J.*, 269, 807-814.
- CHAMPEIL-POTOKAR G. (2002) Etude in vivo et in vitro des effets des AGPI n-3 sur la plasticité astrocytaire : rôle dans la fonctionnalité de l'horloge cérébrale, Prix de projet de Recherche Alimentation et santé 2002.
- CHENG Z., ELMES M., KIRKUP S.E., ABAYASEKARA D.R.E., WATHES D.C. (2004) Alteration of prostaglandin production and agonist responsiveness by n-6 polyunsaturated fatty acids in endometrial cells from late-gestation ewes. *Journal of Endocrinology*, 182, 249-256.
- CHEVALLIER, F. (2001) La digestion ruminale des amidons : cinétique et applications. Thèse d'exercice, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2001, 115 p.
- CHILDS S., CARTER F., LYNCH C.O., SREENAN J.M., LONERGAN P., HENNESSY A.A., KENNY D.A. (2008) Embryo yield and quality following dietary supplementation of beef heifers with n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFA). *Theriogenology*, 70, 992-1003.
- CHILLIARD Y., FERLAY A., DOREAU M. (2001) Contrôle de la qualité nutritionnelle des matières grasses du lait par l'alimentation des vaches laitières: acides gras trans, polyinsaturés, acide linoléique conjugué. *INRA Productions Animales*, 14, 323-335.
- CHILLIARD Y., MARTIN C., ROUEL J., DOREAU M. (2009) Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. *Journal of Dairy Science*, 92, 10, 5199-5211.
- CHOUINARD P.Y., CORNEAU L., BARBANO D.M., METZGER L.E., BAUMAN D.E. (1999) Conjugated linoleic acids alter milk fatty acid composition and inhibit milk fat secretion in dairy cows. *J Nutr*, 129, 1579-1584.
- CHOUINARD Y. (2002) Production et émissions du méthane et du gaz carbonique par les ruminants. 65e congrès de l'Ordre des agronomes du Québec. 10 pages.
- CHOW T.T., FIEVEZ V., MOLONEY A.P., RAES K., DEMEYER D., DE SMET S. (2004) Effect of fish oil on in vitro rumen lipolysis, apparent biohydrogenation of linoleic and linolenic acids and accumulation of biohydrogenation intermediates. *Animal Feed Science and Technology*, 117, 1-12.
- COURTET-LEYMARIOS F. (2010) Qualité nutritionnelle du lait de vache et de ses acides gras. Voies d'amélioration par l'alimentation. Thèse pour le doctorat vétérinaire.
- COYNE G.S., KENNY D.A., CHILDS S., SREENAN J.M., WATERS S.M. (2008) Dietary n-3 polyunsaturated fatty acids alter the expression of genes involved in prostaglandin biosynthesis in the bovine uterus. *Theriogenology*, 70, 772-782.
- CZERKAWSKI J.W., BLAXTER K.L., WAINMAN F.W. (1966) The metabolism of oleic, linoleic and linolenic acids by sheep with reference to their effects on methane production. *Br. J. Nutr.*, 20, 349-362.
- DEMEYER D.I., HENDERICKX H.K. The effect of C18 unsaturated fatty acids on methane production in vitro by mixed rumen bacteria. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA). Lipids and Lipid Metabolism*, 137, 3, 484-497.
- DONG Y. BAE, H.D. MCALLISTER, T.A. MATHISON, G.W., CHENG K.J. (1997) The effect of supplementary fibrolytic enzymes, bromoethanesulfonate and monensin on digestibility of grass hay and methane production in the Rusitec. Workshop on Greenhouse gas research in Agriculture, Saint-Foy.
- DOREAU M., FERLAY A. (1994) Digestion and utilization of fatty acids by ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 4, 379-396.
- EMKEN E.A., ADLOF R.O., RAKOFF H., ROHWEDDER W.K., GULLEY R.M. (1990) Metabolism in vivo of deuterium-labelled linoleic acid and linoleic acids in Humans. *Biochemical Society Transactions* 18, 766-769.
- ERICKSON K.L., HUBBARD N.E. (1996) Dietary fish oil modulation of macrophage tumoricidal activity. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 2, 34-38.
- ESVAN S., DRAGAN C., VARENNE A., ASTRUC J-M., BARILLET F., BOICHARD D., BRUNSCHWIG P., DUBRULLE A., FAUCON-LAHALLE F., FERLAY A., LAGRIFFOUL G., LARROQUE H., LEGARTO J., PALHIÈRE I., PEYRAUD J-L., RUPP R., BROCHARD M. (2010) PhénoFinlait, premiers résultats : influence

de l'alimentation, de l'état physiologique et de la génétique sur la composition en acides gras des laits de vache, brebis et chèvre. Rencontre Recherche Ruminants.

EUGENE M., MARTIN C., MIALON M. M., KRAUSS D., RENAND G., DOREAU M. (2009) Réduction des émissions de méthane en début d'engraissement chez le taurillon alimenté avec des rations riches en concentrés et supplémentées en graine de lin. Rencontre Recherche Ruminants, 16, 246.

FAUCON F. (2009) Identification chez les ruminants des gènes ou réseaux de gènes impliqués dans la différenciation et le fonctionnement de la glande mammaire. Thèse pour le doctorat vétérinaire.

FLY A.D., JOHNSTON P.V. (1990) Tissue fatty acid composition, prostaglandin synthesis, and antibody production in rats fed corn, soybean, or low erucic acid rapeseed oil (canola oil). Nutrition Research, 10, 11, 1299-1310.

FRIGGENS N.C., DISENHAUS C., PETIT H.V. (2010) Nutritional sub-fertility in the dairy cow : towards improved reproductive management through a better biological understanding. Animal, 4, 1197-1213.

FRITSCHKE, K. L.; CASSITY, N. A.; HUANG, S. C. (1991) Effect of dietary fats on the fatty acid compositions of serum and immune tissues in chickens. Poultry Sci., 70, 5, 1213-1222.

FUENTES M.C., CALSAMIGLIA S., SÁNCHEZ C., GONZÁLEZ A., NEWBOLD J.R., SANTOS J.E.P., RODRÍGUEZ-ALCALÁ L.M., FONTECHA J. (2008) Effect of extruded linseed on productive and reproductive performance of lactating dairy cows. Livestock Science 113, 144-154.

GOFF A.K. (2004) Steroid hormone modulation of prostaglandin secretion in the ruminant endometrium during the estrous cycle. Biology of Reproduction 71, 11-16.

GONTHIER C., MUSTAFA A.F., OUELLET D.R., CHOUINARD P.Y., BERTHIAUME R., PETIT H.V. (2005) Feeding micronized and extruded flaxseed to dairy cows: effects on blood parameters and milk fatty acid composition. Journal of Dairy Science 88, 748-756.

GRUMMER R.R. (1991) Effect of feed on the composition of milk fat. Journal of Dairy Science, 74, 3244-3257.

GUELOU K. (2010) La mortalité embryonnaire chez la vache et l'influence de l'alimentation. Thèse pour le doctorat vétérinaire.

GUREVICH M., HAREL-MARKOWITZ E., MARCUS S., SHORE L.S., SHEMESH M., (1993) Prostaglandin production by the oocyte cumulus complex around the time of fertilisation and the effect of prostaglandin E on the development of the early bovine embryo. Reprod. Fertil. Dev. 5, 281-283.

HARFOOT C.G., HAZLEWOOD G.P. (1988) Lipid metabolism in the rumen. In: The Rumen Microbial Ecosystem (Hobson, P.N., ed.), 285-322. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, The Netherlands.

HAWKINS D.E., NISWENDER K.D., OSS G.M., MOELLER C.L., ODDE K.G., SAWYER H.R., NISWENDER G.D. (1995) An increase in serum lipids increases luteal lipid content and alters the disappearance rate of progesterone in cows. Journal of Animal Science, Vol 73, 2, 541-545.

HENDERSON C. (1973) The effects of fatty acids on pure cultures of rumen bacteria. J. Agric. Sci. (Camb.), 81, 107-112.

HERAVI MOUSSAVI A.R., GILBERT R.O., OVERTON T.R., BAUMAN D.E., BUTLER W.R. (2007) Effects of Feeding Fish Meal and n-3 Fatty Acids on Ovarian and Uterine Responses in Early Lactating Dairy Cows Journal Dairy Science, 90, 145-154.

HINCKLEY T., CLARK R.M., BUSHMICH S.L., MILVAE R.A. (1996) Long chain polyunsaturated fatty acids and bovine luteal cell function. Biology of Reproduction, 55, 445-449.

HOWIE A., LEAVER H.A., WILSON N.H., YAP P.L., AITKEN I.D. (1992) The influence of dietary essential fatty acids on uterine C20 and C22 fatty acid. Composition. Prostaglandins Leukotrienes and Essential Fatty Acids 46, 111-121.

HUNT J.S., PETROFF M.G., MCINTIRE R.H., OBER C. (2005). HLA-G and immune tolerance in pregnancy. Faseb J., 9, 681-693.

JENSEN R.G. (2002) Invited Review: The Composition of Bovine Milk Lipids: January 1995 to December 2000. Journal of Dairy Science, 85, 295-350.

JOUANY J.P. (1994) Manipulation of microbial activity in the rumen. Arch. Anim.Nutr., 46 : 133-153.

- JUMP, D. B., AND S. D. CLARKE (1999) Regulation of gene expression by dietary fat. *Annu. Rev. Nutr.* 19:63–90.
- KREUZER M., KIRCHGESSNER M., MÜLLER H.L. (1986) Effect of defaunation on the loss of energy in wethers fed different quantities of cellulose and normal or steamflaked maize starch, *Anim. Feed Sci. Technol.* 16, 233-241.
- LAMMING G.E., DARWASH A.O. (1998) The use of milk progesterone profiles to characterise components of sub fertility in milked dairy cows. *Anim Reprod Sci.*, 52, 175–90.
- LARSEN L.N., HOVIK K., BREMER J., HOLM K.H., MYHREN F., BORRETZEN B. (1997) Heneicosapentaenoate (21:5, n-3): its incorporation into lipids and its effects on arachidonic acid (20:4, n-6) and eicosanoid synthesis. *Lipids* 32, 707-714.
- LAURENT-JACCARD (2006) Place des acides gras oméga 3 dans l'alimentation. *Revue médicale suisse*, 59.
- LE MEZEC P., BARBAT A., DUCLOS D. (2005) Fertilité des vaches laitières : la situation dans 4 coopératives d'insémination de l'Ouest. *Rencontre Recherche Ruminants*.
- LEBOIS S., COULMIER D., MAIGNAN S., BALLARD V. (2007) Impact de l'apport de fourrages déshydratés sur la teneur en acide α -linoléique du lait d'hiver. *Rencontre Recherche Ruminant* 14,344.
- LECERF J.-M. (2008) Acides gras et maladies cardiovasculaires : De l'épidémiologie à la pratique clinique. *Cholé-Doc*, Centre de recherche et d'informations nutritionnelles, 110, 1-4.
- LEMLEY C.O., BUTLER S.T., BUTLER W.R., WILSON M.E. (2008) Short Communication: Insulin Alters Hepatic Progesterone Catabolic Enzymes Cytochrome P450 2C and 3A in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 91, 641–645.
- LEROY J.L.M.R., VAN SOOM A., OPSOMER G., GOOVAERTS I.G.F., BOLS P.E.J. (2008) Mechanisms linking nutrition and reduced oocyte and embryo quality in high yielding dairy cows. Review II. *Reproduction in Domestic Animals. Reprod. Dom. Anim.* 43, 623-632.
- LESSARD M., GAGNON N., PETIT H.V. (2003) Immune response of postpartum dairy cows fed flaxseed. *Journal of Dairy Science*, 86, 2647-2657.
- LIU, C.H., LEE, M.S., HSIEH, C.H., HUANG, C.C., TSAO, H.M., HSIEH, Y.S. (2006) Prostacyclin enhances mouse embryo development and hatching but not increased embryonic cell number and volume. *Fertil Steril.* 86 (Suppl. 4), 1047–1052.
- LOCK A.L., GARNSWORTHY P.C. (2002). Independent effects of dietary linoleic and linolenic fatty acids on the conjugated linoleic acid content of cows' milk. *Animal Science*, 74, 163-176.
- LOOR J.J., UEDA K., FERLAY A., CHILLIARD Y., DOREAU M. (2004) Biohydrogenation, duodenal flow, and intestinal digestibility of trans fatty acids and conjugated linoleic acids in response to dietary forage : concentrate ratio and linseed oil in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 87, 2472-2485.
- MACHMÜLLER A., SOLIVA C.R., KREUZER M. (2003) Methane-suppressing effect of myristic acid in sheep as affected by dietary calcium and forage proportion. *Bri. J. Nutr.*, 90, 529-540.
- MACLAREN L.A., GUZELOGLU A., MICHEL F., THATCHER W.W. (2006) Peroxisome proliferator-activated receptor (PPAR) expression in cultured bovine endometrial cells and response to omega-3 fatty acid, growth hormone and agonist stimulation in relation to series 2 prostaglandin production. *Domestic Animal Endocrinology*, 30, 155-169.
- MAGNESS R.R., OSEI-BOATEN K., MITCHELL M.D., ROSENFELD C.R. (1985) In vitro prostacyclin production by ovine uterine and systemic arteries. Effects of angiotensin II. *J Clin. Invest.* 76, 2206-2212.
- MALEPLATE T., LEBOIS S., COULMOER D. (2009) Equation des acides gras oméga 3 et oméga 6 en fonction du taux de protéine de la luzerne déshydratée. *Rencontre Recherche Ruminants* 16, 78.
- MANO H., KIMURA C., FUJISAWA Y., KAMEDA T., WATANABE-MANO M., KANEKO H., KANEDA T., HAKEDA Y., KUMEGAWA M. (2000) Cloning and function of rabbit peroxisome proliferator-activated receptor δ/β in mature osteoclasts. *J. Biol. Chem.* 275, 8126-8132.
- MARTIN C. (2009) Production de gaz à effet de serre par l'élevage : quelles perspectives de réduction? INRA Clermont-Ferrand / Theix, présentation personnelle.
- MARTIN C., MORGAVI D., DOREAU M., JOUANY J.P. (2006) Comment réduire la production de méthane chez les ruminants ? *Fourrages*, 187, 283-300.

- MARTIN C., POMIÈS D., FERLAY A., ROCHETTE Y., EUGÈNE M., MARTIN B., DOREAU M., CHILLIARD Y. (2010) Methane output in dairy cows in response to long-term feeding of grass-based diets supplemented with linseed or rapeseed. 4th International Conference on Greenhouse Gases and Animal Agriculture (GGAA 2010), Banff, Canada, 105.
- MARTIN C., ROUEL J., JOUANY J.P., DOREAU M., CHILLIARD Y. (2008) Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed, extruded linseed, or linseed oil. *Journal of Animal Science*, 86:2642–2650.
- MASHEK D.G., BERTICS S.J. AND GRUMMER R.R. (2005) Effects of intravenous triacylglycerol emulsions on hepatic metabolism and blood metabolites in fasted dairy cows. *Journal of Dairy Science* 88, 100-109.
- MATHIEU Y., FOUGERE M., BERGOT Y., DEMERLE P., BRUNSCHWIG P., CHATELLIER V. (2008) Effet sur la composition du lait et les performances des vaches laitières de la distribution d'un concentré à base de graines de lin extrudées. *Rencontre Recherche Ruminants* 15, 117.
- MATSUO, N., K. OSADA, T. KODAMA, B. O. LIM, A. NAKAO, K. YAMADA, AND M. SUGANO (1996) Effects of γ -linolenic acid and its positional isomer pinolenic acid on immune parameters of Brown Norway rats. *Prostaglandins Leukot. Essent. Fatty Acids*, 55, 223-229.
- MATSUURA, H., H. ADACHI, R. C. SMART, X. XU, J. ARATA, AND A. M. JETTEN (1999) Correlation between expression of peroxisome proliferator-activated receptor beta and squamous differentiation in epidermal and tracheobronchial epithelial cells. *Mol. Cell. Endocrinol.*, 147, 85-92.
- MATTOS R., GUZELOGLU A., BADINGA L., STAPLES C.R., THATCHER W.W. (2003) Polyunsaturated fatty acids and bovine interferon-tau modify phorbol ester-induced secretion of prostaglandin F₂-alpha and expression of prostaglandin endoperoxide synthase-2 and phospholipase-A₂ in bovine endometrial cells. *Biology of Reproduction*, 69, 780-787.
- MATTOS R., STAPLES C.R., ARTECHE A., WILTBANK M.C., DIAZ F.J., JENKINS T.C., THATCHER W.W. (2004) The effects of feeding fish oil on uterine secretion of PGF₂-alpha, milk composition, and metabolic status of periparturient Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 87, 921-932.
- MATTOS R., STAPLES C.R., THATCHER W.W. (2000) Effects of dietary fatty acids on reproduction in ruminants. *Reviews of Reproduction*, 5, 38-45.
- MATTOS R., STAPLES C.R., WILLIAMS J., AMOROCHO A., MCGUIRE M.A., THATCHER W.W. (2002) Uterine, ovarian, and production responses of lactating dairy cows to increasing dietary concentrations of menhaden fish meal. *Journal of Dairy Science*, 85, 755-764.
- MEGAHED G.A., ANWAR M.M., WASFY SI AND HAMMADEH M.E. (2008) Influence of heat stress on the cortisol and oxidant-antioxidants balance during oestrous phase in buffalo-cows (*Bubalus bubalis*): thermo-protective role of antioxidant treatment. *Reproduction in Domestic Animals*. 43, 672-677.
- MEIER S., LEDGARD A.M., SATOT A., PETERSON A.J., MITCHELL M.D. (2009) Polyunsaturated fatty acids differentially alter PGF₂ α and PGE₂ release from bovine trophoblast and endometrial tissues during short term culture. *Animal Reproduction Science*, 111, 353-360.
- MELUCHOVÁ B., BLAŠKO J., KUBINEC R., GÓROVÁ R., DUBRAVSKÁ J., MARGETÍN M., SOJÁK L. (2008) Seasonal variations in fatty acid composition of pasture forage plants and CLA content in ewe milk fat. *Small Ruminant Research*, 78, 1-3, 56-65.
- MORAND-FEHR P., TRAN G. (2001) La fraction lipidique des aliments et les corps gras utilisés en alimentation animale. *INRA Productions animales* 14, 5, 285-302.
- MOSS A.R., JOUANY J.-P., NEWBOLD C.J. (2000) Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Ann. Zootech.* 49, 231-253.
- MUTURI K.N., SCAIFE J.R., LOMAX M.A., JACKSON F., HUNTLEY J., COOP R.L. (2005) The effect of dietary polyunsaturated fatty acids (PUFA) on infection with the nematodes *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora* in calves. *Veterinary Parasitology* 129, 273-283.
- NEWBOLD C.J., LASSALAS B., JOUANY J.P. (1995) The importance of methanogens associated with ciliate protozoa in ruminal methane production in vitro. *Lett. Appl. Microbiol.* 2, 230-234.
- NUTRANEWS Science, Nutrition, Prévention et Santé, juin 2003.

OLSEN S., SORENSEN J.D., SECHER N. J., HEDEGAARD M., HENRIKSEN T. B., HANSEN H. S., GRANT A. (1992) Randomized controlled trial of effect of fish-oil supplementation on pregnancy duration. *Lancet* 25, 1003-1007.

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (1998) Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine. Collection FAO: Alimentation et nutrition, n° 28.

PALIN M.-F., BROCHU-GAUDREAU K, BEAUDRY D., SMALL J.A., PETIT H.V. (2005) Effects of feeding flaxseed on cyclooxygenase 2 (Cox-2) and peroxisome proliferator-activated receptors (PPAR) delta and gamma mRNA levels at the time of maternal recognition of pregnancy in Holstein cows. Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Society for Study of Reproduction, Québec City, QC, Canada, 142.

PETIT H.V., BENCHAAAR C. (2007) Importance de la nature des graisses alimentaires sur la reproduction des vaches laitières. *Rencontre Recherche Ruminants*, 14, 329.

PETIT H.V., CÔRTEZ C., GAGNON N., PALIN M.F., TAO S., BENCHAAAR C., LACASSE P. (2009) Flaxhulls and oil supplementation on the activity of antioxidant enzymes in dairy cows. In: *Ruminant physiology. Digestion, metabolism, and effects of nutrition on reproduction and welfare*.

PETIT H.V., DEWHURST R.J., SCOLLAN N.D., PROULX J.G., KHALID M., HARESIGN W., TWAGIRAMUNGU H., MANN G.E.(2002) Milk Production and Composition, Ovarian Function, and Prostaglandin Secretion of Dairy Cows Fed Omega-3 fats. *Journal of Dairy Science*, 85, 889-899.

PETIT H.V., GERMIQUET C., LEBEL D. (2004) Effect of Feeding Whole, Unprocessed Sunflower Seeds and Flaxseed on Milk Production, Milk Composition, and Prostaglandin Secretion in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 87, 3889-3898.

PETIT H.V., TWAGIRAMUNGU H. (2006) Conception rate and reproductive function of dairy cows fed different fat sources. *Theriogenology*, 66, 1316-1324.

PINARES-PATIÑO C., BAUMONT R., MARTIN C. (2003) Methane emissions by charolais cows grazing a monospecific pasture of timothy at four stages of maturity. *Can. J. Anim. Sci.*, 83, 769-777.

PRECHT D., MOLKENTIN J. (1999) 18:1, 18:2 and 18:3 trans and cis fatty acid isomers including conjugated cisD9, transD11 linoleic acid (CLA) as well as total fat composition of german human milk lipids. *Nahrung* 43, 233-244.

PRINS R.A., VAN NEVEL C.J., DEMEYER D.I. (1972) Pure culture studies of inhibitors for methanogenic bacteria. *Ant. V. Leeuwenhoek J. Microbiol. Serol.*, 38, 281-287.

RAGHUPATHY R. (2001) Pregnancy: success and failure within the Th1/Th2/Th3 paradigm. *Seminars in Immunology*, 13, 4, 219-227.

RANILLAM J., MORGAVI D.P., JOUANY J-P. (2004) Effect of time after defaunation on methane production in vitro. *Reprod. Nutr. Develop.*, 44 (Suppl.1), 35.

REES D., MILES E.A., BANERJEE T., WELLS S.J., ROYNETTE C.E., WAHLE K.W.J., CALDER P.C. (2006) Dose-related effects of eicosapentaenoic acid on innate immune function in healthy humans: a comparison of young and older men. *American Journal of Clinical Nutrition*, 83, 2, 331-342.

REGO O.A., REGALO M., ROSA H., ALVES S., BORBA A., BESSA R., CABRITA A., FONSECA A. (2008) Effects of Grass Silage and Soybean Meal Supplementation on Milk Production and Milk Fatty Acid Profiles of Grazing Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 91, 2736-2743.

RICHARDSON A. J., MONTGOMERY P. (2005) The Oxford-Durham study: a randomized controlled trial of dietary supplementation with fatty acids in children with developmental coordination disorder. *Pediatrics*, 115(5).

ROBINSON R.S., PUSHPAKUMARA P.G.A., CHENG Z., PETERS A.R., ABAYASEKARA D.R.E., WATHES D.C. (2002) Effects of dietary polyunsaturated fatty acids on ovarian and uterine function in lactating dairy cows. *Reproduction*, 124, 119-131.

ROYAL M.D., DARWASH A.O., FLINT A.P.F., WEBB R., WOOLLIAMS J.A., LAMMING, G.E. (2000) Declining fertility in dairy cattle: changes in traditional and endocrine parameters of fertility. *Anim Sci*, 70:487-501.

SCHORI F., FRAGNIÈRE C., SCHAEREN W., STOLL W. (2006) Graines de lin et de tournesol dans l'alimentation de la vache laitière. *Revue suisse Agric.* 38, 1, 25-30.

- SEALS R.C., MATAMOROS I., LEWIS G.S. (2002) Relationship between postpartum changes in 13, 14-dihydro-15-keto-PGF₂α concentrations in Holstein cows and their susceptibility to endometritis. *Journal of Animal Science*, 80, 4, 1068-1073
- SEDDON J.M. (2003) Progression of age-related macular degeneration: association with dietary fat, transunsaturated fat, nuts, and fish intake. *Arch ophtalmol.*, 121, 12, 1728-37.
- SHELTON, K., PARKINSON, T.J., HUNTER, M.G., KELLY, R.W., LAMMING, G.E. (1990) Prostaglandin E-2 as a potential luteotrophic agent during early pregnancy in cattle. *J. Reprod. Fertil.* 90, 11-17.
- SIITERI P.K., STITES D.P. (1982) Immunologic and endocrine interrelationship in pregnancy. *Biol Reprod*, 26, 1-14.
- SILVESTRE F.T., RISCO C.A., LOPEZ M., DE SÁ M.J., BILBY T.R., THATCHER W.W. (2009) Use of increasing doses of a degradable Deslorelin implant to enhance uterine involution in postpartum lactating dairy cows. *Anim Reprod Sci.*, 116, 3-4, 196-212.
- SPRECHER H. (1981) Biochemistry of essential fatty acids. *Progress in Lipid Research* 20, 13-22.
- STAPLES C.R., BURKE J.M., THATCHER W.W. 1998. Influence of supplemental fats on reproductive tissues and performance of lactating cows. *Journal of Dairy Science*, 81, 856-871.
- STARBUCK M.J., DAILEY R.A., INSKEEP E.K. (2004) Factors affecting retention of early pregnancy in dairy cattle. *Anim. Reprod. Sci.* 84, 27-39.
- STERESCU A. (2008) Le rôle des acides gras oméga 3 en pédiatrie: entre mythes et réalité. *CHU Sainte-Justine*, 15.01.2008
- TEKIN S., HANSEN P.J. (2004) Regulation of numbers of macrophages in the endometrium of the sheep by systemic effects of pregnancy, local presence of the conceptus, and progesterone. *Am. J. Reprod. Immunol.* 51, 56-62.
- THANGAVELU G., COLAZO M.G., AMBROSE D.J., OBA M., OKINE E.K., DYCK M.K. (2007) Diets enriched in unsaturated fatty acids enhance early embryonic development in lactating Holstein cows. *Theriogenology* 68, 949-957.
- THATCHER W.W., BILBY T., STAPLES C.R., MACLAREN L., SANTOS J. (1997) Effects of polyunsaturated Fatty Acids on Reproductive Processes in Dairy Cattle.
- TROEGELER-MEYNADIER A., ENJALBERT F. (2005) Les acides linoléiques conjugués : 2. Origines et effets sur les productions animales *Revue de Médecine Vétérinaire*, 156, 5, 281-288
- TRUJILLO EP AND BROUGHTON KS (1995) Ingestion of n-3 polyunsaturated fatty acids and ovulation in rats. *Journal of Reproduction and Fertility* 105, 197-203.
- VAN NEVEL C.J. (1991) Modification of rumen fermentation by the use of additives, in: Jouany J.P. (Ed.), *Rumen microbial metabolism and ruminant digestion*, INRA Editions, Paris, 263-280.
- VAN NEVEL C.J., DEMEYER D.I. (1996) Influence of pH on lipolysis and biohydrogenation of soybean oil by rumen contents in vitro. *Reproduction Nutrition Development* , 36, 1, 53-63.
- VASCONCELOS J.L.M., SARTORI R., OLIVEIRA H.N., GUENTHER J.G., WILTBANK M.C. (2001) Reduction in size of the ovulatory follicle reduces subsequent luteal size and pregnancy rate. *Theriogenology* 56, 307-314.
- VERKERK G.A., TAUF A V.K., HOOPER R. (2000) Patterns of luteinising hormone release and embryo recovery following superovulation of cycling and anoestrous lactating dairy cows and in non-lactating cows. *Proc. N. Z. Soc. Anim. Prod.* 60, 295-296.
- VERMOREL M., JOUANY J-P. (1989) Effects of rumen protozoa on energy utilization by wethers of two diets based on ammonia-treated straw supplemented or not with maize. *Asian Austral. J. Anim. Sci.*, 2, 475-476.
- WAMSLEY N.E., BURNS P.D., ENGLE T.E., ENNS R.M. (2005) Fish meal supplementation alters uterine prostaglandin F₂α synthesis in beef heifers with low luteal-phase progesterone. *Journal of Animal Science*, 83, 1832-1838.
- WANDER R.C., HALL J.A., GRADIN J.L., DU S.H., JEWELL D.E. (1997) The ratio of dietary (n-6) to (n-3) fatty acids influences immune system function, eicosanoid metabolism, lipid peroxidation and vitamin E status in aged dogs. *J. Nutr.* 127, 1198-1205.

- WATHES D.C., ABAYASEKARA D.R.E., AITKEN R.J. (2007) Polyunsaturated fatty acids in male and female reproduction. *Biology of Reproduction*, 77, 190-201.
- WEBER N.D., ANDERSEN D.O., NORTH J.A., MURRAY B.K., LAWSON L.D., HUGHES B.G. (1992) In vitro virucidal effects of *Allium sativum* (garlic) extract and compounds. *Planta Med.*, 58, 417-423.
- WEEMS C.W., WEEMS Y.S., LEWIS A.W., NEUENDORFF D.A., RANDEL R.D. (2007) Effects of agonists on bovine luteal or caruncular endometrial secretion of prostaglandins E2 and F2 α (PGE2; PGF2 α) or progesterone (P4). *Soc. Reprod.Fertil. Suppl.* 64, 552.
- WEEMS C.W., WEEMS Y.S., RANDEL R.D. (2006) Prostaglandins and reproduction in female farm animals. *Vet. J.* 171, 206-228.
- WEILL P. (2008) Lettre d'information n°18 du réseau Bleu-Blanc-Cœur.
- WENTZEL P., WELSH N., ERIKSSON U.J. (1999) Developmental damage, increased lipid peroxidation, diminished cyclooxygenase-2 gene expression, and lowered prostaglandin E2 levels in rat embryos exposed to a diabetic environment. *Diabetes* 48, 813-820.
- WILLIAMS A.G., COLEMAN S.G. (1992) The rumen protozoa. Springer Verlag, 334-360.
- WOODS V.B., FEARON M.A (2009) Dietary sources of unsaturated fatty acids for animals and their transfer into meat, milk and eggs: A review. *Livestock Science* 126, 1-20.
- YAQOOB, PALA, CORTINA-BORJA, NEWSHOLME, CALDER (2000) Encapsulated fish oil enriched in α -tocopherol alters plasma phospholipid and mononuclear cell fatty acid compositions but not mononuclear cell functions. *European Journal of Clinical Investigation* 30, 3, 260-274.
- ZACHUT M., DEKEL I., LEHRER H., ARIELI A., LIVSHITZ, L., YAKOBY S, MOALLEM U. (2010) Effects of dietary fats differing in n-6:n-3 ratio fed to high-yielding dairy cows on fatty acid composition of ovarian compartments, follicular status, and oocyte quality. *Journal of Dairy Science*, 93, 529-545.
- ZHAO X., KGWATALALA P., IBEAGHA-AWEMU E.M., HAYES J.F. (2007) Le polymorphisme nucléotidique dans le cadre de lecture ouvert du gène de la stéaroyl-CoA désaturase et les variants géniques qui en résultent chez les vaches Holstein et Jersey, *DNA Sequence Journal of DNA Sequencing and Mapping*, 18, 5, 357-362., In : Points saillants de la recherche canadienne sur les bovins laitiers, 2009.

Pages internet

- Association Française des Eleveurs de la race Prim'Holstein, consultée le 28.08.2011, http://www.primholstein.com/primolstein_fr/actualites/la-fertilite-des-signes-encourageants.html
- Emissions de gaz à effet de serre et bovins lait herbagers, Civam Bretagne, consultée le 15.07.2011, http://extrulin.com/eng/inc_e/extrulin1.html
- Réduire la production de méthane chez les ruminants. INRA, Fiche de Presse Info. 11/07/2008, consultée le 31/08/2011, http://www.inra.fr/presse/reduire_production_de_methane_chez_ruminants
- Coop de France, consultée le 26/09/2011, <http://www.coopdefrance.coop/fr/30/deshydratation-luzerne/>

Titre : Intérêts d'une supplémentation en acides gras oméga 3 sur la production et la santé des vaches laitières : synthèse bibliographique et enquête de terrain.

Mots-clés : acides gras oméga 3, vaches laitières, nutrition, reproduction, qualité du lait, méthane

Résumé : Les acides gras oméga 3, dont l'intérêt pour la santé humaine n'est plus à démontrer, suscitent l'intérêt des industries agro-alimentaires, qui souhaitent commercialiser des aliments enrichis en oméga 3, comme le lait. Produire un lait enrichi en oméga 3 nécessite l'incorporation dans la ration de lin, de luzerne et/ou d'augmenter la part des fourrages à base d'herbe. Les données bibliographiques rapportent des effets sur la santé des vaches, en particulier sur la reproduction et l'immunité et des effets sur les productions de lait et de méthane. D'après l'enquête de terrain, conduite dans le Pays de Bray, la réussite en première insémination est légèrement améliorée et l'état d'engraissement est amélioré. Le surcoût engendré par la mise en place d'une telle ration est le frein majeur à la pérennisation et au développement de ce type de programme à l'heure actuelle en France.

Titel : The interests of the addition of n-3 polyunsaturated fatty acids in the dairy cows' production and their health: bibliographic synthesis and field study.

Keywords : N-3 polyunsaturated fatty acids, dairy cows, nutrition, breeding, milk quality, methane

Abstract : N-3 polyunsaturated fatty acids, for which the benefits for health are not to be proven anymore, arose the interest of farm-products industry, mainly milk industry, to put on the market feedstuffs with more n-3 polyunsaturated fatty acids. Producing a high in n-3 polyunsaturated fatty acids milk requires the incorporation of flax and/or alfalfa into the diet, and the proportion of grass based roughage to be increased. Literature data demonstrate the effects of n-3 fatty acids on the health of cows, and in particular on milk production, reproduction, immunity and methane output. A field study done in Pays de Bray (Normandy France) showed that the success rate at first insemination is slightly improved and the body condition score is improved when linseeds are added to cows diets. The additional cost involved by the implementation of such a ration is a major limit to the sustainability and development of this type of program at the present time.