

REMERCIEMENTS

Ce travail de fin d'étude représente l'aboutissement de ma formation à la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux. Au cours de ces cinq années, beaucoup de personnes ont participé à cette réussite que ce soit par leur soutien inconditionnel ou par leur enseignement. Je tiens ici à les remercier toutes, et plus particulièrement :

Monsieur N. GENGLER, mon promoteur, pour m'avoir soutenu dès le début de ce projet qui paraissait utopique, pour son enseignement et ses conseils avisés quant à l'élaboration de l'analyse génétique et la rédaction du présent travail.

Monsieur A. THÉWIS pour son intérêt porté à la présente étude.

Monsieur A. BULDGEN pour les cours qu'il m'a dispensés et en sa qualité de président de jury.

Monsieur G. LOGNAY et M. MARLIER d'avoir accepté d'être présents dans mon jury et de m'avoir dispensé leurs cours et leurs conseils judicieux pour l'élaboration de la partie chimique de cette étude.

Monsieur P. DARDENNE pour m'avoir permis d'accéder aux technologies du CRA-W, pour son aide dans l'élaboration des droites de calibrage si précieuses à la finalité de ce travail et pour sa participation au jury.

Monsieur C. BERTOZZI pour son aide dans le cadre du partenariat avec le Contrôle Laitier et sa participation au jury.

Monsieur A. GILLON pour sa participation au jury, son implication dans la rédaction du présent travail et pour sa sympathie.

Monsieur R. RENAUVILLE pour son enseignement et sa participation dans le jury.

Monsieur D. TRISMAN et V. HOTE pour m'avoir dispensé leurs précieux conseils quant aux méthodes chimiques utilisées dans la présente étude.

Monsieur D. VESELKO pour son aide dans l'extraction des spectres et sa motivation.

Monsieur P. MAYERES pour son implication dans la rédaction du travail et ses explications utiles à la compréhension de sujets ardues.

Les contrôleurs (D. et N. MALHERBE, F. SALIEN, J. VERBRIGGHE) et les éleveurs (les familles BAELE, BLONDIAU, BORLON, DISKEUVE, DUBOIS, RAVET, ROBERT) pour avoir accepté de participer à ce travail de fin d'étude, pour m'avoir permis de perturber légèrement leurs habitudes et pour leur sympathie.

Les membres du personnel de l'unité de Zootechnie pour leur accueil chaleureux et plus particulièrement, ceux du Groupe de Génétique et Amélioration Animales, CORALINE et SYLVIE pour leur gentillesse et leur aide dans la rédaction de ce présent travail ainsi qu'HEDI et MACIEJ pour leur sympathie.

Ma maman, mes grand-parents, PIERRE et CHRISTIAN pour leur soutien inconditionnel durant ces cinq années malgré ma période de doute et mon stress omniprésent lors des différentes sessions d'examen et une pensée particulière pour mon papa, malheureusement plus de ce monde, qui m'a apporté la motivation nécessaire pour aller jusqu'au bout de mes objectifs. Sans eux rien de tout ceci n'aurait vu le jour.

Beaucoup d'autres personnes ont encore participé à l'aboutissement de cette formation : mes amis et amies ; F. CARLIER et F. DEFELT de l'AFSCA ; V. BAETEN, F. DEHARENG, F. RWAGASORE et G. SINNAEVE du CRA-W; E. SAMBON et J-F STOCKART de l'AWE.

En Wallonie, la sélection laitière bovine est axée, actuellement, sur la quantité en matières grasses et en protéines. Or, des effets potentiellement positifs ou négatifs pour la santé humaine des acides gras ont été recensés dans de nombreuses publications. Par conséquent, se limiter au seul caractère matière grasse globale lors de la sélection semble restrictif. Dans cette optique, le présent travail étudie la faisabilité d'une sélection animale basée sur le profil en acides gras du lait. Pour ce faire, une analyse des différences de composition de la matière grasse entre races laitières mais également au sein de ces dernières a été entreprise.

Les quantités d'acides gras comme les proportions occupées par ceux-ci dans la matière grasse ont été estimées dans les laits analysés par spectrométrie dans le moyen infrarouge. A partir de ces informations et par l'emploi d'un modèle mixte, les différences inter-races ont pu être évaluées. Lors de cette évaluation, le profil en acides gras des laits des 5 races laitières étudiées (Blanc Bleu Mixte, Holstein, Jersey, Montbéliarde et Pie-rouge) s'est révélé différent. Les valeurs obtenues par le rapport variance animale sur variance totale ont été comprise entre 41 et 61 % pour chaque composé de la matière grasse laitière pouvant suggérer une forte variabilité intra-race. De plus, pour chaque acide gras, une variabilité importante a été démontrée au sein de la population participante à l'étude.

En conclusion, sur base de ces informations, une sélection animale axée sur l'amélioration de la qualité nutritionnelle de la matière grasse laitière est envisageable.

Currently there is no cattle selection program which is based on fatty acid profile in milk fat. According to several publications, both the saturated and insaturated fatty acids have positive as well as negative effects on human health. So using overall milk fat as the only criteria in selection may be considered not appropriate.

The aim of this research was to evaluate the potential effectiveness of selection on higher nutritional quality of milk fat. The variability within and across breeds for Dual Purpose Belgian Blue, Holstein-Friesian, Jersey, Montbeliarde and Red and White animals were analysed.

The quantity of fatty acids in milk and milk fat was measured by medium infrared and were analysed using mixed model methodology; this analysis showed that several differences between the five dairy breeds for the profile of fatty acids exist. High repeatability estimates suggest that high additive genetic variance for fatty acid profile exists within each breeds. Moreover the variability for each component was demonstrated in the population.

This first investigation showed that genetic improvement of the nutritional quality of milk fat, therefore on the fatty acid profile, is possible and researcher or development dairy selection progress is justified.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1. Introduction	3
2. Matière grasse	3
2.1. La matière grasse du lait.....	3
2.2. La synthèse des globules gras	4
3. Acides gras	5
3.1. La définition	5
3.2. La nomenclature	5
3.3. Les classes des acides gras	7
3.4. La production des acides gras	8
3.5. L'impact des principaux acides gras sur la santé humaine	12
4. Facteurs intrinsèques et extrinsèques de variation de la matière grasse laitière	15
4.1. Les facteurs extrinsèques	16
4.2. Les facteurs intrinsèques	18
4.3. La variabilité génétique	19
5. Analyses de la matière grasse laitière	22
5.1. L'analyse chromatographique	22
5.2. L'analyse FTIR	23
6. Sélection chez les bovins laitiers.....	24
6.1. Le contrôle laitier	24
6.2. L'évaluation génétique	24
6.3. La définition d'index synthétiques	27
7. Conclusion.....	28
CHAPITRE III : MATÉRIEL ET MÉTHODES	29
1. Introduction	29
2. Expérience préliminaire	29
2.1. Introduction	29
2.2. Les échantillons.....	29
2.3. L'analyse infrarouge	30
2.4. L'identification des différences spectrales	31
2.5. L'analyse chromatographique	32
2.6. La mesure de la reproductibilité du signal infrarouge et de la répétabilité de l'analyse chromatographique	33
2.7. La mesure de la justesse de l'analyse chromatographique.....	33
3. Expérience Principale.....	34
3.1. Introduction	34
3.2. La méthode d'échantillonnage des fermes	34
3.3. Les échantillons.....	35
3.4. L'analyse infrarouge	36
3.5. La sélection des échantillons.....	37
3.6. L'analyse chromatographique	38
3.7. Les droites de calibrage.....	38
4. Différences intra- et inter-races.....	41
4.1. Introduction	41
4.2. L'évaluation des différences intra- et inter-races.....	41

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION	44
1. Expérience préliminaire	44
1.1. Introduction	44
1.2. L'analyse infrarouge des échantillons.....	44
1.3. La performance du système de conservation	47
1.4. L'analyse chromatographique	47
1.5. Conclusion.....	50
2. Expérience Principale.....	50
2.1. Introduction	50
2.2. L'élaboration des droites de calibrage	50
2.3. Les différences intra- et inter-races.....	54
CHAPITRE V : CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES	71
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	74
ANNEXES	81

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : COMPOSITION GLOBALE DE LA MATIERE GRASSE DU LAIT (EN % DE MATIERE GRASSE) (GRUMMER, 1991 ; MAHIEU, 2001).....	4
FIGURE 2 : STRUCTURE D'UN TRIGLYCERIDE (WATTIAUX ET AL., 2004).	4
FIGURE 3 : EXEMPLE DE SEQUENCE DE SYMBOLES POUR L'ACIDE α -LINOLENIQUE.	6
FIGURE 4 : PRINCIPALES VOIES DE SYNTHÈSE DES ACIDES GRAS TRANS ET DU CLA DU LAIT (CHILLIARD ET AL., 2001).....	10
FIGURE 5 : STRUCTURE D'UNE LIPOPROTEINE (CADUCEE, 2005).....	10
FIGURE 6 : VUE GENERALE DU METABOLISME LIPIDIQUE CHEZ LA VACHE (WATTIAUX ET AL., 2004).....	11
FIGURE 7 : SYNTHÈSE ET SECRETION DES LIPIDES DU LAIT CHEZ LES RUMINANTS (CHILLIARD ET AL., 2001). ...	12
FIGURE 8 : EVOLUTIONS DES VALEURS D'ELEVAGE POUR LE CARACTERE TAUX DE MATIERE GRASSE, SOURCE ELINFO (2005).....	19
FIGURE 9 : ZONE DU MOYEN INFRAROUGE, SOURCE FOSS (2005).	23
FIGURE 10 : SYSTEME SIMPLIFIE D'UN SPECTROMETRE INFRAROUGE, INSPIRE DE SMITH, 1996.....	23
FIGURE 11 : PICS ISOLÉS POUR EFFECTUER L'ANALYSE 'PROC CANDISC'.....	31
FIGURE 12 : (A) NUMERO D'ORDRE INDIQUE SUR LES POTS DE PRELEVEMENTS, (B) TUBE GRADUE FIXE A L'APPAREIL ECHANTILLONNEUR, (C)PRELEVEMENT DE L'ECHANTILLON.	36
FIGURE 13 : MILKOSCAN ^{FM} FT 6000, SOURCE FOSS (2005).	37
FIGURE 14 : DESCRIPTION DES DIFFERENTES ETAPES NECESSAIRES A L'ELABORATION D'UNE DROITE DE CALIBRAGE, INSPIRE DE VAN DE LAER ET AL., 2001.....	39
FIGURE 15 : SPECTRE DANS LE MOYEN INFRAROUGE D'UN ECHANTILLON DE LAIT ENTIER.....	44
FIGURE 16 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA REPRODUCTIBILITE DU SIGNAL INFRAROUGE POUR LES TRENTÉ LAITS ENTIERES STANDARD.	45
FIGURE 17 : ZONES SPECTRALES IMPLIQUEES DANS LA QUANTIFICATION DE LA MG.	46
FIGURE 18 : DIFFERENCES DE PROFIL EN ACIDES GRAS DU LAIT ENTIER STANDARD ET ENRICHI EN ACIDES GRAS OMEGA-3.....	48
FIGURE 19 : TENDANCE DE VARIATION DES R ² DE PREDICTION POUR LES DIFFERENTES DROITES DE CALIBRAGE EN FONCTION DES QUANTITES PREDITES EN ACIDES GRAS (G / DL DE LAIT) DANS LE LAIT OU DANS LA MATIERE GRASSE (% MG).	52

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	: NOMS VERNACULAIRES ET SEQUENCES DE SYMBOLES DES PRINCIPAUX ACIDES GRAS PRESENTS DANS LA MATIERE GRASSE LAITIERE (BASE SUR COLLOMB ET AL., 2000).....	6
TABLEAU 2	: PRINCIPAUX ACIDES GRAS REPRIS DANS LES FAMILLES ω -3 ET ω -6.....	6
TABLEAU 3	: EFFETS AVERES DES PRINCIPAUX ACIDES GRAS SATURES SUR LA SANTE HUMAINE.	13
TABLEAU 4	: EFFETS AVERES DES PRINCIPAUX ACIDES GRAS POLYINSATURES SUR LA SANTE HUMAINE.	14
TABLEAU 5	: EFFETS DE QUELQUES ALIMENTS SUR LE PROFIL EN ACIDES GRAS DU LAIT (BASE SUR CHILLIARD ET AL., 2001).	16
TABLEAU 6	: COMPOSITION MOYENNE EN ACIDES GRAS DANS LA MATIERE GRASSE LAITIERE AU COURS DE L'ANNEE (LOCK ET AL., 2003).	17
TABLEAU 7	: TAUX MOYEN EN MATIERE GRASSE LAITIERE DE QUELQUES RACES BOVINES (GENGLER, 2005A).....	19
TABLEAU 8	: CORRELATIONS GENETIQUES ET PHENOTYPIQUES LIANT LE TAUX ET LA QUANTITE DE MG A LA QUANTITE DE LAIT ET AU TAUX OU A LA QUANTITE DE PROTEINES.	20
TABLEAU 9	: HERITABILITES ESTIMEES POUR LA QUANTITE DE MATIERE GRASSE POUR DIFFERENTES RACES LAITIERES (INTERBULL, 2005).	20
TABLEAU 10	: PROFIL EN ACIDES GRAS DU BEURRE DE REFERENCE COMMUNIQUE PAR LE BIPEA.	34
TABLEAU 11	: LISTE DES FERMES PARTICIPANTES A L'ETUDE.	35
TABLEAU 12	: COEFFICIENTS DE VARIATION EN % DES ACIDES GRAS PRIS INDIVIDUELLEMENT ET DES GROUPES DE SATURES, INSATURES TOTAUX, MONOINSATURES ET POLYINSATURES PRESENTS DANS LE PROFIL EN ACIDES GRAS SELECTIONNE.	48
TABLEAU 13	: VALEURS MOYENNES POUR LES SEPT ANALYSES DE BEURRE BIPEA ET LES VALEURS DE REFERENCE S'Y RAPPORTANT (EXPRIMEES EN G / 100 G DE BEURRE).	49
TABLEAU 14	: PARAMETRES STATISTIQUES CALCULES A PARTIR DES RESULTATS PREDITS PAR LES DIVERSES DROITES DE CALIBRAGE. LES TENEURS EN ACIDES GRAS PREDITES PAR CES DROITES SONT EXPRIMEES EN % DANS LA MG OU EN G / DL DE LAIT.....	51
TABLEAU 15	: COEFFICIENT DE VARIATION (CV) (EN %) ET INTERVALLE DE CONFIANCE (IC) (EN G / 100 G DE BEURRE) ESTIMES A PARTIR DES ANALYSES DU BEURRE DE REFERENCE.	53
TABLEAU 16	: DIFFERENCES INTER-RACES BRUTES DU PROFIL EN ACIDES GRAS POUR LES DIVERSES RACES ETUDIEES PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN (EN G / DL DE LAIT).	55
TABLEAU 17	: DIFFERENCES INTER-RACES STANDARDISEES EXPRIMEES EN UNITES ECART-TYPE DU PROFIL EN ACIDES GRAS DU LAIT (G / DL DE LAIT) POUR LES DIVERSES RACES ETUDIEES PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN... 55	
TABLEAU 18	: TENEUR MOYENNE BRUTE EN MATIERE GRASSE DANS LE LAIT DES RACES ETUDIEES.	55
TABLEAU 19	: PROBABILITES DES TESTS F DE SIGNIFICATION DES DIFFERENCES DANS LE PROFIL EN ACIDES GRAS DU LAIT (G / DL DE LAIT) POUR LES RACES ETUDIEES PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN.....	58
TABLEAU 20	: DIFFERENCES INTER-RACES BRUTES DU PROFIL EN ACIDES GRAS DE LA MATIERE GRASSE LAITIERE POUR LES DIVERSES RACES ETUDIEES PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN (EN % DANS LA MATIERE GRASSE).....	59

TABLEAU 21	: DIFFERENCES INTER-RACES STANDARDISEES EXPRIMEES EN UNITES ECART-TYPE DU PROFIL EN ACIDES GRAS DE LA MATIERE GRASSE LAITIERE (% MG) POUR LES DIVERSES RACES ETUDIEES PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN.....	60
TABLEAU 22	: PROBABILITES DES TESTS F DE SIGNIFICATION DES DIFFERENCES DANS LE PROFIL EN ACIDES GRAS EXPRIME EN % DANS LA MATIERE GRASSE DU LAIT POUR LES RACES ETUDIEES PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN.....	61
TABLEAU 23	: REPETABILITE ANIMALE POUR LE PROFIL EN ACIDES GRAS DU LAIT EXPRIME EN G / DL DE LAIT ET EN % DANS LA MATIERE GRASSE.....	62
TABLEAU 24	: DIFFERENCES INTER-RACES BRUTES POUR L' ACTIVITE ENZYMATIQUE DE LA DELTA-9-DESATURASE.	63
TABLEAU 25	: DIFFERENCES INTER-RACES STANDARDISEES POUR L' ACTIVITE ENZYMATIQUE DE LA DELTA-9-DESATURASE EXPRIMEES EN UNITES ECART-TYPE.	63
TABLEAU 26	: PROBABILITES DES TESTS F DE SIGNIFICATION DES DIFFERENCES D' ACTIVITE ENZYMATIQUE DE LA DELTA-9 DESATURASE PAR RAPPORT A LA HOLSTEIN.....	65
TABLEAU 27	: REPETABILITE ANIMALE POUR L' ACTIVITE ENZYMATIQUE DE LA DELTA-9 DESATURASE.	65
TABLEAU 28	: CORRELATIONS PHENOTYPIQUES ENTRE LES COMPOSES DU PROFIL EN ACIDES GRAS ESTIMEES A PARTIR DES EFFETS INDIVIDUELS STANDARDISES. LES DIFFERENTS ACIDES GRAS SONT EXPRIMES EN G / DL DE LAIT OU EN % DANS LA MATIERE GRASSE LAITIERE.....	66
TABLEAU 29	: CLASSEMENT DES ANIMAUX A PARTIR DE LEURS EFFETS INDIVIDUELS ESTIMES POUR CHAQUE CONSTITUANT DU PROFIL EN ACIDES GRAS DU LAIT (G / DL DE LAIT).....	68
TABLEAU 30	: CLASSEMENT DES ANIMAUX ETUDIES A PARTIR DE LEURS EFFETS INDIVIDUELS ESTIMES POUR CHAQUE CONSTITUANT DU PROFIL EN ACIDES GRAS DE LA MATIERE GRASSE LAITIERE (EN % MG).	70

LISTE DES ABREVIATIONS

AA = Acide Arachidonique
ACC = Acétyl-CoA Carboxylase
ACP = Analyse en Composantes Principales
AG = Acide Gras
AGPI = Acide Gras PolyInsaturés
AGS = Acide Gras Synthétase
AGV = Acide Gras Volatil
AL = Acide Linoléique
ALA = Acide α -Linoléique
AWE = Association Wallonne d'Elevage
B = Blanc bleu mixte
BBM = Blanc Bleu Mixte
BIPEA = Bureau InterProfessionnel d'Etudes Analytiques
BLUE = Best Linear Unbiased Estimation
BLUP = Best Linear Unbiased Prediction
C = Carbone
CLA = Conjugated Linoleic Acid, Acide Linoléique Conjugué
CLDs = Cytoplasmic Lipid Droplets
CPG = Chromatographie en Phase Gazeuse
CRA-W = Centre Wallon de Recherches Agronomiques
CV = Coefficient de Variation
DGTA-1 = acyl-CoA :DiacylGlycerol AcylTransferase 1
DHA = Acide DocoHexaénoïque
DIM = Days In Milk
EPA = Acide EicosaPentaénoïque
FAME = milk Fatty Acid Methyl Esters
FTIR = Fourier Transform InfraRed
GC-MS = Gas Chromatography- Mass Spectrometry
H = Holstein
 h^2 = Héritabilité
Hol = Holstein
I = Inconnu
IC = Intervalle de Confiance
INSAT = INSATurés dans le profil en acides gras

INTERBULL = The **INTER**national **BULL** evaluation service
IUPAC = Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée
J = Jersey
Jers = Jersey
LPL = LipoProtéine Lipase
LP-TG = LipoProtéine riche en TriGlycérides
M = Montbéliarde
Mean = moyenne
MG = Matière Grasse
MLR = Multi Linear Regression
MME = Equation du Modèle Mixte
MONO = MONOinsaturés dans le profil en AG
N = Normandie
PE = feuille de Prise d'Echantillon
Pit-1 = Pituitary-specific transcription factor / growth hormone factor-1
PLS = Partial Least Squares
POLY = POLYinsaturés dans le profil en acides gras
Prot = Protéine
Q = Quantité
QTL = Quantitative Traits Locus
R = Pie-Rouge
RE = Reticulum Endoplasmique
RSQ = r^2 , coefficient de détermination
SAS = Statistical Analysis System
SAT = SATurés dans le profil en AG
SD = Standard Deviation, écart-type
SEC = Erreur Standard de Calibration
SECV = Erreur Standard de Cross-Validation
TFA = Trans Fatty Acid, acide gras trans
1-VR = r^2 obtenu par la cross-validation

CHAPITRE I : INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le lait d'origine bovine est un des produits les plus consommés au monde. Par ce fait, celui-ci montre son intérêt direct pour la nutrition humaine. Malheureusement, cet aliment apporte 25 à 35 % des graisses saturées consommées par l'homme. Cette particularité lui vaut l'aversion de nombreux diététiciens et nutritionnistes. Or, tous les acides gras saturés présents dans le lait n'augmentent pas avec la même intensité le risque de maladies cardiovasculaires. Par exemple, l'acide stéarique ne possède aucun effet athérogène. De même, bien que les acides gras insaturés de type oméga-3 se révèlent bénéfiques sur la santé humaine, les oméga-6 présentent un caractère plus nocif dû à leur omniprésence dans l'alimentation occidentale. De plus, vu la sous-consommation des aliments naturellement enrichis en acides gras intéressants tels que l'huile de colza, les produits animaux deviennent la principale source d'insaturés notamment de type oméga-3.

De nombreux travaux sont menés à l'heure actuelle pour améliorer la qualité nutritionnelle du lait. A cette fin, ces derniers ont presque tous pour philosophie de compléter la ration animale. Cette approche a énormément de mérites, mais elle draine trois grands désavantages. Premièrement, elle fait abstraction du « substrat » animal. Or, depuis longtemps, l'importance de la génétique pour les composantes du lait comme la matière grasse est reconnue. Deuxièmement, elle ne présente pas un aspect durable. Si on cesse de compléter, la qualité différenciée disparaît. Troisièmement, elle présente peu d'intérêt direct pour l'élevage. En effet, cette pratique n'améliore pas la valeur commerciale des animaux laitiers wallons sur le plan international. L'intérêt d'utiliser le paramètre génétique est lié à ces inconvénients. Une sélection animale capable de caractériser et donc de créer une sous-population de bovins laitiers en Wallonie se différenciant au niveau de la qualité nutritionnelle de leur matière grasse laitière et, plus particulièrement, de leur profil en acides gras présenterait comme avantages de renforcer de manière importante la position de la sélection laitière wallonne et de permettre des avancées significatives de la valeur commerciale de ces animaux. De plus, tout effort de sélection amène à un renforcement de la biodiversité car d'autres souches et familles de bovins laitiers pourraient être mises en évidence. Finalement, l'obtention d'un produit différencié offrirait aux éleveurs wallons une plus-value non négligeable leur permettant de rester concurrentiels dans un marché européen en pleine expansion et permettrait également aux industriels, qui se lancent actuellement dans des filières différenciées, de disposer d'un matériel animal mieux adapté à ce type de production et aux exigences du consommateur en terme de santé. Une étude plus approfondie sur le profil en acides gras du lait et sur sa variabilité génétique est donc utile.

Dans ce cadre, l'objectif général du présent travail de fin d'étude est d'étudier la faisabilité d'une telle sélection animale. A cette fin, l'analyse de la variabilité génétique intra- et inter-races du profil en acides gras du lait est étudiée.

Un premier chapitre s'attèle à expliquer l'origine, la composition et la variabilité de la matière grasse laitière ainsi que les modèles statistiques utilisés en génétique quantitative. Une deuxième partie commente la méthodologie adoptée dans ce travail pour satisfaire à l'objectif d'analyse de la variabilité génétique du profil en acides gras du lait. La troisième section reprend et commente les résultats obtenus. Finalement, le dernier chapitre présente les conclusions et donne les perspectives d'avenir pour cette recherche.

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

Ce chapitre, articulé autour de cinq grandes étapes, présente de manière synthétique les connaissances actuelles sur la matière grasse butyrique. Dans le souci d'une démarche logique, le résumé débute par une description générique de la matière grasse du lait, ensuite, les acides gras sont abordés. La troisième étape commente les variations observées dans le taux et la composition en matière grasse du lait. Ensuite, les différentes méthodes d'analyse des acides gras laitiers utilisées dans ce travail sont présentées de manière critique. Finalement, la cinquième partie commente des modèles statistiques utilisés en génétique quantitative.

2. MATIÈRE GRASSE

2.1. *La matière grasse du lait*

D'après le dictionnaire LAROUSSE 2005, le lait est « ...un liquide, généralement blanc, sécrété par les glandes mammaires de la femme et des femelles mammifères... » mais aussi, et surtout « ...un aliment très riche en graisses émulsionnées, en protéines, en lactose, en vitamines, en sels minéraux, ... ».

La matière grasse (**MG**) laitière bovine, dont le taux varie généralement entre 2,5 et 7 %, est émulsionnée dans la phase aqueuse du lait sous forme de globules de diamètre moyen de 2 à 4 μm , composés en leur centre de triglycérides et entourés d'une membrane dérivée des cellules sécrétrices mammaires. Cette enveloppe, assemblage complexe de protéines, de phospholipides, de glycoprotéines, de lipides neutres, d'enzymes et d'autres composés mineurs (60% de lipides et 40% de protéines (DEBRY, 2001)), joue un rôle non seulement d'émulsifiant naturel permettant de stabiliser le globule dans l'émulsion huile-eau mais aussi de protection contre la lipolyse due aux enzymes présentes dans le lait cru (DANTHINE et al., 2000 ; JENSEN, 1995).

La matière grasse est constituée de composés lipidiques reprenant des lipides simples ou homolipides, des lipides composés ou hétérolipides et des composés liposolubles tels que les vitamines (Figure 1). Les lipides neutres ou glycérides sont divisés en mono-, di- ou triacylglycérols (ou triglycérides) se distinguant par le nombre de fonctions alcools estérifiées (1, 2 ou 3). Les mono- et diacylglycérols sont présents à l'état de trace (Figure 1). Les triglycérides, majoritaires (environ 96 %), jouent un rôle essentiellement énergétique (GRUMMER, 1991 ; JENSEN, 1995 ; PAQUOT, 2000). Leur composition dépend à la fois du nombre, de la nature et de la position stéréospécifique qu'occupent les résidus acyles sur le glycérol de base (Figure 2).

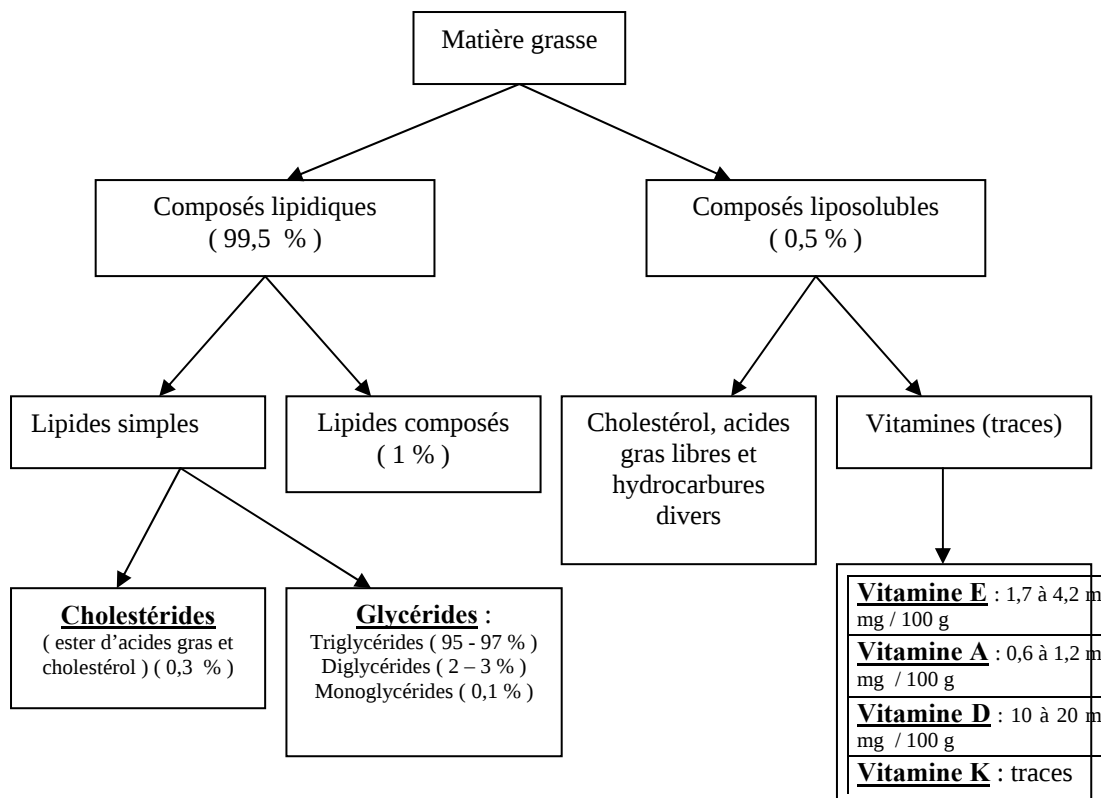


Figure 1 : Composition globale de la matière grasse du lait (en % de matière grasse) (GRUMMER, 1991 ; MAHIEU, 2001).

La structure triglycéridique de toute grasse butyrique est extrêmement complexe compte tenu du nombre d'acides gras qui la constituent (406 recensés actuellement dans les lipides du lait de vache) et influence directement les propriétés physico-chimiques de la matière grasse laitière. La proportion occupée par les triglycérides dans la matière grasse est variable s'expliquant notamment par des différences raciales. En effet, le lait d'animaux Jersey est plus riche en triglycérides que le lait de vaches Holstein (97,3 contre 96,7 %) mais plus pauvre en phospholipides (0,8 contre 1 %) (BITMAN et al., 1996).

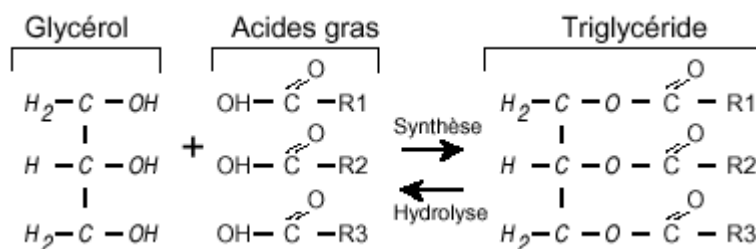


Figure 2 : Structure d'un triglycéride (WATTIAUX et al., 2004).

2.2. La synthèse des globules gras

Les globules gras du lait sont synthétisés initialement sous forme de précurseurs par le reticulum endoplasmique (**RE**) des cellules sécrétrices mammaires. Ceux-ci s'accumulent

entre les bicouches de la membrane du RE avant d'être relâchés dans le cytoplasme sous forme de gouttelettes (BUCHHEIM, 1986 ; MATHER et al., 1998).

Dans le cytoplasme, ces gouttelettes de petites tailles (diam. $< 0,5 \mu\text{m}$), entourées par une couche protectrice et renfermant, en leur centre, un noyau riche en triglycérides, grandissent en diamètre par fusion avec d'autres globules et forment ainsi les gouttelettes cytoplasmiques lipidiques (CLDs) (diam. $> 1 \mu\text{m}$) (MATHER et al., 1998).

Les CLDs migrent alors vers le pôle apical de la cellule où, lors de leur bourgeonnement, ils sont graduellement recouverts par la membrane plasmique (BARGMANN et al., 1959). La sécrétion a lieu quand les membranes présentes de chaque côté du globule fusionnent entre elles. Finalement, la goutte lipidique est expulsée vers le lumen alvéolaire (DANTHINE et al., 2000 ; JENSEN, 1995).

Les petits globules sont les plus nombreux ($< 1\mu\text{m}$) mais représentent moins de 10 % du volume de graisse dans le lait, par opposition aux gouttelettes plus larges comprises entre 1 et $8 \mu\text{m}$, représentant 90 % ou plus (JENSEN, 1995).

3. ACIDES GRAS

3.1. La définition

Les acides gras (AG), unités de base de la MG, sont des acides organiques, possédant un groupement polaire hydrophile situé à l'extrémité d'une chaîne aliphatique hydrophobe, de longueur variable, droite ou ramifiée, saturée ou insaturée (DEBRY, 2001). La chaîne carbonée, renfermant un nombre de carbone (C) ≥ 4 , est terminée par un groupement acide COOH (Figure 2).

La prise alimentaire, la synthèse et la désaturation des AG contribuent à la formation d'un pool disponible pour une estérification, essentiellement, sur une molécule de glycérol pour former des triglycérides (CHILLIARD et al., 2000 ; DEBRY, 2001).

3.2. La nomenclature

Outre la formulation normalisée fixée par l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC), des noms usuels sont utilisés pour les principaux acides gras (Tableau 1).

Cependant, pour leurs isomères existant à l'état naturel, cette nomenclature fait défaut. Des séquences de symboles sont dès lors fréquemment rencontrées dans la littérature (Tableau 1). Il s'agit d'un groupe de chiffres et de lettres reprenant dans l'ordre : le nombre d'atomes de

carbone, le nombre de doubles liaisons, la position et la configuration (*cis* ou *trans*) de ces dernières. Un exemple de séquence pour l'acide α -linolénique est donné à la figure 3.

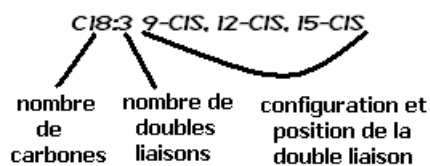


Figure 3 : Exemple de séquence de symboles pour l'acide α -linolénique.

Tableau 1 : Noms vernaculaires et séquences de symboles des principaux acides gras présents dans la matière grasse laitière (basé sur COLLOMB et al., 2000).

Noms vernaculaires	Séquences de symboles
Acide butyrique	C4:0
Acide caproïque	C6:0
Acide caprylique	C8:0
Acide caprique	C10:0
Acide caproléique	C10:1
Acide laurique	C12:0
Acide myristique	C14:0
Acide palmitique	C16:0
Acide stéarique	C18:0
Acide oléique	C18:1 9- <i>cis</i>
Acide <i>trans</i> -vaccénique	C18:1 11- <i>trans</i>
Acide linoléique	C18:2 9- <i>cis</i> , 12- <i>cis</i>
Acide ruménique	C18:2 9- <i>cis</i> , 11- <i>trans</i>
Acide γ -linolénique	C18:3 6- <i>cis</i> , 9- <i>cis</i> , 12- <i>cis</i>
Acide α -linolénique	C18:3 9- <i>cis</i> , 12- <i>cis</i> , 15- <i>cis</i>
Acide arachidonique	C20:4 6- <i>cis</i> , 9- <i>cis</i> , 12- <i>cis</i> , 15- <i>cis</i>
Acide eicosapentaénoïque (EPA)	C20:5 5- <i>cis</i> , 8- <i>cis</i> , 11- <i>cis</i> , 14- <i>cis</i> , 17- <i>cis</i>
Acide docosahexaénoïque (DHA)	C22:6 4- <i>cis</i> , 7- <i>cis</i> , 10- <i>cis</i> , 13- <i>cis</i> , 16- <i>cis</i> , 19- <i>cis</i>

De plus, les différentes familles d'acides gras peuvent également être différenciées par la numérotation ω . Les familles nommées ω -3 et ω -6 comprennent tous les AG possédant une double liaison, respectivement, sur le 3^{ème} et le 6^{ème} carbone à partir du groupement méthyle (Tableau 2) (PAQUOT, 2000). Cette manière de procéder est l'inverse de celle adoptée dans les séquences de symboles qui indiquent la position des doubles liaisons à partir du groupement carboxyle.

Tableau 2 : Principaux acides gras repris dans les familles ω -3 et ω -6.

ω -3	ω -6
Acide α -linolénique (ALA)	Acide linoléique
Acide éicosapentaénoïque (EPA)	Acide arachidonique (AA)
Acide docosahexaénoïque (DHA)	

3.3. Les classes des acides gras

Les acides gras sont regroupés en plusieurs classes : les saturés, monoinsaturés et polyinsaturés suivant qu'ils renferment zéro, une ou plusieurs doubles liaisons dans leur chaîne carbonée. Un lait typique contient environ 70 % de saturés, 25 % de monoinsaturés et 5 % de polyinsaturés (GRUMMER, 1991).

Les saturés dont le taux varie généralement entre 65 et 75 % des lipides du lait, se présentent sous la forme $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{COOH}$ avec un nombre de carbones variant de 4 à 28 (PAQUOT, 2000). Les plus importants sont l'acide palmitique (C16:0, 33 % des acides gras totaux) et l'acide myristique (C14:0, 12 % des acides gras totaux). Le lait possède, en plus, un acide gras typique, l'acide butyrique (C4:0) de concentration assez stable dans le lait (4 à 6 % dans la matière grasse laitière) (CHILLIARD et al., 2001). Les plus nombreux, à l'état naturel, sont à chaîne linéaire et à nombre pair de carbones. Cependant, des acides gras saturés à chaîne ramifiée et à nombre impair d'atomes de carbone se rencontrent également (DEBRY, 2001 ; PAQUOT, 2000). Les acides gras ramifiés (2 à 4 % des AG du lait) caractérisés par la présence d'un groupement méthyle fixé sur l'avant dernier (n-1) ou l'antépénultième (n-2) atome de carbone de la chaîne principale, se retrouvent également dans le lait et sont alors désignés par le préfixe iso (n-1) ou antéiso (n-2). Cette dernière forme se rencontre plus rarement. Le nombre de ramifications peut varier de 1 à 5 et la plupart de ces acides gras possèdent entre 15 et 17 atomes de carbone (DEBRY, 2001 ; PAQUOT, 2000).

Les monoinsaturés ou monoéniques, de longueur de chaîne variable, se présentent sous la forme générale $\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_x - \text{CH} = \text{CH} - (\text{CH}_2)_y - \text{COOH}$. L'acide oléique en est le principal représentant dans le lait (19 à 25 % des acides gras totaux) (DEBRY, 2001 ; PAQUOT, 2000).

A l'opposé des acides gras monoéniques, les polyinsaturés (AGPI) ou polyéniques renferment plusieurs doubles liaisons dans leur structure carbonée. Certains AGPI, comme l'acide linoléique ou linoléique, respectivement, membres des familles ω -3 et ω -6, sont indispensables à notre santé car le métabolisme humain ne peut les synthétiser. A ce titre, ils sont nommés 'acides gras essentiels' et doivent être présents dans l'alimentation alors que les autres membres de ces familles (Tableau 2) peuvent être synthétisés à partir de ces derniers. Malheureusement, le lait n'est pas très riche en acides gras indispensables (3,5 à 5 % d'AGPI dans le lait). L'acide linoléique est le principal acide gras polyinsaturé (1,5 à 2 % des AG totaux), suivi par l'acide α -linoléique (environ 1 % des AG totaux). La multitude de doubles liaisons de ces acides gras accroît la possibilité d'existence d'isomères (DANONE, 1999 ; DEBRY, 2001; PAQUOT, 2000).

Au-delà des classes d'acides gras déjà mentionnées, une biohydrogénation ruminale imparfaite des polyinsaturés donne de fortes teneurs en acides gras *trans* et en acides gras conjugués de l'acide linoléique (CLA) (FUJIMOTO et al., 1993 ; WONSIL et al., 1994).

La concentration moyenne dans le lait en AG *trans* se situe entre 2,5 et 4 % des AG totaux mais ces concentrations varient en fonction de la quantité de polyinsaturés ingérée. L'acide *trans*-vaccénique est le principal acide gras *trans* du C18:1 et représente environ 60 % de l'ensemble des AG *trans* du lait (DEBRY, 2001).

Les CLA sont également des intermédiaires stables de la biohydrogénation ruminale (FUJIMOTO et al., 1993). Présents naturellement, ces derniers, en forte concentration dans la matière grasse laitière, varient entre 2,4 et 18 mg / g de beurre (GRINARI, 1995) et parfois même jusqu'à 28,1 mg / g de beurre (PARODI, 1999). Dans des conditions normales, l'isomère le plus représenté, 80 à 90 % des CLA, est le C18:2 *9-cis,11-trans*, appelé acide ruménique (PARODI, 1977). Cependant, avec 7 combinaisons pour l'isomérisation de position et 4 pour l'isomérisation de configuration, 28 isomères différents peuvent être obtenus même si actuellement seulement 19 ont été recensés dans les tissus ou les sécrétions lactées chez le ruminant (SEHAT et al., 1999).

Ces différentes classes d'AG montrent toute la diversité que peut avoir le profil en MG. Mais d'où proviennent ces AG contenus dans le lait ?

3.4. La production des acides gras

Diverses voies biochimiques conduisent à l'élaboration des acides gras présents dans le lait. Ils sont issus soit de la lypolyse, soit de la biohydrogénation ruminale des acides gras ingérés ou sont d'origine microbienne. Les lipides bactériens proviennent de sources exogènes (par exemple, par la prise d'AG à longue chaîne via l'alimentation) ou endogènes (synthèse *de novo* à partir de sucres précurseurs) (JENKINS, 1993). Tous ces acides gras synthétisés sont ensuite prélevés dans le plasma sanguin par la glande mammaire. De plus, d'autres acides gras sont également synthétisés *de novo* dans la glande mammaire. Cependant, en règle générale, seulement la moitié de la matière grasse laitière produite est dérivée des lipides présents dans le plasma (GRUMMER, 1991) et de cette fraction, 88 % sont d'origine alimentaire et 12 % résultent des contributions endogènes (PALMQUIST, 1978).

Par opposition aux autres espèces animales, les aliments ingérés par les ruminants sont fortement dégradés et modifiés par la flore du rumen (POTTIER et al., 2000). Cette dernière est responsable de l'hydrolyse rapide et presque complète des lipides alimentaires via l'action d'enzymes principalement d'origine bactérienne (JENKINS, 1993). Les protozoaires sont, quant à eux, peu impliqués dans ce phénomène (POTTIER et al., 2000). La liaison ester glycérol-AG ainsi rompue, amène à libérer le glycérol qui en fermentant dans le rumen donne des acides gras volatils (dont les principaux sont l'acétate, le propionate et le butyrate), précurseurs

notamment pour la synthèse des acides gras. A l'opposé, les acides gras libres ne peuvent être oxydés à cause des conditions d'anaérobiose du rumen (SAUVANT et al., 2001). Ils sont alors en partie incorporés dans les lipides des microorganismes mais la majorité d'entre eux s'adsorbe sur les particules alimentaires (POTTIER et al., 2000). Les acides gras insaturés libérés par la lipolyse possèdent une vie relativement courte dans le rumen (JENKINS, 1993 ; POTTIER et al., 2000). En effet, ils y subissent l'action d'isomérases et de réductases produites par les bactéries présentes dans le rumen. Ce phénomène est connu sous le nom de biohydrogénation ruminale. Diverses voies existent suivant l'acide gras concerné. La figure 4 illustre l'exemple de l'acide linoléique (C18:3 9-*cis*,12-*cis*). Celui-ci subit rapidement l'action de la linoleic acid isomerase (EC 5.2.1.5), enzyme issue d'une bactérie ruminale, *Butyrvibrio fibrisolvens* qui le transforme en acide ruménique (C18:2 9-*cis*,11-*trans*) (JENKINS, 1993 ; PARODI, 1999). Toute une série d'hydrogénations a ainsi lieu pour donner des produits acyles plus saturés. L'hydrogénation n'étant jamais complète, des intermédiaires tels que les acides gras *trans* et les CLA sont alors retrouvés dans le chyme (FUJIMOTO et al., 1993 ; WONSIL et al., 1994). L'élongation de la chaîne carbonée pour convertir C16:0 en C18:0 n'est pas possible dans la glande mammaire. Par contre, les cellules des acinis mammaires entièrement différenciées présentent la particularité de renfermer une enzyme fortement active, la delta-9 désaturase (EC 1.14.19.1), qui convertit l'acide stéarique (C18:0) en acide oléique (C18:1 9-*cis*) contribuant ainsi à plus de 50 % de l'acide oléique sécrété dans le lait (CHILLIARD et al., 2001). De plus, l'acide *trans*-vaccénique (C18:1 11-*trans*) d'origine ruminale peut être désaturé par l'action de cette enzyme pour former l'acide ruménique (C18:2 9-*cis*,11-*trans*), principal isomère des CLA dans le lait (DEMEYER et al., 1999). Cette voie de synthèse contribue ainsi pour 64 à 93 % à l'apport d'acide ruménique dans le lait bovin sous différentes conditions d'alimentation (GRINARI et al., 2000). Une activité élevée de désaturation pourrait expliquer que le rapport CLA (produit) / C18:1 *trans* (substrat) dans le lait soit assez peu variable (CHILLIARD et al., 2001).

La biohydrogénation peut également être observée pour des acides gras à longue chaîne (EPA et DHA) mais ceux-ci ne sont généralement pas totalement hydrogénés et de nombreux intermédiaires sont ainsi produits (DEMEYER et al., 1999) .

Tous ces lipides se retrouvent alors dans l'intestin. Ces derniers, très peu hydrophiles, sont alors insérés dans des micelles pour pouvoir pénétrer et traverser la paroi intestinale. La bile sécrétée par le foie, de même que la lipase pancréatique et les ions bicarbonates sont mélangés au contenu intestinal (GRUMMER, 1991). L'enzyme pancréatique hydrolyse alors les lipides restant et la bile émulsionne les acides gras pour faciliter la formation des micelles (POTTIER et al., 2000).

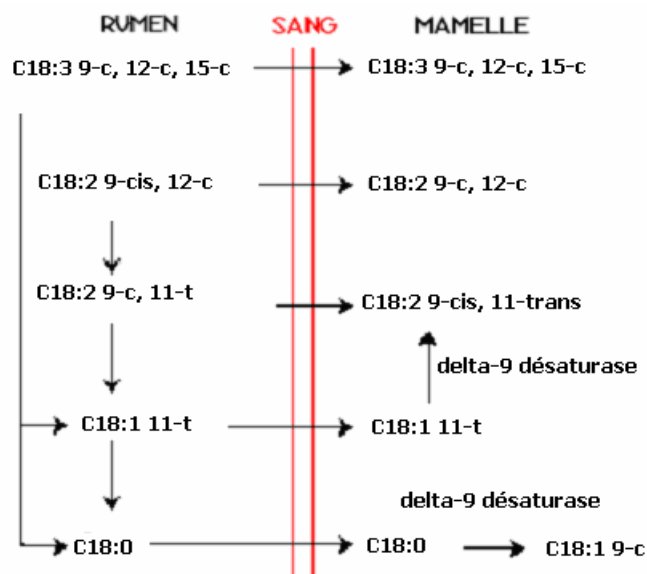


Figure 4 : Principales voies de synthèse des acides gras trans et du CLA du lait (CHILLIARD et al., 2001).

Ensuite, ces structures migrent vers la muqueuse où les acides gras renfermés dans ces dernières diffusent passivement dans les entérocytes (POTTIER et al., 2000). Ces AG sont alors majoritairement unis au glycérol provenant du sang pour former des triglycérides. Ces derniers mais également certains acides gras libres, du cholestérol et d'autres substances lipidiques sont ensuite recouverts d'une protéine, appelée apoprotéine, pour former les lipoprotéines riches en triglycérides (**LP-TG**), aussi appelées chylomicrons ou lipoprotéines de très faible densité (Figure 5) (GRUMMER, 1991).

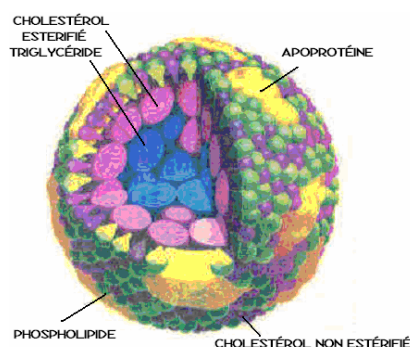


Figure 5 : Structure d'une lipoprotéine (CADUCEE, 2005).

Ces LP-TG sont absorbées et se retrouvent dans les vaisseaux lymphatiques. Arrivées à la jonction thoracique, point de rencontre entre le système lymphatique et sanguin, elles rejoignent la circulation sanguine (Figure 6). Elles se déplacent alors jusqu'à la glande mammaire via la circulation sanguine où, finalement, les acides gras sont prélevés par les cellules lactogènes. Cependant, l'aptitude du tissu mammaire à utiliser les AG contenus dans

les triglycérides présents dans la lipoprotéine est régulée par l'activité d'une enzyme, la lipoprotéine lipase (**LPL**) (EC 3.1.1.34) (CHILLIARD et al., 2000).

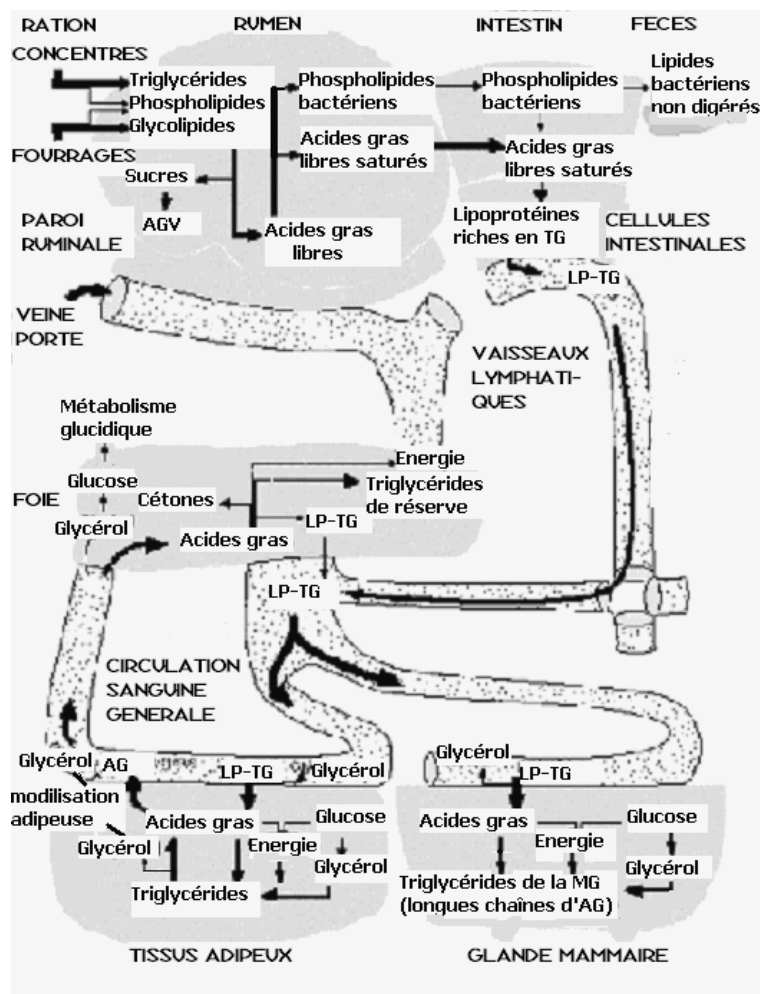


Figure 6 : Vue générale du métabolisme lipidique chez la vache (WATTIAUX et al., 2004).

Comme annoncé au début de ce paragraphe, une autre origine possible pour les acides gras laitiers est la synthèse *de novo* dans la glande mammaire à partir de l'acétate et du β -hydroxybutyrate, précurseurs des acides gras à courte et moyenne chaîne (CHILLIARD et al., 2001). Deux enzymes clefs ressortent de ce processus *de novo* : l'acétyl-CoA carboxylase (**ACC**) (EC 6.4.1.2) et l'acide gras synthétase (**AGS**) (EC 2.3.1.85). La formation du malonyl-CoA à partir de l'acétate est catalysée par ACC. La deuxième, AGS, assure la condensation du malonyl-CoA avec l'acétyl-CoA, ou le butyryl-CoA, produits respectivement à partir du métabolisme de l'acétate et du β -hydroxybutyrate. La condensation des unités à 2 carbones par cette enzyme permet l'obtention de chaînes à 14 et surtout 16 C qui sont libérées du complexe enzymatique par l'action de l'enzyme thioestérase I (EC 3.1.2.14). L'AGS des ruminants possède la particularité de pouvoir interrompre ce processus précocement afin de libérer des chaînes acyles de 4 à 12 carbones. La régulation de la longueur des chaînes par

différents facteurs cellulaires et moléculaires est encore inconnue (CHILLIARD et al., 2001). La figure 7 schématise tout ce procédé.

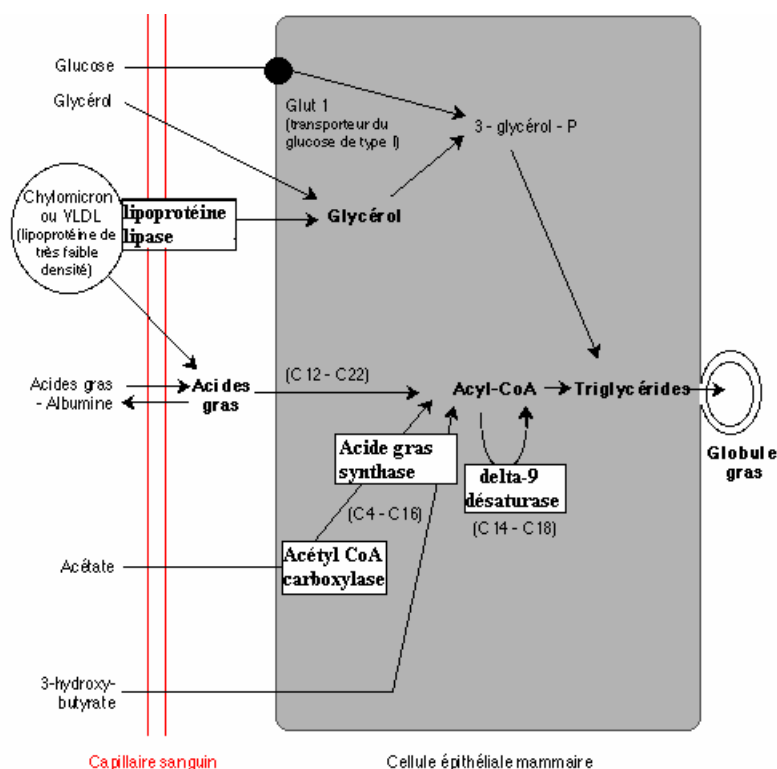


Figure 7 : Synthèse et sécrétion des lipides du lait chez les ruminants (CHILLIARD et al., 2001).

3.5. L'impact des principaux acides gras sur la santé humaine

Ce paragraphe va tenter de résumer les effets positifs et négatifs reconnus pour les principaux acides gras du lait. En effet, chaque acide gras qu'il soit saturé ou insaturé possède des spécificités propres du point de vue de la santé humaine.

3.5.1. Les acides gras saturés

Les saturés, 65 à 75 % des lipides du lait (DEBRY, 2001), sont souvent réputés comme les plus néfastes pour la santé humaine. Or, tous ne le sont pas même si la majorité d'entre eux affecte la concentration du cholestérol dans le sang (DEAVILLE et al., 2004). Le tableau 3 relate l'état des connaissances actuelles sur l'impact santé des acides gras saturés.

Remarque : Le rapport C18:1 9-*cis* / C18:0 est intéressant à augmenter car il intervient dans la dureté des beurres, améliore leur qualité nutritionnelle et limite le risque athérogène chez l'homme. Ce rapport est lié aux disponibilités sélectives de ces deux acides gras, à l'activité

de la désaturase mammaire et aux facteurs qui modulent cette activité (disponibilité en acides gras polyinsaturés, notamment) (CHILLIARD et al., 2001).

Tableau 3 : Effets avérés des principaux acides gras saturés sur la santé humaine.

Effets		C4:0	C12:0	C14:0	C16:0	C18:0
Positifs	anti-cancérigène	X **				
	cancer du sein et du colon	X **				
	anti-athérogène ¹	X ***				X ^Δ
	Action bactéricide sur la <i>Listeria monocytogenes</i>		X ^Φ			
Négatif	athérogène (↑ cholestérol)		X ^{Δ,ο}	X ^{Δ,ο}	X ^{Δ,ο}	

¹ Le terme athérogène désigne des substances favorisant l'obstruction des artères.

ο (BONANOME et al., 1988) ; *** (CHILLIARD et al., 2000) ; ^Δ (HU et al., 1999 ; GRUMMER, 1991) ;

** (PARODI, 1999) ; ^Φ (PETRONE et al., 1998).

3.5.2. Les acides gras monoinsaturés

Les monoinsaturés semblent avoir un effet hypocholestérolémiant (NOAKES et al., 1996) mais de moindre importance que celui observé avec les polyinsaturés (WILLIAMS, 2000). L'acide oléique est dépeint comme un acide gras possédant des propriétés hypocholestérolémiantes mais également, des effets anti-cancérigènes (CHILLIARD et al., 2000).

3.5.3. Les acides gras polyinsaturés

Les effets des polyinsaturés, et plus particulièrement, ceux des familles ω-3 et ω-6 font l'objet de nombreuses études. Comme précisé précédemment, la famille ω-3 concerne, en outre, l'acide α-linolénique (ALA), eicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA). De même, les ω-6 comprennent l'acide linoléique (AL) et arachidonique (AA). Le tableau 4 renseigne les effets de ces deux familles sur la santé et présente leur action opposée.

Outre le fait de les étudier un à un, un paramètre plus intéressant à considérer pour ces polyinsaturés est d'estimer le rapport ω-6 / ω-3. Comme montré dans le tableau 4, chaque famille d'AGPI produit des effets spécifiques sur le métabolisme. En effet, les eicosanoides issus de l'acide arachidonique, biologiquement actifs à faibles concentrations, se montrent néfastes en forte proportion contribuant alors à la formation d'athéromes, provoquant des désordres allergiques et inflammatoires, et jouant également un rôle dans la prolifération cellulaire. Un effet inverse est alloué aux eicosanoides dérivant de l'EPA.

Tous les spécialistes s'accordent à dire qu'un ratio ω-6 / ω-3 égal à 1 est la situation idéale pour assurer un développement optimal de l'être humain (SIMOPOULOS, 2003). Cependant, notre alimentation occidentale particulièrement riche en ω-6 (ratio ω-6 / ω-3 estimé à 15 – 20 / 1) amène plus de produits dérivant de l'AA que de l'EPA. La compétition entre l'acide linoléique et linolénique pour les voies de désaturation et d'élongation de chaîne et l'absence

de l'enzyme de conversion, oméga-3 désaturase, dans les cellules mammaires montre la complexité à maintenir un ratio convenable.

Tableau 4 : Effets avérés des principaux acides gras polyinsaturés sur la santé humaine.

Famille	AG	Effets	Impacts sur la santé
ω-6	AA	Négatifs	substrat pour la plupart des médiateurs eicosanoïdes ⁽¹⁾ produits par les cellules mammaires ** ; réactions allergiques et inflammatoires ** ; prolifération cellulaire**.
	AL	Négatif	induction de tumeurs mammaires chez les rongeurs ° ;
		Positifs	effet dans la diminution du taux de cholestérol ^Δ ; amélioration de la sensibilité à l'insuline et réduction de l'incidence du diabète de type 2 ^Δ ; action bactéricide sur <i>Listeria monocytogenes</i> ^Φ .
ω-3	ALA	Positifs	anti-cancérigène (sein, colon et prostate [§]) et anti-athérogène *** ; diminution de l'agrégation plaquettaire ^Δ ; réduction de la formation du thromboxane A2 par inhibition de la conversion de l'acide linoléique en acide arachidonique ^Δ ; réduction de l'arythmie cardiaque chez les rats ^Δ ; diminution du risque de maladie cardiovasculaire ^Δ ; action bactéricide sur <i>Listeria monocytogenes</i> ^Φ ; arthrite rhumatoïde [§] ; assure un bon développement du cerveau et de la rétine chez l'enfant [§] .
	EPA	Positifs	production des eicosanoïdes ^Δ ; anti-athérogène ^θ .
	DHA	Positifs	production des eicosanoïdes ^Δ ; anti-athérogène ^θ ; développement et fonctionnement optimal du système nerveux **.

¹ Sont repris sous le terme eicosanoïdes, les prostaglandines, la prostacycline, les thromboxanes, les leucotriènes et les lipoxines. Toutes ces substances sont impliquées dans les réactions inflammatoires.

*** (CHILLIARD et al., 2000) ; [§] (CONNOR, 2000) ; ** (DANONE, 1999) ; ^Δ (HU et al., 2001) ; ° (PARODI, 1999) ;

^Φ (PETRONE et al., 1998) ; ^θ (ZAMPELAS et al., 2003).

YEHUDA [2003] a également montré que les polyinsaturés jouaient un rôle au niveau cérébral et, plus particulièrement, sur le système nerveux central. De plus, des études sur d'autres implications des ω-3 sont en cours notamment sur leurs effets potentiellement antidépresseurs.

3.5.4. Les intermédiaires de la biohydrogénation

3.5.4.1. Les acides gras *trans* (TFA)

L'impact négatif des acides gras *trans* sur la santé humaine et, plus spécifiquement, sur les maladies cardiovasculaires a été établi. En effet, une relation négative existe entre le risque de maladies cardiaques et les TFA ingérés d'origine animale (WILLIAMS, 2000). *In fine*, il

apparaît que ces AG *trans* sont légèrement plus hypercholestérolémiants que les acides gras saturés. Cependant, il faut relativiser car la consommation en C18:1 *trans* issus du lait, et cela en reprenant la moyenne dans le Bénélux, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni, est de 1,3 g / personne / jour soit 20 fois moins que la consommation en saturés (POTTIER et al., 2000).

Concernant leurs effets potentiels sur les cancers, peu d'études ont été menées chez l'homme et aucune n'a établi de lien. Cependant, deux études sur animaux ont prouvé une relation positive entre les TFA et le cancer du sein (POTTIER et al., 2000).

3.5.4.2. Les acides gras conjugués de l'acide linoléique (CLA)

Comme déjà stipulé, les CLA, intermédiaires stables de la biohydrogénation ruminale sont un mélange complexe d'isomères géométriques et de position. Cette particularité explique les divergences d'opinions quant aux effets potentiellement positifs et négatifs des CLA relatés par divers auteurs. En effet, l'effet anti-athérogène montré par NICOLosi et al. [1997] n'a pu être démontré par MUNDAY et al. [1999]. Cette contradiction s'explique probablement par un cocktail d'isomères en CLA ingéré par les animaux différents entre ces deux expériences.

L'isomère C18:2 *9-cis,11-trans* est surtout reconnu pour ses propriétés anti-cancérogènes démontrées sur des modèles animaux (PARODI, 1999). En inhibant la croissance de la lignée cellulaire cancéreuse responsable du développement de tumeurs, cet isomère offre des perspectives intéressantes pour le futur dans la prévention par l'alimentation des cancers et notamment ceux du sein (PARODI, 1999).

A côté de l'acide ruménique, un autre isomère retient l'attention, le C18:2 *10-trans,12-cis*, pour ses effets observés notamment sur le bilan lipidique et l'inhibition de la lipogenèse (CHILLIARD et al., 2001 ; PARIZA et al., 2001).

En conclusion, les effets observés pour les différents isomères sont variés et peuvent se synthétiser comme suit: un effet anti-obésité (PARK et al., 1997), suppression de la carcinogenèse (BELURY, 1995 ; IP et al., 1994), un effet immunomodulateur en augmentant les IgA, IgG et IgM et en diminuant les IgE (COOK et al., 1993 ; DEBRY, 2001), un effet anti-athérogène en diminuant la formation des stries lipidiques (NICOLosi et al., 1997 ; DEBRY, 2001) et un effet sur le diabète (HOUSEKNECHT et al., 1998).

4. FACTEURS INTRINSÈQUES ET EXTRINSÈQUES DE VARIATION DE LA MATIÈRE GRASSE LAITIÈRE

Selon GRUMMER [1991], le lait idéal d'un point de vue nutritionnel devrait être composé de 82 % de monoinsaturés, 10 % de polyinsaturés et 8 % de saturés. Bien que cette composition en acides gras dans le lait soit utopique, elle peut être approchée en utilisant les facteurs de variation connus pour la matière grasse. Au-delà de ceux d'origine extrinsèque, et même si le lait de consommation est issu d'un mélange obtenu de la traite de plusieurs animaux (cette

pratique tendant à réduire fortement l'importance des variations individuelles), des fluctuations notables émanant de paramètres d'ordre génétique (race), physiologique (nombre de vêlages, époque de lactation, moment de la traite) et zootechnique (mode de traite, fourrage) subsistent (FAO, 1995). Afin de cerner au mieux les différences issues du seul paramètre génétique, il est important de connaître les facteurs susceptibles de faire varier le profil en matière grasse du lait. Ce paragraphe tente donc d'énumérer différentes sources de variation et d'expliquer plus en détail la variabilité génétique.

4.1. Les facteurs extrinsèques

4.1.1. L'alimentation

L'alimentation est un des facteurs les plus utilisés actuellement pour faire varier le profil en acides gras de la matière grasse laitière. Une multitude de recherche montrent les effets bénéfiques de la supplémentation des rations animales. Par exemple, les graines de lin augmentent le taux en acide α -linoléique (DEAVILLE et al., 2004), les graines de colza entières élèvent le taux en acide oléique (GIVENS et al., 2004),... Le tableau 5 reflète différentes possibilités alimentaires étudiées pour faire varier les composantes de la matière grasse laitière.

Tableau 5 : Effets de quelques aliments sur le profil en acides gras du lait (basé sur CHILLIARD et al., 2001).

<i>Aliments</i>	<i>Effets</i>
Herbe verte pâturée	↑ l'acide linoléique ↓ l'acide palmitique et myristique
Graine de soja	↑ l'acide linoléique et stéarique
Suif, oléamide, huile ou graine végétale riches en acide oléique (tournesol, colza)	↑ l'acide stéarique et oléique
Graine de coton protégée	↓ le rapport C18 :1/C18 :0
Graine de lin	↑ l'acide linoléique et stéarique
Huile marine	↑ EPA et DHA
Régime pauvre en fibres et riche en céréales, huile végétale insaturée et non protégée	↑ les acides gras <i>trans</i>
Huile de soja et de lin	↑ les acides gras <i>trans</i>
Un manque de foin ou de fourrages grossiers	↓ la teneur en MG
Supplément lipidique riche en acides gras moyens	↑ de ces AG moyens
Huile de poisson	↓ AG à courte chaîne

4.1.2. Les maladies

Une étude sur les effets des mammites a montré que celles-ci provoquaient une diminution du taux en matière grasse (STOKES et al., 2000). Aucune autre étude s'intéressant aux impacts d'autres maladies sur le taux en matière grasse ou le profil en acides gras n'a été trouvée.

4.1.3. Les variations annuelles et l'effet des saisons

L'effet des saisons s'explique par le changement d'alimentation (plus d'herbe) et des conditions climatiques. En effet, la teneur en matière grasse est plus importante pendant l'automne et l'hiver et plus faible pendant le printemps et l'été (LOCK et al., 2003). L'abaissement du taux en MG peut s'expliquer par l'augmentation de la disponibilité en acides gras à 18 atomes de carbones dû à l'ingestion d'herbe. En effet, celle-ci provoque une diminution de la sécrétion et des teneurs en acides gras à chaîne moyenne (de C8:0 à C14:0 ou C16:0) (CHILLIARD et al., 2001).

Tableau 6 : Composition moyenne en acides gras dans la matière grasse laitière au cours de l'année (LOCK et al., 2003).

MG	Rendement/composition											SD
	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	
g / kg	29	35	33	42	37	39	36	34	41	35	33	2.5
g /jour	925	993	721	1133	1016	984	909	950	1147	1030	1052	99.0
Acide gras	FAME											SD
	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	
4:0	2.4	2.3	2.0	3.1	2.6	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.2	0.14
6:0	2.9	2.5	2.6	2.1	2.6	3.0	2.8	2.7	2.6	2.6	2.7	0.12
8:0	2.0	1.7	1.8	1.3	1.6	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	0.09
10:0	4.0	3.6	3.8	2.5	3.6	4.0	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	0.17
12:0	4.6	4.2	4.4	2.7	3.8	4.8	4.5	4.5	4.6	4.5	4.4	0.20
14:0	11.2	10.0	11.2	9.0	10.7	11.3	10.9	11.3	10.8	11.0	10.7	0.41
14:1	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.01
15:0	1.8	1.9	1.8	1.1	1.5	2.2	1.8	1.9	1.8	1.8	1.9	0.09
16:0	20.2	18.4	18.9	21.1	19.9	15.5	17.9	17.7	17.4	18.8	19.8	0.59
16:1	1.4	1.4	1.4	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.01
17:0	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.01
18:0	15.0	17.6	15.7	15.5	13.9	14.8	14.4	14.6	16.6	17.7	16.8	0.41
18:1 trans	3.0	3.3	3.1	4.5	4.0	2.6	3.5	3.6	3.2	2.8	3.0	0.15
18:1 9-c	21.4	25.9	23.6	24.5	22.8	23.1	23.4	23.4	24.7	23.9	23.5	0.90
18:2 9-c,12-c	3.3	3.0	3.3	2.2	2.8	3.8	3.6	3.6	3.1	2.8	3.1	0.15
18:3 9-c,12-c,15-c	1.1	0.9	1.1	0.8	1.0	1.0	1.1	1.2	0.9	0.9	1.0	0.04
18:2 9-c,11-t	0.9	0.7	0.9	1.4	1.7	1.4	0.9	1.0	0.6	0.6	0.6	0.09
18:2 10-t, 12-c	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.01
20:0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	2.2	0.01
Indéfini	3.4	1.2	2.8	5.4	4.8	5.1	4.2	3.8	2.7	1.7	1.5	0.51
Total SAT	64.7	62.8	63.06	58.8	60.6	60.7	61.0	61.1	62.5	65.1	64.9	0.89
Total INSAT	32.0	36.0	34.2	35.9	34.6	34.3	34.8	35.0	34.8	33.2	33.6	0.84
Total MONO	26.4	31.2	28.7	31.2	29.0	27.9	29.0	29.1	30.0	28.8	28.6	0.91
Total POLY	5.6	4.8	5.5	4.6	5.6	6.4	5.9	6.0	4.9	4.5	5.0	0.24
Total ≤ C14:0	27.0	24.1	25.8	20.7	24.6	27.6	26.1	26.3	25.8	25.9	25.7	0.87
Ratio												
14:1 / 14:0	0.058	0.059	0.057	0.079	0.073	0.064	0.059	0.056	0.057	0.058	0.059	0.0044
16:1 / 16:0	0.071	0.077	0.076	0.073	0.078	0.101	0.081	0.081	0.082	0.076	0.072	0.0032
18:1 9-cis / 18:0	1.43	1.48	1.51	1.62	1.66	1.59	1.63	1.61	1.49	1.35	1.41	0.0716
CLA / trans 18:1	0.293	0.217	0.293	0.319	0.424	0.606	0.26	0.28	0.187	0.2	0.211	0.0408

SD = standard deviation, écart-type; FAME = Milk Fatty Acid Methyl Esters; SAT = saturés; INSAT = insaturés; MONO = monoinsaturés; POLY = polyinsaturés.

Des variations importantes du profil en acides gras au cours de l'année ont ainsi été recensées (Tableau 6). Les concentrations en saturés et en acides gras à courte chaîne (< C14) sont

généralement plus élevées en hiver. Pendant l'été, les concentrations en C14:0 et C12:0 sont plus basses à cause des changements dans la synthèse *de novo* des acides gras par la glande mammaire. De même, C16:0 chute également mais pas les mêmes mois que les deux autres. Ce paramètre est évidemment très intéressant du point de vue de la santé mais, malheureusement, les facteurs affectant la synthèse *de novo* des AG ne sont pas encore bien connus (LOCK et al., 2003).

4.2. Les facteurs intrinsèques

4.2.1. Le stade de lactation

La concentration en matière grasse du lait est plus élevée au début et à la fin de la lactation et plus faible pendant le pic de production (STOKES, 2000). Ceci peut s'expliquer par un effet de dilution. En effet, quand la production laitière est à son maximum la teneur en matière grasse est à son minimum (LOCK et al., 2003).

En début de lactation, le bilan négatif amène une hausse en acide stéarique et oléique (CHILLIARD et al., 2003). Simultanément, la prise d'acides gras à longue chaîne issus de la lipomobilisation induit une inhibition de la synthèse *de novo* des AG à courte chaîne par le tissu mammaire (PALMQUIST et al., 1993).

La proportion d'acides gras à courte chaîne, excepté pour l'acide butyrique, est faible en début de lactation et augmente pour atteindre plus de 90 % des proportions maximales vers la 8^{ème} semaine de lactation. Cette augmentation s'explique par le relâchement de l'inhibition due à la mobilisation adipocytaire. De plus, cette synthèse d'acides gras à courte chaîne est inhibée à différents degrés. Une augmentation de l'inhibition de C6:0 à C12:0 a été constatée, ceci s'expliquant par un nombre d'unités de base plus conséquent à additionner, fonction de l'activité de l'enzyme ACC. Par conséquent, le C4:0 n'est pas inhibé car il provient de deux voies indépendantes de cette enzyme. Premièrement, la moitié de l'acide butyrique provient directement des unités préformées à 4 carbones, à savoir l'acide β -hydroxybutyrate. Deuxièmement, l'acide butyrique est aussi formé à partir de la voie indépendante du malonyl-CoA par condensation des unités acétyles (Figure 7). Le C6:0 ne requérant qu'une unité acétyle fixée au malonyl-CoA est moins influencé que les chaînes plus longues en atomes de carbone demandant l'addition d'unités acétyles supplémentaires (PALMQUIST et al., 1993).

4.2.2. L'âge de l'animal

Le taux en matière grasse reste plus ou moins constant (STOKES et al., 2000). Malheureusement, aucune autre étude montrant les variations du taux en matière grasse ou du profil en acides gras en fonction de l'âge de l'animal n'a été trouvée.

4.3. La variabilité génétique

4.3.1. La matière grasse laitière

Le taux en matière grasse (en %) varie entre races (Tableau 7) mais également au sein d'une même race. C'est cette particularité qui est utilisée en sélection animale pour faire varier la teneur en MG.

Tableau 7 : Taux moyen en matière grasse laitière de quelques races bovines (GENGLER, 2005a).

Race	MG (%)	Race	MG (%)
Abondance	3,5 à 4,0	Jersey	5,0 à 6,0
Ayrshire	3,8 à 4,8	Montbéliarde	3,5 à 4,0
Blanc Bleu Mixte	3,0 à 3,6	Normande	4,0 à 5,0
Guernsey	4,5 à 5,5	Pie-Rouge	3,8 à 4,8
Holstein	3,5 à 4,5	Simmental	3,5 à 4,5

En effet, pour les animaux nés entre 1992 et 2002, la tendance génétique en Wallonie pour le caractère taux de matière grasse, et ceci pour diverses races, est globalement à la baisse (Figure 8) suggérant une forte sélection animale axée sur la diminution de la teneur globale en MG du lait.

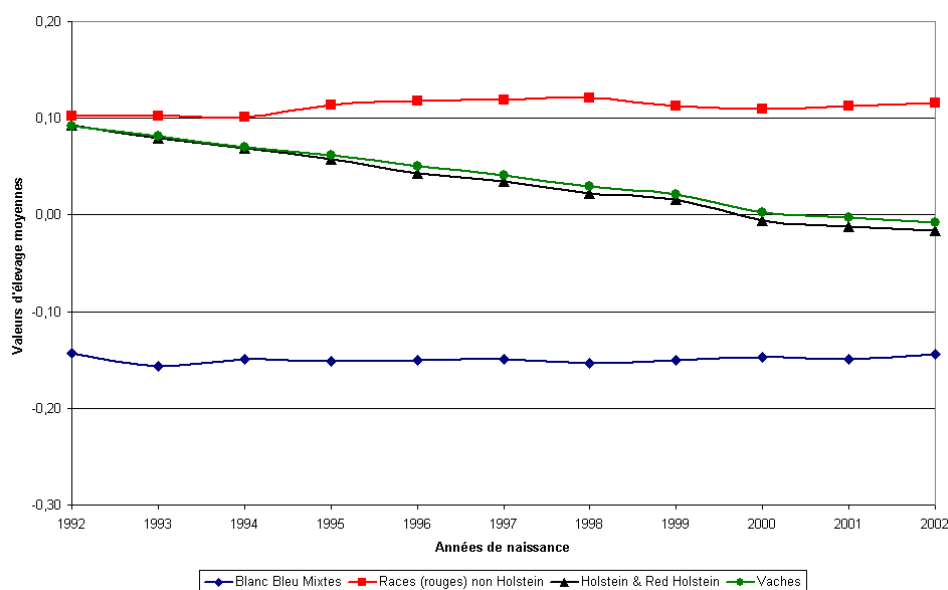


Figure 8 : Evolutions des valeurs d'élevage pour le caractère taux de matière grasse, source ELINFO (2005).

Le taux comme la quantité (en kg) en matière grasse sont corrélés avec la quantité de lait mais également avec le taux ou la quantité de protéines. Le tableau 8 montre les différentes corrélations génétiques et phénotypiques pour ces divers caractères. D'une manière générale, le taux en matière grasse est corrélé négativement à la quantité de lait. De même, celui-ci est également liée positivement avec le taux de protéines. Les corrélations phénotypiques notées dans ce tableau donnent des conclusions similaires. Les variations dans les données émanent

de la méthode utilisée par les divers auteurs pour calculer ces paramètres et de l'environnement.

L'héritabilité (fraction de la variabilité phénotypique totale d'une population due aux effets additifs des gènes) pour le caractère quantité de MG, reprise par The International Bull Evaluation Service (**INTERBULL**) [2005], pour les animaux wallons de type Holstein est évaluée à 0,43.

Tableau 8 : Corrélations génétiques et phénotypiques liant le taux et la quantité de MG à la quantité de lait et au taux ou à la quantité de protéines.

		Jers ¹	Hol ²	Hol ³	Hol ⁴	Hol ⁵	Hol ⁶	Hol ⁷	Hol ⁸
Corrélation génétique	Lait (Q):MG (Q)	0,75	0,48	0,71	0,45	0,57	0,57	0,76	0,58
	Lait (Q) :MG(%)	- 0,21	-	- 0,40	- 0,49	- 0,43	- 0,28	-0,39	- 0,52
	MG(Q) : Prot(Q)	0,89	0,58	0,79	0,62	0,66	0,73	0,71	0,72
	MG(%) :Prot(Q)	0,19	-	- 0,21	- 0,13	- 0,16	0,08	- 0,33	- 0,22
	MG(Q) :Prot(%)	- 0,18	-	- 0,04	0,11	- 0,14	0,34	- 0,15	0,06
	MG(%) :Prot(%)	0,63	-	0,59	0,62	0,56	0,59	0,30	0,66
	MG(%) :MG(Q)	0,49	-	0,35	0,56	0,48	0,63	0,30	0,39
Corrélation phénotypique	Lait (Q):MG (Q)	0,86	-	0,81	0,73	0,74	0,80	0,90	0,80
	Lait (Q) :MG(%)	- 0,20	-	- 0,34	- 0,31	- 0,33	- 0,35	- 0,19	- 0,39
	MG(Q) : Prot(Q)	0,89	-	- 0,06	0,81	0,80	0,85	0,91	0,85
	MG(%) :Prot(Q)	- 0,03	-	- 0,20	- 0,09	- 0,11	- 0,13	- 0,07	- 0,19
	MG(Q) :Prot(%)	0,28	-	0,27	0,01	- 0,05	- 0,01	0,03	- 0,06
	MG(%) :Prot(%)	0,02	-	- 0,06	0,56	0,55	0,57	0,44	0,58
	MG(%) :MG(Q)	0,46	-	0,51	0,38	0,29	0,28	0,21	0,24

¹ ROMAN et al., 2000; ² TSURUTA et al., 2004; ³ WELPER et al., 1992; ⁴ CHAUHAN et al., 1991; ⁵ DEJAGER et al., 1987; ⁶ MEINERT et al., 1989; ⁷ MEYER, 1985; ⁸ VAN DEN WERF et al., 1989; **Hol** = Holstein; **Jers** = Jersey; **MG** = Matière Grasse ; **Prot** = Protéine ; **Q** = quantité.

Des pays comme le Canada, les Etats-Unis, l'Italie,... ont estimé l'héritabilité de la quantité de matière grasse pour différentes races (Tableau 9). Les différences de valeur obtenues par ces pays émanent des diverses méthodes de calcul employées, de leur environnement distinct,... Cependant, des héritabilités différentes entre races ont quant même été trouvées même si, globalement, ces dernières sont assez proches.

Tableau 9 : Héritabilités estimées pour la quantité de matière grasse pour différentes races laitières (INTERBULL, 2005).

Race/Pays	Allemagne	Canada	Belgique	Italie	Slovénie	Etats-Unis
Ayrshire	0,48	0,34	-	-	-	0,30
Brown Swiss	0,41	0,36	-	0,23	0,27	0,35
Guernesey	-	0,35	-	-	-	0,30
Holstein	0,48	0,34	0,43	0,29	0,26	0,30
Jersey	0,48	0,39	-	0,30	-	0,35
Simmental	0,38	-	-	0,31	0,30	-

4.3.2. Le profil en acides gras de la matière grasse laitière

Comme pour le taux en matière grasse, le stade de lactation, la saison, le troupeau sont les sources majeures de variation de la composition en acides gras (PALMQUIST et al., 1993). De même, un lien existe entre le taux en MG et le profil en AG. En effet, les corrélations génétiques avec le taux en MG sont positives pour la proportion d'acides gras à courtes chaînes (C6 → C14) et négatives pour les acides gras à longues chaînes. Les corrélations entre les AG à courte chaîne et les C18 insaturés sont dans tous les cas négatives (PALMQUIST et al., 1993). KARIJORD et al. [1982] concluent aussi en disant que la composition en acides gras peut varier via la sélection. Ils précisent également qu'une sélection visant à augmenter le pourcentage en matière grasse, élève aussi la proportion d'AG à courte chaîne et diminue les C18. Dans le même ordre d'idée, PALMQUIST et al. [1992] ont trouvé que le pourcentage en acides gras de 6 à 14 carbones était de 8 à 42 % supérieur chez les animaux de race Jersey par rapport à ceux mesurés chez la race Holstein et que cette différence était indépendante de la ration. De plus, l'acide stéarique et oléique sont, respectivement, 13 % plus important et 15 % plus faible chez les animaux de race Jersey par rapport aux Holsteins.

Ces variabilités dans le profil en acides gras dans la matière grasse laitière peuvent s'expliquer, partiellement, par des variations de l'activité enzymatique (LPL, ACC, delta-9 désaturase, AGS).

La glande mammaire des ruminants possède une activité delta-9 désaturase (EC 1.14.19.1) provoquant l'addition d'une double liaison *cis* entre le carbone 9 et 10. Cette activité peut être mesurée par le ratio produit / substrat de certains acides gras : C14:1 *9-cis* / C14:0, C16:1 *9-cis* / C16:0, C18:1 *9-cis* / C18:0 et C18:2 *9-cis,11-trans* / C18:1 *11-trans*. Le meilleur indicateur est le ratio C14:1 *9-cis* / C14:0 car tous les C14:0 sont synthétisés *de novo* dans la glande mammaire (CORL et al., 2000). En conclusion, la désaturation est la seule source de C14:1 *9-cis*. L'augmentation de la valeur du ratio démontre une activité accrue de la delta-9 désaturase. Comme montré dans le tableau 6, l'activité de cette enzyme varie significativement au cours de l'année. LOCK et al. [2003] indiquent également que des variations individuelles pour cette activité enzymatique ont été constatées mais les données n'ont, malheureusement, pas été indiquées dans l'article.

L'AGS (EC 2.3.1.85), une autre enzyme impliquée dans la lipogenèse, catalyse la conversion de l'acétyl-CoA et du malonyl-CoA en différents acides gras et est capable de produire des AG à courte chaîne grâce à son action acyltransférase. Des composés encore inconnus contenus dans les herbes ou des changements métaboliques suite à son ingestion pourraient être à l'origine des variations observées en privilégiant la production d'AG à courte chaîne aux dépens de ceux à chaîne moyenne (LOCK et al., 2003). HILLGARTNER et al. [1995] ont rapporté que l'activité de cette enzyme était sensible aux manipulations hormonales et

nutritionnelles. De même, l'insuline apparaît également être importante pour la régulation de l'activité de cette enzyme (YIN et al., 2001).

Aucune étude expliquant la variation d'activité enzymatique pour LPL et ACC n'a été trouvée.

Outre l'activité enzymatique, d'autres études sont menées sur les gènes pour trouver les causes de variation du taux en matière grasse. Ainsi, RENAUVILLE et al. [1997] ont démontré que des mutations au niveau de **Pit-1** (Growth Hormone Factor-1 / Pituitary-specific Transcription Factor) pouvaient moduler le taux en MG. De même, le gène **DGAT-1** (acyl-CoA :diacylglycerol acyltransferase 1) a également identifié comme **QTL** (Quantitative Traits Locus) pour les caractères de production du lait situé dans la région centromérique du chromosome bovin 14 (BENNEWITZ, 2003).

La conclusion finale de ce paragraphe est qu'une sélection animale axée sur le profil en acides gras de la matière grasse laitière est envisageable. En effet, les variations dans l'activité de différentes enzymes liées à la lipogenèse ainsi que les valeurs estimées d'héritabilité pour le caractère matière grasse élevées pourraient démontrer la faisabilité d'une sélection animale basée sur la qualité nutritionnelle du lait.

5. ANALYSES DE LA MATIÈRE GRASSE LAITIÈRE

Les méthodes classiques continuent à être largement utilisées dans les laboratoires où elles s'avèrent particulièrement fiables mais sont souvent longues à mettre en œuvre. Elles nécessitent des réactifs coûteux, parfois polluants, et un personnel qualifié pour réaliser les manipulations nécessaires. Ainsi, elles sont de plus en plus concurrencées par des méthodes instrumentales qui exploitent les propriétés physiques des analytes pour parvenir à leur identification ou à leur dosage. Bien que leur principe soit connu depuis parfois plus d'un siècle, leur application n'a été rendue possible que par les progrès considérables réalisés en électronique et en informatique ces cinquante dernières années. En effet, elles reposent largement sur la mesure et l'analyse d'un signal (PRÉVOT, 2004) .

5.1. L'analyse chromatographique

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) consistant en une séparation entre deux phases l'une étant un liquide stationnaire et l'autre un gaz est fortement utilisée pour le dosage des acides gras à partir du beurre. Cette technique, requérant l'emploi de colonnes capillaires, permet d'isoler en une seule opération 40 à 50 acides gras différents (sous forme de leurs esters méthyliques) à partir de quelques µg d'huile de beurre (DOREY et al., 1988).

5.2. L'analyse FTIR

La spectroscopie infrarouge étudie les interactions de la lumière infrarouge sur la matière. En effet, cette dernière est composée d'ondes magnétiques et électriques qui vont interagir avec les molécules de l'échantillon (SMITH, 1996). Les spectromètres du moyen infrarouge utilisant la méthode de la transformée de Fourier (Fourier Transform InfraRed, **FTIR**) pour retraiter le signal sont employés dans cette présente étude. La figure 9 montre l'étendue de cette zone infrarouge comprise entre 3 et 10 μm ou entre 1000 et 5000 cm^{-1} (Foss, 2005).

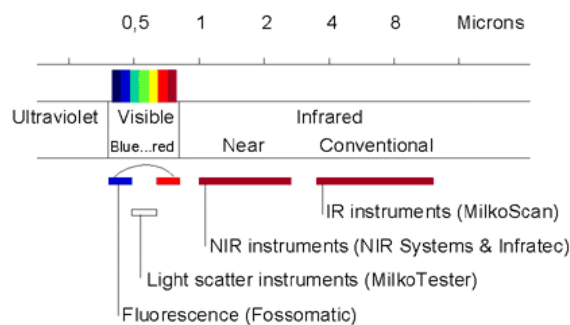


Figure 9 : Zone du moyen infrarouge, Source Foss (2005).

De tels spectromètres infrarouges sont composés d'un interféromètre permettant de faire varier l'intensité du rayon réfléchi par le mouvement d'un des deux miroirs qui compose cette structure (Figure 10).

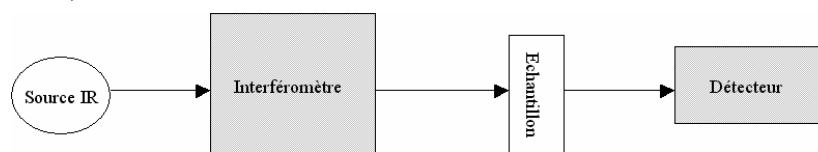


Figure 10 : Système simplifié d'un spectromètre infrarouge, inspiré de SMITH, 1996.

La transformée de Fourier permet de convertir les cm de l'interférogramme en cm^{-1} du spectre (graphique de l'intensité lumineuse en fonction du nombre d'onde mesuré en cm^{-1}) en résolvant une intégrale (SMITH, 1996).

L'avantage des spectromètres du moyen infrarouge utilisant la méthode FTIR est qu'ils possèdent un rapport signal / bruit de fond plus important que les instruments dispersifs de base et ceci pour 2 raisons : Jacquinot advantage of FTIR et Multiplex advantage. Le premier est dû au fait que toutes les radiations infrarouges passent au travers de l'échantillon et arrivent au détecteur. Le détecteur voit alors la quantité maximum de lumière pour tous les points pendant le scanner. Le deuxième avantage cité est issu du fait que tous les nombres d'onde de la lumière sont détectés simultanément alors que pour les autres appareils dispersifs, seulement, une partie des nombres d'onde sont analysés pendant le temps du

scanner. La méthode FTIR exécute un scannage multiple avant de rendre les résultats ce qui a pour objectif de diminuer le bruit de fond (SMITH, 1996).

Outre sa précision, l'intérêt de la spectroscopie infrarouge pour ce type d'étude réside dans sa rapidité d'analyse indispensable à toute étude génétique requérant un nombre conséquent de données. En effet, selon l'entreprise Foss, le MilkoScanTM FT6000 peut analyser plus de 500 échantillons par heure.

6. SELECTION CHEZ LES BOVINS LAITIERS

La mise en place d'un programme de sélection chez les bovins laitiers est très complexe : la production laitière, la morphologie, la santé du pis, la fertilité ou la longévité sont autant de paramètres qui doivent être pris en compte. Dans le cadre de ce travail, la sélection pour la production laitière nous intéresse tout particulièrement. Par conséquent, ce chapitre présente dans un premier temps la procédure du contrôle laitier, qui récolte les informations phénotypiques ; la modélisation des données, qui estime les valeurs d'élevage ; et enfin la définition d'index synthétiques, qui affectent un impact économique à ces estimations.

6.1. Le contrôle laitier

Malgré le développement important des marqueurs moléculaires, un enregistrement des performances ou des aptitudes à la production est toujours nécessaire pour effectuer une sélection animale sur des caractères quantitatifs comme la matière grasse laitière.

Le contrôle laitier supervisé par l'Association Wallonne de l'Elevage (**AWE**) est un outil qui permet de suivre les performances des animaux laitiers au cours de leurs lactations. En Belgique, tous les enregistrements sont effectués par un représentant officiel de l'organisme de contrôle généralement toutes les 4 ou 6 semaines (A4 ou A6). Les contrôleurs laitiers vont donc dans les fermes participantes prélever un échantillon de lait de chaque vache productrice du troupeau et noter les productions individuelles de ces dernières. Ces prélèvements sont ensuite analysés par spectrométrie dans le moyen infrarouge (Milkoscan) afin de doser leurs quantités en matières grasses et en protéines. De plus, le nombre de cellules somatiques présentes dans ces laits est également estimé par cytométrie de flux. Le contrôle laitier fournit donc le matériel de base à toute sélection animale : les données phénotypiques.

6.2. L'évaluation génétique

Sur base de ces informations, une évaluation du potentiel génétique des vaches et des taureaux laitiers est réalisée. Les valeurs d'élevage (ou les valeurs génétiques) pour les caractères de production laitière (quantités de lait, de matières grasses, de protéines) obtenues lors de ces évaluations permettent d'effectuer un choix des meilleurs reproducteurs sur base des objectifs poursuivis par la sélection animale (GENGLER, 2004 ; MAYERES, 2002).

Pour estimer les valeurs génétiques pour la quantité de lait, de MG, de protéines,..., des modèles linéaires mixtes permettant de décrire les sources de variation sont utilisés. Cette partie s'attèle à expliquer différents modèles statistiques employés en génétique quantitative.

6.2.1. Modèle mixte et modèle animal

La méthode, habituellement utilisée en génétique et amélioration animales, se base sur l'ajustement de modèles linéaires mixtes permettant de modéliser la moyenne et la variance des données.

En 1984, HENDERSON résume les modèles mixtes par la formule suivante :

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\mathbf{u} + \mathbf{e}$$

- $\mathbf{y}$ est le vecteur contenant toutes les observations pour un caractère quelconque (taux en matière grasse, protéines, ...)
- $\mathbf{X}$ est la matrice d'incidence qui met en relation les observations et les effets fixes ;
- $\boldsymbol{\beta}$ est le vecteur renfermant toutes les solutions des effets fixes (troupeau, date de test, ...)
- $\mathbf{Z}$ est la matrice d'incidence qui met en relation les observations et les effets aléatoires ;
- $\mathbf{u}$ est le vecteur comprenant toutes les solutions des effets aléatoires (l'effet génétique, l'environnement permanent,...)
- $\mathbf{e}$ correspond au vecteur des résidus.

HENDERSON [1984] résume dans son article les équations du modèle mixte (**MME**) qui estiment $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ et prédisent $\hat{\mathbf{u}}$ simultanément comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{X} & \mathbf{X}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Z} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Z} & \mathbf{Z}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Z} + \mathbf{G}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\beta}} \\ \hat{\mathbf{u}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{y} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{s}$$

- $\mathbf{R}$ est la matrice des (co)variances résiduelles ;
- $\mathbf{G}$ est la matrice des (co)variances pour les effets aléatoires (par ex. l'effet génétique).

L'intérêt d'utiliser cette démarche est de dissocier les différents effets qui influencent les observations. Ces derniers estimés par les modèles mixtes ont les propriétés d'estimation non biaisée **BLUE** (Best Linear Unbiased Estimation) et de prédiction non biaisée **BLUP** (Best Linear Unbiased Prediction) (HENDERSON, 1984). Une conséquence du modèle BLUP pour les effets aléatoires est que le mérite génétique de l'animal est estimé d'une façon optimale.

Un problème qui peut se poser dans ces équations est l'inversion de $\mathbf{G}$ et de $\mathbf{R}$. Cependant, dans un modèle unicaractère, les résidus sont souvent supposés non corrélés et $\mathbf{R} = \mathbf{I}\sigma_e^2$, avec σ_e^2 correspondant à la variance résiduelle. De même, $\mathbf{G} = \mathbf{A}\sigma_a^2$ où $\mathbf{A}$ correspond à la matrice de parenté et σ_a^2 , à la variance génétique additive. La difficulté vient alors de l'inversion de la matrice $\mathbf{A}$. C'est pour cette raison que par le passé, uniquement les mâles étaient inclus dans les calculs, ceci afin de réduire la taille de la matrice de parenté. Actuellement, grâce aux progrès informatiques, le modèle le plus utilisé est appelé modèle animal et permet d'estimer simultanément des femelles et des mâles, par exemple, des vaches et des taureaux laitiers. Dans ce type de modèle, la matrice de parenté $\mathbf{A}$ contient les liens entre tous les animaux. La valeur génétique additive d'un animal ($\mathbf{u}_a$) est donc estimée à partir de ses propres performances, celles de ses ancêtres, de ses collatéraux ainsi que de ses descendants. Les estimations de σ_a^2 et σ_e^2 sont données pour toute la population par l'analyse d'un échantillonnage approprié de celle-ci.

D'autres effets aléatoires peuvent être ajoutés suivant les besoins des données étudiées. Dans le cas de données répétées sous certaines hypothèses (corrélation génétique unitaire et corrélation phénotypique constante entre observations), l'effet aléatoire dû à l'environnement peut être rajouté ($\mathbf{u}_p$) (GENGLER, 2004) :

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{Z}\mathbf{u}_a + \mathbf{Z}\mathbf{u}_p + \mathbf{e}$$

Après simplification et multiplication par σ_e^2 les MME associées s'écrivent comme suit:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}'\mathbf{X} & \mathbf{X}'\mathbf{Z} & \mathbf{X}'\mathbf{Z} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{X} & \mathbf{Z}'\mathbf{Z} + \mathbf{A}^{-1}\lambda_a & \mathbf{Z}'\mathbf{Z} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{X} & \mathbf{Z}'\mathbf{Z} & \mathbf{Z}'\mathbf{Z} + \mathbf{I}\lambda_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\beta}} \\ \hat{\mathbf{u}}_a \\ \hat{\mathbf{u}}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}'\mathbf{y} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{y} \\ \mathbf{Z}'\mathbf{y} \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \begin{matrix} \lambda_a = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_a^2} \\ \lambda_p = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_p^2} \end{matrix}$$

- σ_e^2 correspond à la variance résiduelle ;
- σ_a^2 représente à la variance génétique ;
- σ_p^2 correspond à la variance de l'environnement permanent.

Des modèles multi-caractères où le vecteur $\mathbf{y}$ regroupe des observations issues de différents caractères (par ex. taux en AG saturés-insaturés-monoin saturés ou encore lait-MG-protéine) peuvent également être envisagés.

6.2.2. Modèles jour de test

Les données laitières sont des données répétées issues du contrôle laitier. Depuis quelques années, une méthode d'analyse permettant d'utiliser tous les résultats individuels obtenus lors des contrôles laitiers plutôt que les données cumulées comme c'était le cas dans le modèle

traditionnel à 305 jours a été élaborée. Ceci a été rendu possible par le développement du modèle jour de test (« test-day model »). Les évaluations génétiques wallonnes pour les caractères de production (lait, MG et protéine) sont, par exemple, effectuées avec un tel modèle (GENGLER, 2004). Ce modèle présente l'intérêt d'être plus flexible et montre de nombreux avantages par rapport aux modèles traditionnels à 305 jours :

- des estimations du mérite génétique plus précises ;
- plus d'informations sur les vaches et les effets de l'environnement ;
- prise en compte des variations au cours de la lactation en estimant les effets au jour du contrôle ;
- l'estimation des productions cumulées à 305 jours n'est plus nécessaire ;
- les contrôles manquants et les intervalles entre ces derniers ne posent plus de problèmes pour la prédiction.

Deux types de TDM existent : les modélisations en une ou deux étapes suivant qu'ils calculent directement ou non les valeurs d'élevage (SWALVE, 2000).

6.3. La définition d'index synthétiques

Cinq critères sont ainsi évalués pour la production laitière (kg lait, kg et taux de matières grasses et de protéines). En parallèle, une évaluation génétique est réalisée pour la santé du pis, produisant une valeur d'élevage score cellulaire, et 33 valeurs d'élevage de morphologie sont également estimées.

Afin de permettre aux éleveurs wallons de choisir leurs géniteurs malgré l'existence de plus de 30 caractères évalués, un index synthétique global appelé Valeur Economique Globale (V€G) a été communiqué dès novembre 2002. Celui-ci est constitué de trois index synthétiques partiels (sous-index) : la Valeur Economique Lait (V€L), la Valeur Economique Type fonctionnel (V€T, elle-même reprenant les trois sous-index V€M pour les membres, V€C pour le corps et V€P pour le pis) et le V€F, Valeur Economique Fonctionnelle (caractérisant la santé du pis). Le V€L, 55 % du V€G, est composé à 11 % par le caractère de production lait (kg), à 16,5 % du caractère matières grasses (kg) et à 27,5 % du caractère protéines (kg). L'estimation du V€L s'inspire des règles en vigueur dans le payement du lait. En effet, les quantités de protéines et de matières grasses sont affublées d'un poids positif dans la formule à l'opposé de la quantité de lait (GENGLER et al., 2005b). Par conséquent, cette technique influencent indirectement les taux en matières grasses et surtout de protéines dans le lait. Une particularité du système wallon est que tout nouvel index partiel peut être ajouté aux index existants. L'intégration d'un hypothétique index 'qualité du lait' (index 'santé') est donc aisé à concevoir.

Toute sélection animale est donc actuellement axée essentiellement sur le V€G et en aucun cas ne s'intéresse au profil en acides gras de la matière grasse laitière ou à d'autres facteurs pourtant déjà mesurés lors du contrôle laitier comme, par exemple, l'urée ou le lactose.

7. CONCLUSION

Les acides gras contenus dans la matière grasse laitière qu'ils soient saturés ou insaturés possèdent tous des propriétés spécifiques globalement positives ou négatives pour la santé humaine. Par conséquent, se limiter au taux total en matière grasse pour statuer sur la qualité nutritionnelle théorique de la matière grasse du lait semble être restrictif.

Des études sur les différences génétiques dans le profil en acides gras du lait d'animaux laitiers ont déjà été recensées mais toutes avaient pour base de comparaison les animaux Jersey et Holstein. Bien qu'elles aient démontré des profils en acides gras distincts pour ces deux races, se limiter à ces deux seuls représentants ne montrent qu'une faible partie de la variabilité génétique existante entre races laitières.

Afin d'expliquer ces différences de profil en acides gras, des auteurs comme LOCK et al. [2003] se sont intéressés aux variations d'activité enzymatique notamment celle de la delta-9 désaturase. En plus de démontrer les variations saisonnières d'activité enzymatique, ils ont également rapporté que des différences d'activité au sein même des races avaient été observées suggérant une variabilité intra-race non nulle.

A partir de ces divers éléments et des valeurs estimées d'héritabilité pour le caractère quantité de matière grasse élevées, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une sélection animale axée sur la qualité nutritionnelle du lait et, plus spécifiquement, sur son profil en acides gras est envisageable. Dans ce cadre, ce travail de fin d'étude se veut être une prémisse à l'étude d'une telle sélection animale en démontrant sa faisabilité. Pour ce faire, la présente étude va tenter d'analyser la variabilité génétique intra- et inter-races existant entre différentes races laitières pour le profil en acides gras du lait.

Vu le nombre important de données nécessaires à toute étude génétique, le choix de l'analyse s'est porté sur la technologie du moyen infrarouge car celle-ci est rapide (500 échantillons / heure), ne demande aucune étape préalable d'extraction de la matière grasse et est déjà employée par le contrôle laitier pour doser notamment les taux en matière grasse et en protéines.

CHAPITRE III : MATÉRIEL ET MÉTHODES

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du présent travail, une étude des différences intra- et inter-races du profil en acides gras est envisagée afin de démontrer la faisabilité d'une sélection animale basée sur la qualité nutritionnelle de la matière grasse laitière. Vu le nombre élevé de données nécessaire à cette analyse, le recours à la spectrométrie du moyen infrarouge est utilisée. Bien que cette technologie soit déjà employée par le contrôle laitier pour doser notamment le taux total en matière grasse, en protéines, elle ne parvient pas encore à estimer le profil en acides gras du lait. Dans le cadre de cette étude, un travail préalable de calibrage est donc effectué. Les droites de calibrage sont ainsi estimées à partir des résultats d'analyses chromatographiques et spectrométriques d'échantillons de lait à la composition en matière grasse distincte. Finalement, à partir des données fournies par ces droites et par l'emploi d'un modèle mixte dérivé de ceux utilisés actuellement en évaluations génétiques, des variations intra- et inter-races du profil en acides gras peuvent être étudiées.

2. EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE

2.1. Introduction

Cette expérience a pour objectif de déceler les nombres d'onde influencés par la matière grasse laitière et de voir, par la suite, si ces derniers donnent des différences spectrales significatives pour des profils en acides gras distincts. Le recours pendant cette première expérience à des échantillons congelés et frais permet de vérifier l'efficacité du système de conservation adopté pour le présent travail.

2.2. Les échantillons

Deux types de lait de composition en matière grasse distincte sont analysés ; un lait entier standard et un enrichi en acides gras oméga-3. Le protocole d'échantillonnage adopté est le suivant.

Après ouverture de l'emballage, l'entièreté du contenu de la bouteille de chaque lait est transvasé et agité dans un bécher de manière à rendre la fraction prélevée la plus homogène possible. A deux reprises, 50 ml de lait sont introduits dans un tube de 50 ml en polystyrène à fond conique de type Falcon. Le premier est stocké dans un congélateur garantissant une température de -26 ± 2 °C et analysé ultérieurement pour vérifier la qualité de la conservation. Quant au deuxième, il est analysé directement après l'ouverture de la bouteille. Dans un second temps, 15 ml de matière grasse ont également été extraits de ces laits et stockés au congélateur dans les mêmes conditions de froid. La méthode d'extraction est expliquée ci-dessous.

Méthode d'extraction de la matière grasse

La méthode d'extraction de la matière grasse est inspirée de la NORME INTERNATIONALE ISO 14156 : 2001, FIL 172 : 2001, « Lait et produits laitiers – Méthodes d'extraction des lipides et des composés liposolubles ».

L'échantillon de 50 ml, préalablement porté à 35 – 40 °C dans un bain d'eau thermostaté et refroidi rapidement dans un bac rempli de glace afin d'atteindre une température de 20 °C, est déposé dans une ampoule à décanter où 40 ml d'éthanol, 10 ml de solution ammoniacale (14 mol / l) et 50 ml d'éther diéthylique y sont ajoutés. Le tout est alors mélangé vigoureusement pendant 1 min. Un temps de repos est observé jusqu'à l'obtention de la séparation des phases. Ensuite, 50 ml de n-pentane sont ajoutés et mélangés à la préparation pendant 1 min. A la 2^{ème} séparation de phases, la fraction aqueuse est éliminée. 50 ml d'une solution de sulfate de sodium (100 g de Na₂SO₄ dans 1 l d'eau) sont alors ajoutés et mélangés pendant 1 min. La préparation est laissée au repos jusqu'à l'obtention de la 3^{ème} séparation de phases, la fraction aqueuse étant ensuite éliminée. 50 ml de la même solution de sulfate de sodium sont ajoutés et également mélangés pendant 1 min. A la 4^{ème} séparation de phases, la couche aqueuse est de nouveau éliminée. Après récupération de la couche organique dans une fiole conique, environ 5 g du sulfate de sodium anhydre sont ajoutés. La solution est ensuite agitée par un mélangeur pendant 10 min. Le contenu est ensuite filtré dans un ballon rond et la fiole conique est rincée avec du n-pentane. Le solvant est ensuite évaporé sous vide à l'aide d'un évaporateur rotatif et d'un bain thermostaté (50 °C) pendant 15 à 20 min. Pour éliminer les dernières traces de solvants, le ballon est maintenu sous vide pendant environ 10 à 15 min. La matière grasse est alors récupérée dans un flacon en verre pourvu d'un bouchon hermétique et stockée au congélateur à -26 ± 2 °C.

Un deuxième échantillonnage est également entrepris pour estimer la reproductibilité du signal infrarouge et la répétabilité de l'analyse chromatographique. Pour ce faire, en suivant un protocole similaire à celui énoncé ci-dessus, dix échantillons pour chaque lait sont prélevés et cela dans des bouteilles de lait aux numéros de lots différents.

2.3. L'analyse infrarouge

Les échantillons de lait standard et enrichi, préalablement portés à 40 °C dans un bain d'eau chaude afin d'éviter toute différence trop importante avec la température de la cellule à transmission (40 °C), sont analysés en FTIR avec un spectromètre AEGYS mi 200. Le calibrage de la machine est effectué pour des échantillons de type liquide aqueux. Les échantillons congelés sont préalablement décongelés dans une étuve à 50 °C avant d'être déposés dans un bain d'eau chaude pour atteindre la température de 40 °C.

Les échantillons frais sont d'abord analysés et cela à deux reprises (2 x 5 ml) suivi plus tard par les échantillons de lait et de matière grasse congelés. Le passage des échantillons est alterné entre les laits de type standard et enrichi pour éviter toute dérive liée au type d'échantillon analysé. De plus, toujours dans un souci d'éviter des erreurs de mesure, la matière grasse est introduite dans l'appareil infrarouge au moyen d'une seringue préalablement chauffée pour éviter que la MG ne se cristallise avant d'être analysée.

Pour estimer la reproductibilité du signal infrarouge, les dix échantillons issus de lots différents sont analysés à trois reprises en FTIR (3 x 5 ml) et l'ordre de passage suivi est identique à celui envisagé dans la première partie de l'expérience.

Les données spectrales sortis de l'AEGYS mi 200 sous forme de tableaux sont retraités pour donner les graphiques correspondants.

2.4. L'identification des différences spectrales

Après avoir obtenu les spectres sous forme graphique tant pour les matières grasses que pour les laits, ceux-ci sont comparés afin de déceler les zones clés du spectre du moyen infrarouge intéressantes pour quantifier la teneur en matière grasse laitière. Dans un second temps, ces nombres d'onde (cm^{-1}) sont étudiés afin d'estimer si des différences de profil en acides gras peuvent être isolées. Deux aspects sont alors envisagés : le premier est une étude 'visuelle', à partir des spectres et des écarts-types, le deuxième concerne une approche statistique en utilisant une analyse canonique discriminante (procédure 'PROC CANDISC' du logiciel SAS (Statistical Analysis System)). Cette analyse multi-variée vise à représenter graphiquement les groupes d'objets qui s'opposent le plus sur les axes canoniques définis comme des combinaisons linéaires des variables descriptives de départ. Les corrélations totales permettent d'identifier le rôle respectifs des différentes variables sur ces axes. Pour procéder à une telle analyse, douze pics sont isolés sur le spectre (S1 $\rightarrow$ S12) et étudiés (Figure 11). Cette procédure permet donc au-delà d'affirmer la différence entre les deux profils, de préciser les pics les plus intéressants pour caractériser le profil en acides gras envisagé.

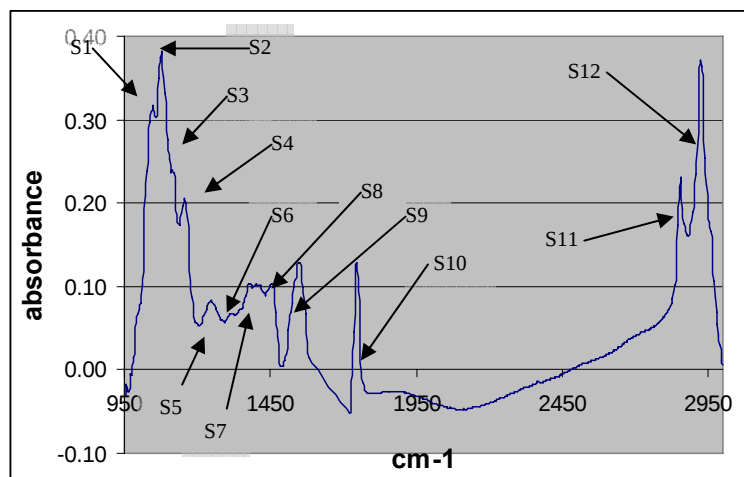


Figure 11 : Pics isolés pour effectuer l'analyse 'PROC CANDISC'.

2.5. L'analyse chromatographique

Les échantillons de lait passés en FTIR sont ensuite analysés par chromatographie en phase gazeuse. La méthode utilisée, expliquée ci-dessous, est inspirée du travail de COLLOMB et al. [2000], « Analyse de la composition en acides gras de la graisse de lait ».

Méthode d'analyse chromatographique

La matière grasse extraite selon la méthode mentionnée au point 2.2. est liquéfiée dans une étuve entre 45 et 50 °C. Après agitation, 50 mg de graisse sont introduits dans un tube à essai de type Sovirel de 10 ml auquel est ajouté 0,5 ml de la solution de standard interne (esters méthyliques d'acide nonanoïque (C9:0) à 0,8 % dans du n-hexane). Le tout est homogénéisé à l'aide d'un vortex. Ensuite, à ce mélange est additionné 25 µl de la solution de trans-estérification (KOH méthanolique 2 M). Le tout est alors mélangé et laissé au repos pendant 5 min à température ambiante. Après l'ajout de 0,05 - 0,06 g de sulfate de sodium anhydre, la solution est vortexée et centrifugée pendant 15 min à environ 1100 G.

5 µl prélevés dans la phase supérieure du tube sont ensuite insérés dans une bouteille pour injection automatique de 2 ml remplie au préalable de 1 ml de pentane. Après encapsulation et agitation, 0,5 µl de la solution finale est injectée dans le chromatographe. Ce dernier est composé d'une colonne capillaire CPSil - 57 CB (Varian), longueur 50 m, diamètre de 0,25 et *df* 0,20 µm. La précolonne (retention gap) est une Chrompack « methyl deactivated non polar » de la marque Varian, longueur 20 cm et diamètre interne 0,53 mm.

Les conditions chromatographiques sont les suivantes : le gaz vecteur : l'hélium, la vitesse moyenne : 35 cm / sec, l'injecteur est de type « on column », le détecteur FID est à 265 °C, le programme de température : 40 °C (2 min) jusqu'à 150 °C (30 °C / min) puis de 150 à 250 °C (2 °C / min) et le volume injecté est de 0,5 µl.

Les différents pics sont identifiés en se basant sur la littérature (DOREY et al., 1988) et sur les résultats obtenus par une analyse en **GC-MS** (Gas Chromatography - Mass Spectrometry). Après identification des pics, les résultats chromatographiques sont retraités par le programme Excel afin d'exprimer la part occupée par chaque acide gras dans la matière grasse laitière de l'échantillon considéré. Cette normalisation s'est faite en se basant sur la formule suivante :

$$\% \text{ dans la MG} = \frac{Rf_i * S_i * 100}{\sum Rf_i * S_i}$$

Rf_i représente le facteur de correction pour l'acide gras considéré ;

S_i correspond à la surface du pic de l'acide gras considéré ;

$\sum Rf_i * S_i$ représente la somme des surfaces multipliées par les facteurs de correction pour chaque acide gras présent dans le profil étudié.

Les facteurs de correction employés valent 1,35 ; 1,25 ; 1,15 ; 1,05 ; 1,00 et 0,90 respectivement pour le C4:0, C5:0, C6:0, C7:0, C8:0 et de C10:0 à C24:0 (COLLOMB et al., 2000). Ces paramètres n'ont pas été recalculé vu la similitude dans la méthodologie chromatographique employée dans le présent travail avec celle de COLLOMB et al. [2000].

Comme le montre la formule ci-dessus, un profil type en acides gras est élaboré reprenant les AG les plus représentés dans le lait : C4:0, C6:0, C8:0, C10:0, C10:1 9-*cis*, C12:0, C14:0, C14:1 9-*cis*, C15:0, C16:0, C16:1 9-*cis*, C18:0, C18:1, C18:2 9-*cis*,12-*cis*, C18:2 9-*cis*,11-*trans*, C18:3 9-*cis*,12-*cis*,15-*cis*. Les résultats chromatographiques sont alors retravaillés par normalisation en posant que 100 % de la matière grasse correspond aux seuls acides gras repris dans le profil ($\sum Rf_i * S_i$). Cette supposition paraît exagérée mais peut être acceptée dans le présent travail car, en se référant à l'étude menée par COLLOMB et al. [2000], la part occupée par les autres acides gras mineurs n'atteint pas plus de 10 g / 100 g de beurre. Chacun des acides gras est alors évalué sur base d'une proportion dans la matière grasse (% dans la MG).

2.6. La mesure de la reproductibilité du signal infrarouge et de la répétabilité de l'analyse chromatographique

La reproductibilité de la méthode d'analyse spectrale est estimée par comparaison des dix spectres de lait (chacun analysé en FTIR à trois reprises) et est calculée à partir du coefficient de variation (CV). La répétabilité de l'analyse chromatographique est estimée par le CV mais également par l'intervalle de confiance (IC). Ces paramètres sont donnés par les formules suivantes (DAGNELIE, 1992, 1998) ;

$$CV = \frac{100 * \sigma}{m} \quad \text{et} \quad IC = m \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}}^{\tau} * \frac{\sigma}{\sqrt{p}}$$

m = moyenne ;

σ = écart-type ;

p = le nombre de répétitions par échantillon ;

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}^{\tau}$ = la valeur de la distribution de Student pour $\tau = p-1$ degrés de liberté et un $\alpha = 0,05$.

2.7. La mesure de la justesse de l'analyse chromatographique

Une matière grasse de lait anhydre analysé par le Bureau InterProfessionnel d'Etudes Analytiques (BIPEA) (beurre de référence BIPEA) est utilisée pour estimer la justesse de l'analyse chromatographique. Les résultats chromatographiques obtenus pour ce beurre sont retravaillés en utilisant la même formule que celle énoncée précédemment au point 2.5.

Le tableau 10 reprend les quantités en acides gras identifiés dans le beurre de référence par le BIPEA.

Tableau 10 : Profil en acides gras du beurre de référence communiqué par le BIPEA.

Acides gras	Référence (g/100g de beurre)	Acides gras	Référence (g/100g de beurre)
C4:0	3.3 ± 0.4	C17 aiso	0.5 ± 0.4
C6:0	2.0 ± 0.4	C17:0	0.6 ± 0.4
C8:0	1.3 ± 0.4	C17:1 9-cis	0.3 ± 0.4
C10:0	3.1 ± 0.4	C18 iso	0.0 ± 0.4
C10:1 9-cis	0.3 ± 0.4	C18:0	9.8 ± 0.8
C12:0	3.8 ± 0.4	C18:1 9-cis	22.3 ± 1.8
C14 iso	0.1 ± 0.4	C18:2	-
C14:0	11.8 ± 0.9	C18:3	0.5 ± 0.4
C14:1 9-cis	1.1 ± 0.4	C20:0	0.1 ± 0.4
C15 iso	0.3 ± 0.4	C20:1	0.1 ± 0.4
C15 aiso	0.5 ± 0.4	C20:2	0.0 ± 0.4
C15:0	1.2 ± 0.4	C20:3	0.0 ± 0.4
C16 iso	0.3 ± 0.4	C20:4	0.0 ± 0.4
C16:0	32.0 ± 2.5	C22:0	0.0 ± 0.4
C16:1 9-cis	1.8 ± 0.4	C22:1	0.0 ± 0.4
C17 iso	0.4 ± 0.4	C24:0	0.0 ± 0.4

3. EXPÉRIENCE PRINCIPALE

3.1. Introduction

Cette expérience s'attèle, dans un premier temps, à dresser l'expression des droites de calibrage nécessaires à l'estimation du profil en acides gras de la matière grasse laitière à partir des spectres du moyen infrarouge. Pour ce faire, les données issues de ces derniers mais également celles provenant de l'analyse chromatographique des échantillons récoltés en ferme sont utilisées.

Dans un deuxième temps, à partir des quantités en acides gras dans le lait et dans la matière grasse laitière prédites par ces droites et par l'emploi d'un modèle mixte, des différences intra- et inter-races pour les composés considérés ont pu être estimées et étudiées.

3.2. La méthode d'échantillonnage des fermes

Une phase importante de cette expérience est de récolter des échantillons de lait en ferme aux profils en acides gras les plus différents possibles. En partenariat avec l'Association Wallonne de l'Elevage (AWE), les fermes intéressantes sont ciblées à partir d'un listing. Ce dernier reprend, entre autre, des critères tels que l'adresse, le numéro du contrôleur, le numéro du troupeau, le taux moyen en matière grasse et son écart-type, le niveau de production des vaches, le nombre de races présentes dans l'exploitation et le nombre de bêtes présentes pour

chaque race lors du dernier contrôle laitier. Afin de couvrir le maximum de variabilité du profil en acides gras du lait, la sélection des fermes s'est faite à partir de critères objectifs. Ces derniers sont :

- un nombre de races au sein de l'exploitation supérieur ou égale à 2 afin de pouvoir se rendre compte de l'effet de l'environnement. En effet, en ayant des races identiques au sein de plusieurs fermes, l'effet environnemental peut être mis en évidence ;
- le type de race présent dans l'exploitation pour essayer que l'étude couvre le maximum de races identifiées sur nos terres wallonnes ;
- un taux en matière grasse variable au sein de l'exploitation afin d'obtenir une échelle de variation de la teneur en MG importante pour permettre un calibrage efficace ;
- et une localisation intéressante pour éviter tout déplacement inconsidéré.

Finalement, à partir de la liste des fermes sélectionnées, un deuxième choix est opéré sur base de l'accord du contrôleur laitier et de l'éleveur à participer au présent travail. Au final, 7 exploitations laitières sont choisies (Tableau 11).

Tableau 11 : Liste des fermes participantes à l'étude.

Nom	Localité	Taux MG moyen *	Types de races
BAELE	Thorembais-St-Trond	4,16	Holstein, Pie-rouge.
BLONDIAU	Chièvres	3,75	BBM, Holstein.
BORLON	Serinchamps	3,85	Holstein, Normande, Pie-rouge.
DISKEUVE	Finnevaux	4,19	Montbéliarde, Pie-rouge.
DUBOIS	Grosage	5,42	Holstein, Jersey.
RAVET	Tourinnes-St-Lambert	3,51	Holstein, Pie-Rouge.
ROBERT	Cortil-Noirmont	3,83	BBM, Holstein, Pie-Rouge.

*BBM = Blanc Bleu Mixte ; * le taux moyen est calculé sur tout le troupeau.*

3.3. Les échantillons

Le protocole de prélèvement ainsi que celui de l'identification des échantillons de lait en ferme est calqué sur la pratique du contrôle laitier. Une fois par mois, lors du contrôle, un double échantillonnage est entrepris dans les fermes sélectionnées. Le prélèvement effectué par le contrôleur est envoyé comme à l'accoutumée au Comité du Lait de Battice pour analyse et les 120 ml prélevés supplémentaires (2 x 60 ml) sont stockés au congélateur à -26 ± 2 °C.

Chaque flacon d'échantillonnage porte un numéro d'ordre allant de 1 jusqu'au nombre total de vaches laitières recensées dans l'exploitation (Figure 12a). Sur une feuille annexe, intitulée feuille de prise d'échantillon (**PE**), en regard de ce numéro d'ordre, figure l'identification de l'animal (le numéro de travail, le numéro C.T.I.) de même qu'un code race, le père de l'animal, le nombre de litres donnés lors du précédent contrôle, le nombre de lactations et de contrôles déjà effectués sont repris. Un exemple de cette feuille figure à l'annexe I. Lors de la

traite, un appareil de prise d'échantillonnage, est inséré entre la griffe de traite et les canaux collecteurs de lait. Fixé à ce dernier, un tube gradué prélève une quantité de lait proportionnelle à celle qui passe dans les canalisations (Figure 12b). En fin de traite, le contrôleur retire le tube, transvase le lait dans un pot doseur et prélève par l'emploi d'une petite louche la quantité de lait requise (Figure 12c). Celle-ci est alors introduite dans le pot portant le numéro d'ordre correspondant à l'identification de la vache traite et la quantité de lait produite par l'animal est notée sur la feuille de PE. Cette opération est répétée pour la traite du matin et du soir. Par conséquent, l'échantillon analysé par le Comité du Lait est composé à moitié de la traite du matin et à moitié de celle du soir.

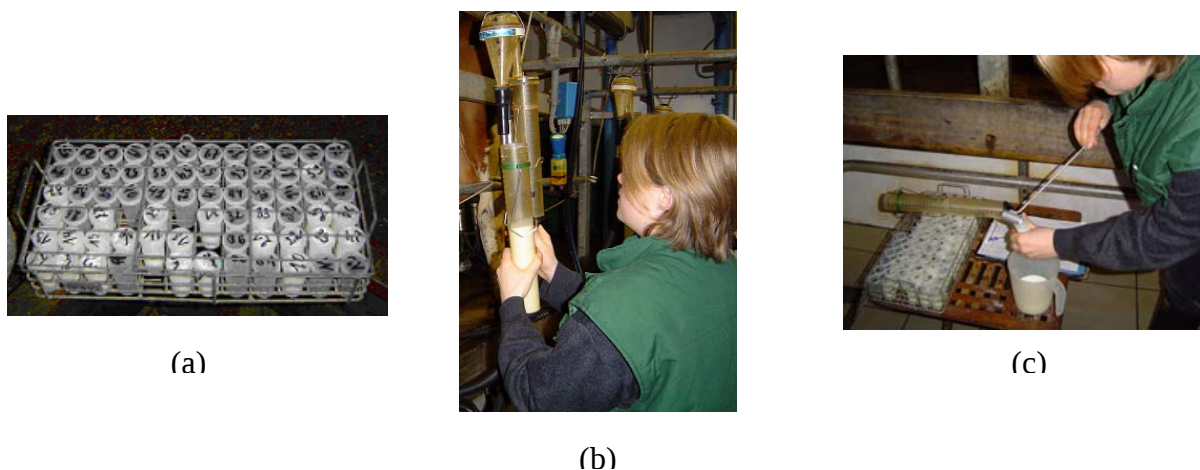


Figure 12 : (a) Numéro d'ordre indiqué sur les pots de prélèvements, (b) Tube gradué fixé à l'appareil échantillonneur, (c) Prélèvement de l'échantillon.

Le protocole d'échantillonnage adopté dans ce travail est équivalent. Les flacons de prélèvement portent le même numéro d'ordre que celui du contrôle laitier. Lorsque le lait est transvasé dans le pot doseur et que le contrôleur a pris son échantillon, deux fois 60 ml sont également prélevés dans ce même récipient. Ceux-ci sont alors stockés dans deux pots portant le même numéro d'ordre. Ce doublon est une sécurité en cas de problème lors des analyses ultérieures. Entre la traite du matin et du soir, mais également pendant environ 12 h l'échantillon est conservé dans un frigo. Ensuite, il est stocké au congélateur à -26 ± 2 °C. Pour l'identification ultérieure des animaux à partir de leur numéro d'ordre, un double de la feuille de PE est envoyée par l'AWE.

Chaque ferme est contrôlée à trois reprises (avril, mai et juin) pour tenir compte des différents types d'alimentation (aliment d'hiver → aliment d'été).

3.4. L'analyse infrarouge

Le bac composé de tous les échantillons prélevés dans une ferme mais également un double de la feuille de PE est envoyé au Comité du Lait de Battice pour l'analyse sur le spectromètre infrarouge, MilkoScanTM FT 6000 (Figure 13). Grâce à la collaboration de la société Foss et

du Comité du Lait de Battice, les spectres de lait pour chaque échantillon ont pu être récoltés et transmis via Internet.



Figure 13 : MilkoScan^{FM} FT 6000, Source Foss (2005).

L'identification des spectres est effectuée par l'emploi d'une numérotation propre au Comité du Lait. En effet, en envoyant les échantillons au Comité, le contrôleur laitier retire tous les pots vides issus de vaches taries ou vendues et recrée sur la feuille de PE une numérotation pour tous les pots remplis en commençant par 1 (Annexe I, dernière colonne). L'identification des spectres s'effectue donc en se référant à la feuille de PE.

Lors de l'envoi des spectres, un fichier reprenant tous les résultats de l'analyse spectrométrique est également transmis. Ceci permet de connaître la teneur en matière grasse exprimé en g / dl de lait de tous les échantillons collectés.

3.5. La sélection des échantillons

Avec l'aide du Centre Wallon de Recherches Agronomiques de Gembloux (**CRA-W Gembloux**), tous les spectres collectés ainsi que les teneurs en matière grasse des laits analysés (g / dl de lait) sont encodés dans un programme informatique spécifique aux techniques de calibrage infrarouge, le logiciel WINISI III. Ce dernier, par recours à une analyse en composantes principales (**ACP**) basée sur les données spectrales, extrait les échantillons intéressants à analyser pour dresser la droite de calibrage. Sélectionner les échantillons sur base de leur signal infrarouge est pertinent car il est reconnu que si la teneur en matière grasse augmente dans le lait, les valeurs d'absorbance du spectre infrarouge sont modifiées.

L'analyse ACP est une technique d'analyse multivariée dont le principe consiste à appliquer une transformation linéaire $T = XV$ à un ensemble de k variables corrélées, X pour obtenir un ensemble de k nouvelles variables non corrélées entre elles, T dénommées composantes principales (PRÉVOT, 2004). Ensuite, des échantillons sont sélectionnés afin qu'ils couvrent le maximum de la variabilité spectrale.

3.6. L'analyse chromatographique

La matière grasse des échantillons sélectionnés est extraite par la méthode mentionnée au point 2.2. Ensuite, celle-ci est analysée par chromatographie en phase gazeuse. La méthode utilisée est identique à celle expliquée au point 2.5. pour l'expérience préliminaire. Les résultats sont retraités avec les formules suivantes :

$$\% \text{ dans la MG} = \frac{Rf_i * S_i * 100}{\sum Rf_i * S_i} \quad \text{g AG / dl de lait} = \frac{\%MG * \%AG}{100}$$

Rf_i représente le facteur de correction pour l'acide gras considéré ;

S_i correspond à la surface du pic de l'acide gras considéré ;

$\sum Rf_i * S_i$ représente la somme des surfaces multipliées par les facteurs de correction pour chaque acide gras présent dans le profil étudié ;

$\%MG$ correspond au taux de MG dans le lait calculé par le Milkoscan (en g / dl de lait).

Les facteurs de correction employés sont identiques à celui utilisés au point 2.5.

Afin d'exprimer les différents acides gras en g / dl de lait, la deuxième formule mentionnée ci-dessus postule que la phase grasse extraite correspond à 100 % de la matière grasse présente dans l'échantillon. Même si cette supposition est un peu exagérée, elle peut être acceptée. En effet, la méthode d'extraction adoptée dans ce présent travail extrait les lipides et les composés liposolubles. Or, ces derniers n'occupent qu'environ 0,5 % de la matière grasse. Par conséquent, dans une optique de comparaison intra- et inter-races, cette façon de procéder est envisageable car les erreurs bien que minimales se répercutent inévitablement avec une intensité similaire sur tous les éléments analysés.

Dans le cas où la technologie FTIR ne permettrait pas de déceler individuellement tous les différents acides gras repris dans le profil, un regroupement est envisagé. Quatre classes sont effectuées : le groupe des saturés, insaturés totaux, monoinsaturés et polyinsaturés. Cette méthode présente l'avantage de combiner plusieurs valeurs entre elles afin d'augmenter l'impact de ces groupes sur le signal infrarouge augmentant ainsi la probabilité d'obtenir une droite de calibration avec un r^2 de prédiction supérieur à 60 %.

3.7. Les droites de calibration

La figure 14 décrit les différentes étapes nécessaires à l'élaboration d'une droite de calibration. La première étape consiste à estimer des valeurs de référence. Les échantillons préalablement sélectionnés par l'analyse ACP sont analysés par chromatographie en phase gazeuse afin d'estimer leur profil en acides gras. Ces résultats exprimés en % dans la MG ou en g / dl de lait correspondent aux valeurs de référence et sont introduites dans le logiciel WINISI III. La

deuxième étape consiste à créer, dans ce même logiciel, un répertoire contenant les différents spectres correspondants aux échantillons de référence. Ensuite, ce même programme utilise différentes analyses statistiques de calibrage telles que la régression multi-linéaire (**MLR**) ou la régression des moindres carrés partiels (Partial Least Squares (**PLS**)) pour estimer à partir des spectres infrarouges et des résultats chromatographiques des échantillons de référence l'expression d'une droite de calibrage pour le constituant de la matière grasse considéré (C12:0, C14:0, ...). La régression PLS s'est révélée être la démarche la plus pertinente car elle effectue un calibrage à partir de tous les nombres d'onde sélectionnés.

Quarante droites de calibrage sont exprimées afin de pouvoir estimer le profil en acides gras du lait à partir des spectres du moyen infrarouge.

La régression PLS est une méthode bilinéaire similaire à l'analyse en composantes principales hormis qu'elle maximise l'explication de la variable y (teneur en C14:0, en saturés,...). La modélisation de la relation entre les variables dépendantes et indépendantes s'effectue en deux étapes. La première est une opération de compression des données au cours de laquelle des variables latentes sont estimées et dont le rôle est semblable aux composantes principales de l'ACP. La seconde étape consiste à exprimer les variables dépendantes en fonction des variables latentes (PRÉVOT, 2004). Les spectres sont ainsi ajustés par une courbe. Un coefficient de corrélation 'score' entre les valeurs chimiques et les valeurs de la courbe pour chaque échantillon peut être calculé afin d'ajuster cette dernière (LOUIS, 1993). Chaque variable latente peut dès lors être combinée dans une équation de calibrage de type $Y = b_0 + b_1 \lambda_1 + b_2 \lambda_2 + \dots + b_p \lambda_p$.

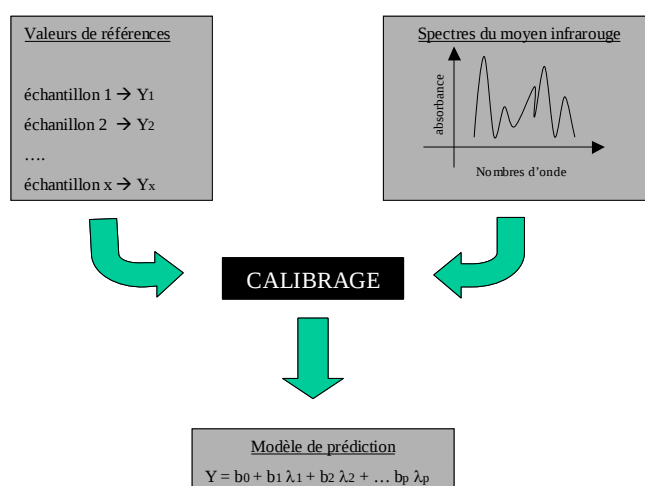


Figure 14 : Description des différentes étapes nécessaires à l'élaboration d'une droite de calibrage, inspiré de VAN DE LAER et al., 2001.

Cette méthode de calibrage est appliquée sur tous les nombres d'onde excepté les zones de bruit. Pour tester la robustesse des modèles de prédiction, une cross-validation est utilisée (VAN DE LAER et al., 2001). Une validation est un contrôle des fonctions de calibrage à partir

de nouveaux échantillons indépendants pour déterminer l'erreur de la méthode d'analyse. Or, la cross-validation n'utilise que les échantillons de référence. Un échantillon est validé à partir du calibrage des autres échantillons de référence. Après avoir validé tous les échantillons de référence, les paramètres statistique sont déterminés pour chaque passage et l'erreur standard de la cross-validation est estimée.

Au final, un tableau statistique est établi par le logiciel WINISI III reprenant divers termes tels que le nombre d'échantillon (**N**), la moyenne (**Mean**), l'écart-type (**SD**), l'erreur standard de calibration (**SEC**, smallest error in calibration), le coefficient de détermination (**R²**), l'erreur standard lors de la cross-validation (**SECV**, smallest error in cross-validation) et l'équivalent du coefficient de détermination pour la cross-validation (**1-VR**, **VR** = Variance Ration).

L'erreur standard de calibrage est donnée par la formule suivante :

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum (Y_r - Y_p)^2}{(n - m - 1)}}$$

Y_r = la valeur de référence calculée par les analyses chromatographiques ;

Y_p = la valeur prédite par la droite de calibrage considérée ;

n = le nombre d'échantillons ;

m = le nombres de valeurs indépendantes.

Cette valeur mesure l'écart moyen de l'ensemble des points par rapport à la droite de calibrage.

Par conséquent, 95 % des valeurs estimées seront comprises dans l'intervalle de confiance suivant :

$$x_i \pm (2 * SEC)$$

x_i = la valeur de référence.

Le coefficient de détermination (r^2) est un paramètre statistique qui calcule l'exactitude de la relation entre les valeurs de référence et les données spectrales. Il est donné par la formule suivante :

$$r^2 = \frac{\sum (Y_p - Y)^2}{\sum (Y_r - Y)^2}$$

Ce coefficient doit être interprété avec prudence car il est fonction de l'étendue des données de référence, l'erreur standard de calibrage restant la même. De plus, s'il n'existe pas de relation entre les variables dépendantes et indépendantes, le coefficient de corrélation peut

être différent de zéro par pur hasard. Une attention plus importante devra donc être accordée aux valeurs de SEC (LOUIS, 1993). Plus le nombre de termes dans une droite de calibrage s'élève, plus le SEC diminue. Cependant, le SECV diminue jusqu'à l'optimum et ensuite augmente. Une droite de calibrage performante possède donc un r^2 et un 1-VR élevés, un SEC et un SECV bas (VAN DE LAER et al., 2001).

4. DIFFÉRENCES INTRA- ET INTER-RACES

4.1. Introduction

Après avoir établi l'expression des droites de calibrage nécessaires à l'estimation du profil en acides gras du lait, celles-ci sont utilisées pour apprécier la composition en matière grasse de tous les échantillons collectés. A partir des quantités de chaque acide gras et de leur proportion dans la matière grasse, des différences intra- mais également inter-races sont étudiées. De plus, sachant qu'une partie de la variabilité dans le profil en acides gras s'explique par l'activité enzymatique, l'impact de la delta-9 désaturase est aussi analysé.

4.2. L'évaluation des différences intra- et inter-races

Comme précisé précédemment, 6 races sont examinées dans cette présente étude. Il s'agit des races BBM, Holstein, Jersey, Montbéliarde, Normande et Pie-rouge.

Le recours à une analyse de la variance est envisagé pour mettre en évidence les différences intra- et inter-races dans la composition de la matière grasse du lait. Le modèle mixte adopté dérive de ceux utilisés habituellement en génétique et amélioration animales. Il reprend, outre les effets fixes troupeau*date de test, le numéro de lactation, les classes de 15 jours en lactation et la race, un effet aléatoire, la répétition des données sur un même animal. Ceci permet d'estimer un effet animal combinant l'influence des gènes de l'animal avec d'autres effets individuels tels que l'environnement permanent. L'estimation des variances permet d'évaluer les différences intra- et inter-races. La procédure SAS 'PROC MIXED' est employée car elle permet d'associer une analyse de la variance à des modèles mixtes.

Le modèle utilisé dans le cadre de ces recherches se laisse résumer comme suit :

$$y = X\beta + Zu + e$$

- y est le vecteur contenant toutes les observations pour un caractère quelconque (quantités en AG ou en saturés, insaturés, monoinsaturés, polyinsaturés dans le lait ou la matière grasse obtenues à partir des droites de calibrage);
 - β est le vecteur renfermant les effets fixes (troupeau*date de test, numéro de lactation, classe de 15 jours en lactation, l'effet race) ;
 - u est le vecteur comprenant l'effet aléatoire (l'effet animal) ;
 - X est la matrice d'incidence qui met en relation les observations et les effets fixes ;
-

- **Z** est la matrice d'incidence qui met en relation les observations et les effets aléatoires ;
- **e** correspond au vecteur résidu.

Le modèle mixte adopté pour estimer les différences intra- et inter-races dans le profil en acides gras exprimé en % dans la MG possède un effet fixe supplémentaire, une régression sur la teneur en matière grasse. Celui-ci permet d'éviter tout biais pouvant provenir de la variation du taux en matière grasse dans le lait.

La première approche envisagée dans le présent travail est l'analyse des différences intra- et inter-races du profil en acides gras du lait. Afin d'introduire le plus justement l'effet dû à la race dans le modèle mixte, les composantes raciales sont préférées à l'activité d'élevage (Annexe I, première colonne). Cette dernière se présente sous forme de code (01 = BBM, 02 = Pie-rouge, 04 = Holstein, 07 = Jersey, 40 = Montbéliarde, 50 = Normande) et est attribuée aux animaux par le contrôleur laitier. Des erreurs peuvent subvenir dans le cas d'individus croisés. Par exemple, même si un animal est classé comme Pie-rouge (02) parce que sa couleur correspond au standard de la race, celui-ci peut posséder en vérité dans son patrimoine génétique plus de 50 % de gènes d'origine Holstein.

Lors de l'estimation des composantes raciales, la notion de race inconnue est introduite reprenant le pourcentage de gènes d'origine inconnue. Par exemple, un animal peut être pour 86 % de gènes Holstein connus et pour 14 % d'origine inconnue. Ces 14 % se retrouvent alors dans le reste non attribué. Le problème de cette démarche est que ce résidu intervient dans les valeurs estimées pour les diverses races étudiées. Pour éviter tout biais, une estimation des différences inter-races par rapport à une race de référence, la Holstein, est ainsi utilisée. Deuxièmement dans un souci de standardisation, toutes ces différences sont ensuite divisées par la racine carrée de la variance totale ($\sqrt{\sigma_{\text{résiduelle}}^2 + \sigma_{\text{animale}}^2}$), la variance animale étant calculée à partir des répétitions de données exécutées sur les mêmes animaux.

Afin d'estimer avec quel degré de signification, le profil en acides gras du lait de ces races se distinguent de la Holstein, les probabilités des tests F sont étudiées. Cependant, pour estimer l'impact global de l'effet racial sur la composition de la matière grasse, une probabilité supplémentaire est estimée. Il s'agit d'un contraste entre le race de référence et les races laitières étudiées reprises dans un unique groupe (probabilité 'Toutes les races').

La différence intra-race du profil en acides gras du lait est également analysée. Dans le but d'approcher la variabilité intra-race, la répétabilité 'animale' est estimée par le rapport de la variance animale sur la variance totale ($\sigma_{\text{animale}}^2 / (\sigma_{\text{résiduelle}}^2 + \sigma_{\text{animale}}^2)$). Elle peut être interprétée comme la variabilité individuelle génétique et non-génétique. Des valeurs élevées pour ce paramètre permettent donc d'espérer des héritabilités non négligeables, base de toute sélection.

Après avoir analysé les différences intra- et inter-races pour les constituants de la matière grasse considérés, il était intéressant de connaître le pourquoi de cette variabilité. Comme mentionné dans la revue bibliographique, une enzyme clé dans l'obtention du profil en acides gras du lait est la delta-9 désaturase. Celle-ci provoque l'addition d'une double liaison *cis* entre le carbone 9 et 10. Cette activité peut être mesurée par le ratio produit / substrat de certains acides gras. Cette enzyme produit principalement quatre produits : C14:1, C16:1 *9-cis*, C18:1 *9-cis* et CLA obtenus à partir, respectivement, du C14:0, C16:0, C18:0 et C18:1 *11-trans*. Le meilleur indicateur d'activité de la delta-9 désaturase est le ratio C14:1 / C14:0 car tous les C14:0 sont synthétisés *de novo* dans la glande mammaire, la désaturation étant donc la seule source de C14:1. L'augmentation de la valeur du ratio traduit une activité accrue de cette enzyme (LOCK et al., 2003). La seconde approche adoptée dans le présent travail est d'estimer les différences intra- et inter-races d'activité enzymatique de la delta-9 désaturase. Les différences inter-races sont calculées par l'emploi d'un modèle mixte similaire à celui employé pour estimer les différences intra- et inter-races du profil en acides gras exprimé en % dans la MG.

La variabilité intra-race est estimée comme dans le cas précédent par le rapport de la variance animale sur la variance totale ($\sigma_{\text{animale}}^2 / (\sigma_{\text{résiduelle}}^2 + \sigma_{\text{animale}}^2)$).

La troisième et dernière approche envisagée est d'étudier la variabilité du profil en acides gras du lait au sein de la population animale analysée. Un classement des animaux sur base de la qualité nutritionnelle théorique de leur matière grasse laitière est réalisé en postulant qu'un lait de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure devrait être composé :

- d'un taux en matière grasse le plus faible ;
- d'une quantité ou d'un taux en AG saturés les plus petits ;
- d'une quantité ou d'un taux en AG insaturés les plus élevés.

Sont repris dans ce classement, les cinq animaux renfermant le profil en acides gras le plus pertinent et les cinq plus médiocres représentants. Pour ce faire, les valeurs calculées pour chaque animal, donc les prédictions de l'effet 'animal' individuel, sont extraites de la procédure 'PROC MIXED' de SAS. A ces dernières sont ensuite ajoutées les contributions raciales estimées à partir des composantes raciales recensées pour l'animal. Dans un souci de standardisation, ces effets individuels sont divisés par la racine carrée de la variance totale. Finalement, le classement est réalisé.

A partir de ces mêmes effets, les corrélations entre les différents composés de la matière grasse sont également calculées. Elles permettent une appréciation des corrélations phénotypiques entre les divers constituants de la matière grasse laitière.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE

Introduction

Cette expérience a pour objectif de déceler les nombres d'onde du spectre du moyen infrarouge influencés par la matière grasse du lait et, par la suite, d'observer si ces derniers permettent de mettre en évidence des variations spectrales dues à des profils en acides gras distincts. Pour ce faire, 2 échantillons de lait à la composition en matière grasse différente sont étudiés en FTIR : un lait entier standard et un enrichi naturellement en oméga-3.

L'analyse infrarouge des échantillons

1.2.1. Spectre infrarouge des laits analysés

Deux types de laits entiers (standard et enrichi en acides gras oméga-3) ainsi que leur matière grasse correspondante sont analysés par spectrométrie dans le moyen infrarouge (Matériel & Méthodes, point 2.3.). La figure 15 montre l'aspect général d'un spectre de lait.

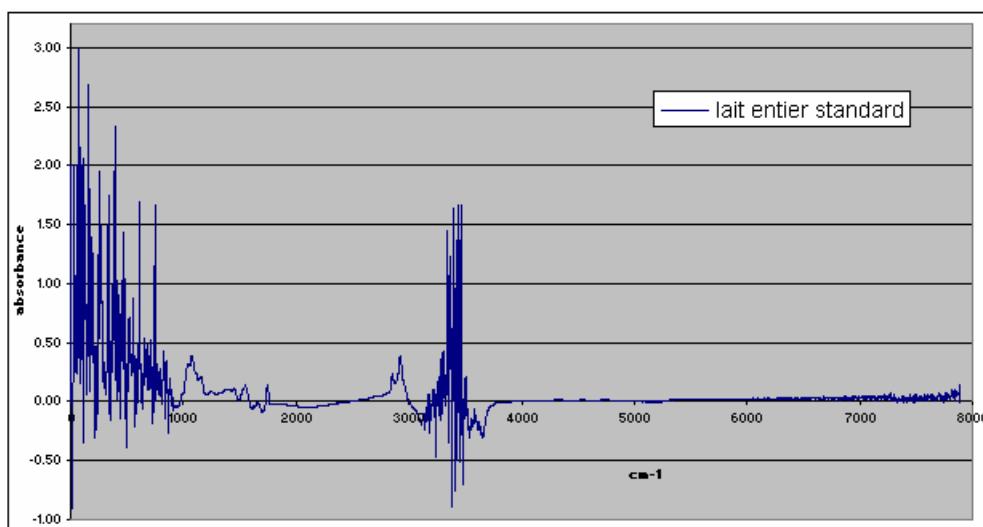


Figure 15 : Spectre dans le moyen infrarouge d'un échantillon de lait entier.

Comme le suggère ce graphique, la zone spectrale s'étendant au-delà de 4000 cm^{-1} n'apporte aucune information supplémentaire. Par conséquent, l'espace spectral étudié dans le présent travail s'étendra au maximum de 0 à 4000 cm^{-1} . Cependant, avant d'émettre une conclusion définitive, il faut encore s'assurer que le signal infrarouge est reproductible.

1.2.2. Estimation de la reproductibilité du signal infrarouge

A partir de l'analyse répétée de dix échantillons de lait issus de lots différents, la reproductibilité du signal infrarouge pour les nombres d'onde sélectionnés (de 0 à 4000 cm^{-1})

est estimée (voir Matériel et Méthodes, point 2.6.). Par superposition des divers spectres de lait entier standard, les zones de bruit de fond situées entre 0 et 950 cm^{-1} (Figure 16a), 1585 et 1718 cm^{-1} (Figure 16b) mais également au-dessus de 3000 cm^{-1} (Figure 16c) sont clairement mises en évidence. La même conclusion est formulée avec le lait enrichi en oméga-3. Une autre technique basée sur le coefficient de variation est donnée à l'annexe II pour évaluer la reproductibilité du signal infrarouge mais la conclusion s'y rapportant est identique à celle exprimée ci-dessus. En conclusion, les nombres d'onde (cm^{-1}) étudiés dans la suite du présent travail seront compris entre 950 et 3000 cm^{-1} excepté la zone de bruit de fond située entre 1585 et 1718 cm^{-1} .

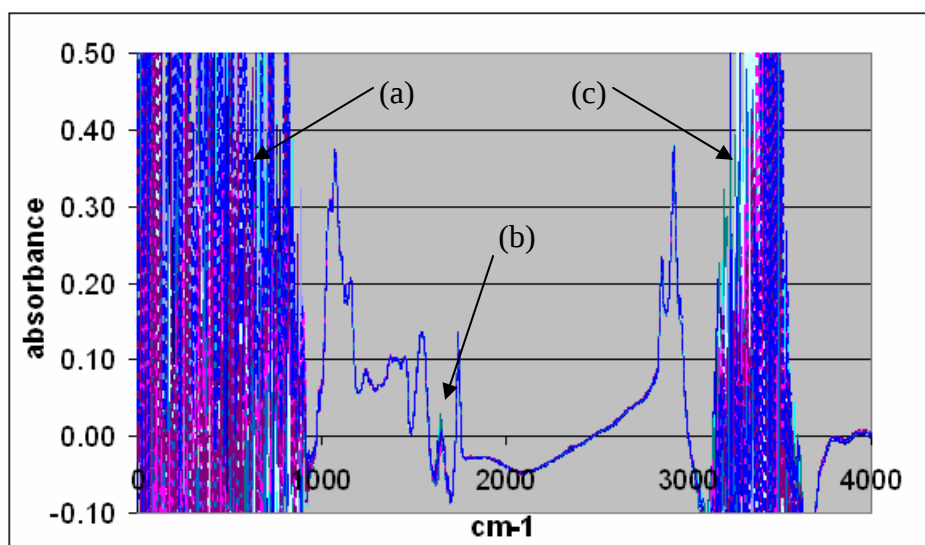


Figure 16 : Représentation graphique de la reproductibilité du signal infrarouge pour les trente laits entiers standard.

1.2.3. Nombres d'onde impliqués dans la détection de la matière grasse laitière

Pour repérer les nombres d'onde influencés par la matière grasse laitière, la MG extraite de chaque lait est passée à 3 reprises dans le spectromètre du moyen infrarouge. Ensuite, une comparaison des spectres de laits et des matières grasses correspondantes est effectuée pour déceler ces zones clés du spectre (Matériel & Méthodes, point 2.4.). Les graphiques mentionnés à la figure 17 montrent le caractère différencié des spectres de lait entier standard et enrichi pour certains nombres d'onde. En effet, certains écarts-types représentés sur le spectre de chaque type de lait ne s'interpénètrent pas. Ceci s'explique probablement par une différence dans le profil en acides gras des laits analysés. Cependant, même si d'autres se chevauchent, conserver ces nombres d'onde reste utile car en étant impliqués dans la dosage de la matière grasse, ils pourraient exprimer des similitudes dans le profil en acides gras.

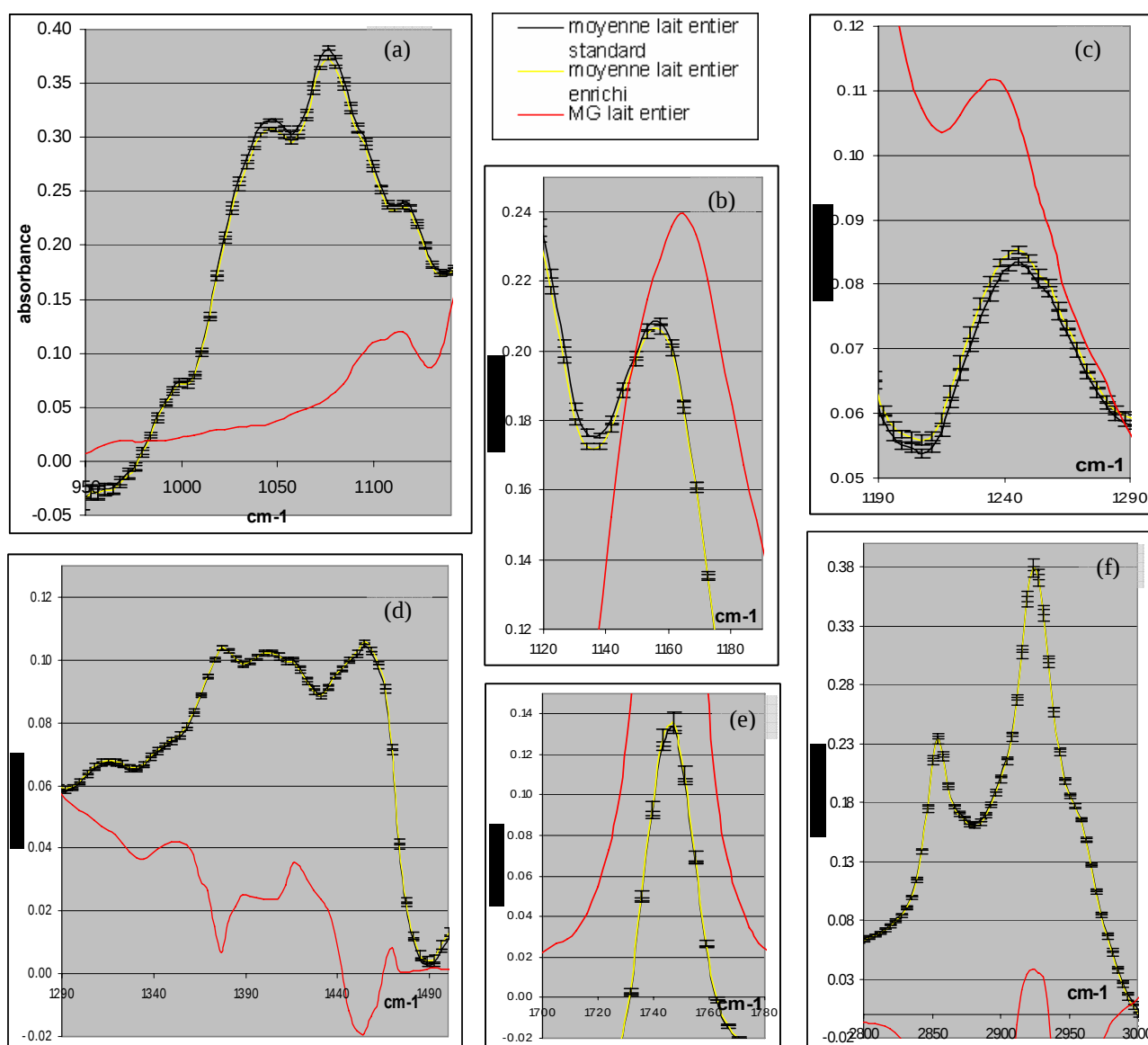
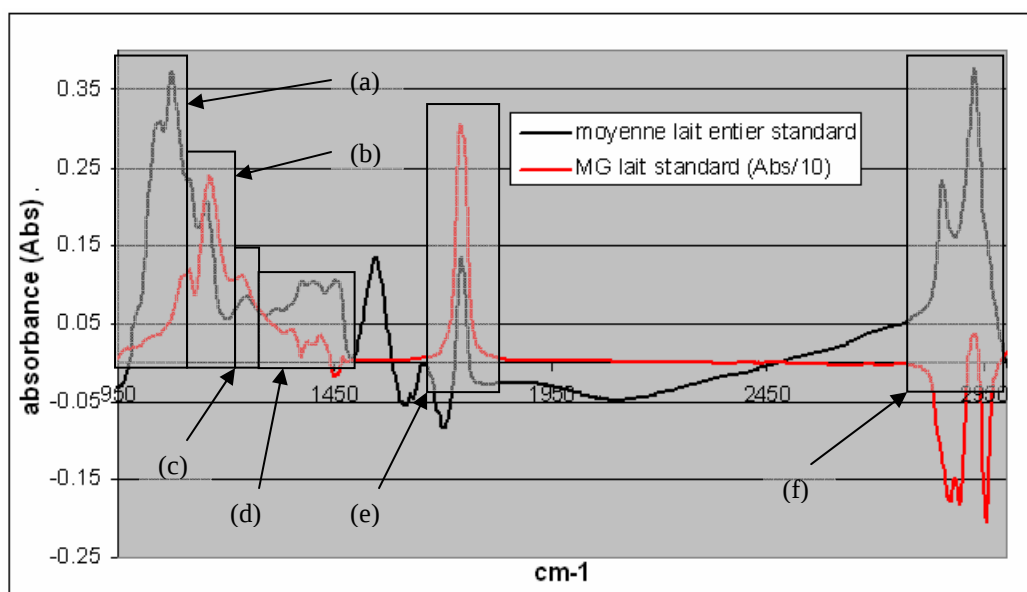


Figure 17 : Zones spectrales impliquées dans la quantification de la MG.

Une approche statistique conclut également à la non-similarité de ces deux spectres et ceci de manière très hautement significative. De plus, elle précise que les pics S1, S2, S3 et S5, S8, S9 sont plus impliqués, respectivement, dans le profil en acides gras du lait enrichi et standard.

L'obtention d'un pic significatif pour le nombre d'onde 1745 cm^{-1} était prévisible car la fréquence fondamentale de résonance des groupements C=O, caractéristique des acides gras (Figure 2), est située à cet endroit (COATES, 2000; LOUIS, 1993). De plus, la procédure SAS 'PROC CANDISC' a montré que le pic le plus important pour caractériser le lait enrichi est S9, situé à environ 1550 cm^{-1} . Il s'avère que la fréquence de résonance présente aux alentours de 1600 cm^{-1} serait celle de C=C. De même, le pic S8 situé vers 1470 cm^{-1} pourrait correspondre à la fréquence de résonance du groupement $-\text{CH}_2$ (COATES, 2000). Il serait donc vraisemblable que les pics S9 et S8 indiquent une proportion en acides gras insaturés distincte dans ces deux laits. Cependant, l'interprétation de l'entièreté du spectre de lait n'est pas aussi simple car ce dernier résulte d'une multitude d'interactions inter-atomiques et moléculaires.

La performance du système de conservation

La performance du système de conservation par congélation à $-26 \pm 2\text{ °C}$ est jugée par superposition des spectres émanant d'échantillons congelés et frais. Aucune différence spectrale n'a pu être mise en évidence pour les nombres d'onde sélectionnés dans cette étude. Par conséquent, la méthode de conservation adoptée pour le présent travail est efficace.

L'analyse chromatographique

1.4.1. Profil en acides gras des laits analysés

Afin d'identifier la (ou les) cause(s) de variabilité des absorbances pour les nombres d'onde sélectionnés, les matières grasses correspondantes sont analysées par chromatographie en phase gazeuse (Matériel & Méthodes, point 2.5.). La figure 18 présente ses résultats.

Comme annoncé précédemment, ces deux laits ont bien un profil en acides gras dans leur matière grasse distinct. Le lait entier standard semble en général être plus riche en saturés excepté pour l'acide stéarique C18:0, et à l'inverse, le lait naturellement enrichi en acides gras ω -3 possède une part plus conséquente d'insaturés. Par conséquent, les différences spectrales observées sont bien corrélées avec des profils en acides gras distincts.

1.4.2. Répétabilité et justesse de l'analyse chromatographique

Dans le but d'appuyer ces résultats, des analyses de la répétabilité et de la justesse de la méthode chromatographique sont effectuées (Matériel & Méthodes, point 2.6. et 2.7.).

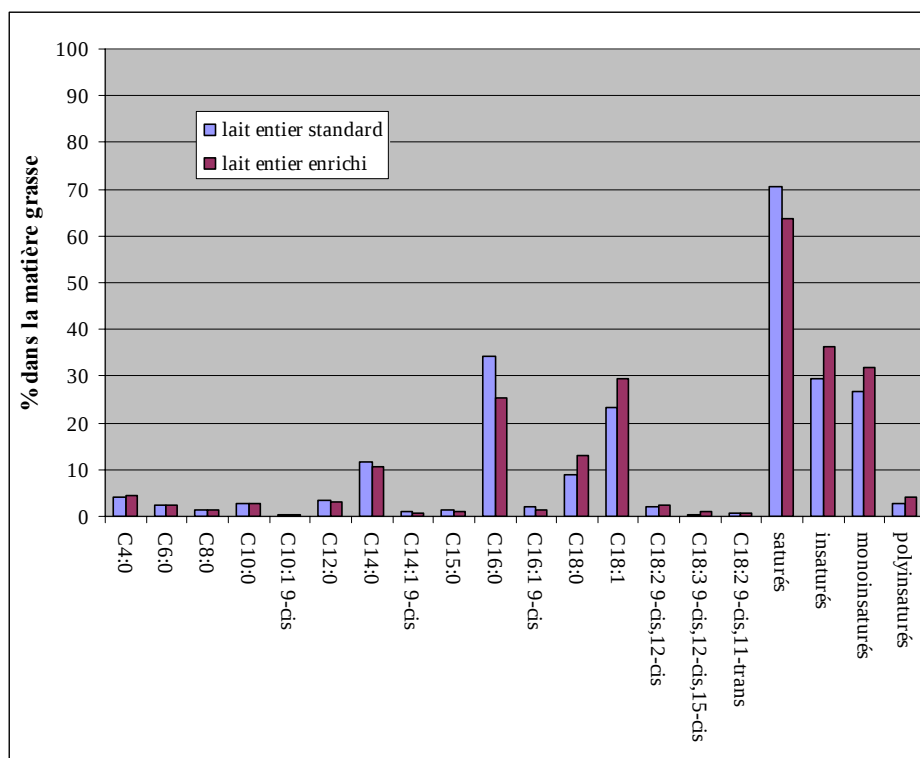


Figure 18 : Différences de profil en acides gras du lait entier standard et enrichi en acides gras oméga-3.

Le tableau 12 montre la répétabilité pour chaque acide gras et pour le groupe des saturés, insaturés totaux, monoinsaturés et polyinsaturés présents dans le profil sélectionné pour le présent travail.

Tableau 12 : Coefficients de variation en % des acides gras pris individuellement et des groupes de saturés, insaturés totaux, monoinsaturés et polyinsaturés présents dans le profil en acides gras sélectionné.

acide gras	coeff. variation lait standard	coeff. variation lait enrichi
C4:0	11.8	11.5
C6:0	12.1	13.2
C8:0	11.2	10.3
C10:0	3.0	0.7
C10:1 9-cis	2.5	1.2
C12:0	1.1	1.1
C14:0	1.3	1.0
C14:1 9-cis	1.5	1.3
C15:0	2.1	1.1
C16:0	1.1	0.9
C16:1 9-cis	6.7	5.0
C18:0	0.8	0.8
C18:1	1.1	0.8
C18:2 9-cis,12-cis	2.9	1.2
C18:3 9-cis,12-cis,15-cis	1.6	1.2
C18:2 9-cis,11-trans	3.7	1.5
saturés	0.6	0.4
insaturés	1.5	0.7
monoinsaturés	1.4	0.7
polyinsaturés	2.9	1.2

Les acides gras à courte chaîne présentent l'inconvénient d'avoir une faible répétabilité individuelle mais au sein du groupe des saturés, la répétabilité totale reste acceptable vu que le coefficient de variation reste inférieure à 5 %. Les acides gras à chaîne carbonée plus conséquente ne posent aucun problème excepté le C16:1 *9-cis* qui est plus limite avec un coefficient de variation estimé à environ 6,7 %.

La justesse de la méthode chromatographique est évaluée à partir du beurre de référence BIPEA. Le tableau 13 reprend les taux moyens obtenus pour chaque acide gras à partir des sept analyses de beurre de référence. Ces résultats sont ensuite comparés avec les valeurs réputées justes émises par le BIPEA.

Tableau 13 : Valeurs moyennes pour les sept analyses de beurre BIPEA et les valeurs de référence s'y rapportant (exprimées en g / 100 g de beurre).

Noms AG	moyenne	référence
C4:0	4.5	3.3 +/- 0.4
C6:0	2.3	2.0 +/- 0.4
C8:0	1.7	1.3 +/- 0.4
C10:0	3.5	3.1 +/- 0.4
C10:1 <i>9-cis</i>	0.4	0.3 +/- 0.4
C12:0	4.0	3.8 +/- 0.4
C14 iso	0.1	0.1 +/- 0.4
C14:0	12.3	11.8 +/- 0.9
C14:1	1.1	1.1 +/- 0.4
C15 iso	0.3	0.3 +/- 0.4
C15 aiso	0.5	0.5 +/- 0.4
C15:0	1.2	1.2 +/- 0.4
C16 iso	0.3	0.3 +/- 0.4
C16:0	33.9	32.0 +/- 2.5
C16:1	1.5	1.8 +/- 0.4
C17 iso	0.5	0.4 +/- 0.4
C17 aiso	0.5	0.5 +/- 0.4
C17:0	0.7	0.6 +/- 0.4
C17:1	0.3	0.3 +/- 0.4
C18 iso	0.1	0.0 +/- 0.4
C18:0	9.9	9.8 +/- 0.8
C18:1 <i>9-cis</i>	18.3	22.3 +/- 1.8
C18:2 <i>9-cis,12-cis</i>	1.6	
C18:3 <i>9-cis,12-cis,15-cis</i>	0.4	0.5 +/- 0.4
C20:0	0.0	0.1 +/- 0.4
C20:1	0.1	0.1 +/- 0.4

Seuls les acides butyrique et oléique montrent des concentrations différentes de celles données par le BIPEA. La valeur plus élevée du C4:0 est probablement intéressante car elle pourrait traduire une grande précaution lors de l'analyse afin d'éviter les pertes par volatilisation (le C4:0 étant le plus volatil). Dans cette présente étude, seuls les groupes des saturés, insaturés totaux, monoinsaturés et polyinsaturés seront envisagés ainsi que quelques acides gras mais le groupe des C18:1 sera représenté par le C18:1 *9-cis* mais également par d'autres isomères de position de la double liaison ou de configuration (*cis* ou *trans*), par exemple, le C18:1 *11-trans*.

En conclusion, la méthode chromatographique choisie pour la présente étude possède une justesse et une répétabilité acceptables excepté pour les acides gras à courte chaîne ($C \leq 10$). En effet, les valeurs obtenues pour le beurre de référence par les analyses chromatographiques adoptées pour le présent travail sont en adéquation avec celles émises par le bureau BIPEA et les coefficients de variation obtenus pour les acides gras étudiés sont globalement tous inférieurs à 5 % exceptés ceux observés pour les acides gras dont la chaîne principale possède un nombre de carbones inférieur à dix.

Conclusion

Après cette expérience préliminaire, différentes conclusions peuvent être formulées. Premièrement, l'espace spectral à employer dans la suite du travail s'échelonnait de 950 à 3000 cm^{-1} excepté la zone de bruit de fond située entre 1585 et 1718 cm^{-1} .

Deuxièmement, dans cette zone clé, des différences spectrales significatives pour des profils en acides gras distincts ont pu être mises en évidence et certaines d'entre elles ont même pu être interprétées.

Finalement, les méthodes d'analyse et de conservation adoptées dans ce travail se sont révélées être efficaces.

Par conséquent, la suite du travail peut être envisagée avec des conditions d'expérience inchangées.

2. EXPÉRIENCE PRINCIPALE

Introduction

Dans un premier temps, en employant les données spectrales du moyen infrarouge et celles obtenues par l'analyse chromatographique des échantillons récoltés en ferme, les droites de calibrage nécessaires à l'estimation du profil en acides gras du lait sont formulées par le logiciel WINISI III.

Ensuite, à partir des informations fournies par ces droites et par l'emploi de modèles mixtes, des différences génétiques intra- et inter-races pour le profil en acides gras sont estimées et étudiées. De plus, afin d'expliquer partiellement ces variations, les variabilités intra- et inter-races de l'activité de la delta-9 désaturase sont aussi analysées.

L'élaboration des droites de calibrage

A partir d'un fichier reprenant toute la base de données (code d'identification de l'animal, données spectrales et taux en MG), une analyse en ACP est effectuée par le logiciel WINISI III (Matériel & Méthodes, point 3.5.). De celle-ci ressortent 52 échantillons dont l'échelle de variation de la teneur en matière grasse s'étend de 2,97 à 7,73 g / dl de lait. *In fine*, à cause de problèmes liés à l'analyse chromatographique, seuls 49 échantillons sont employés pour

estimer les droites de calibrage. L'annexe III reprend un des chromatogrammes avec l'identification des pics impliqués dans le profil en acides gras sélectionné pour le présent travail.

Comme pour les spectres, tous les résultats chromatographiques issus des échantillons sélectionnés et mentionnés à l'annexe IV sont encodés dans le logiciel WINISI III. Ce dernier exprime alors, selon la procédure PLS, une droite de calibrage pour chaque constituant de la MG étudié (C12:0, C14:0,...) à partir de tous les nombres d'ondes excepté les zones de bruit indiquées dans le point 1.2.2. (Matériel & Méthodes, point 3.7.). Le tableau 14 reprend les paramètres statistiques calculés à partir des résultats prédits par les diverses droites de calibrage formulées.

Tableau 14 : Paramètres statistiques calculés à partir des résultats prédits par les diverses droites de calibrage. Les teneurs en acides gras prédites par ces droites sont exprimées en % dans la MG ou en g / dl de lait.

	N	Mean	SD	SEC	RSQ	SECV	1-VR
MG (g/dl)	49	4.55	1.18	0.05	0.9984	0.06	0.9978
C4:0 (%)	49	6.26	2.02	1.42	0.5045	1.60	0.3894
C6:0 (%)	49	2.90	1.26	0.97	0.4105	0.98	0.4060
C8:0 (%)	49	1.54	0.68	0.43	0.5984	0.50	0.4640
C10:0 (%)	49	3.06	1.31	0.69	0.7246	0.90	0.5320
C10:1 9-cis (%)	48	0.27	0.16	0.10	0.6358	0.12	0.4460
C12:0 (%)	49	2.71	0.87	0.38	0.8068	0.53	0.6391
C14:0 (%)	49	9.28	1.95	0.87	0.8001	1.14	0.6669
C14:1 9-cis (%)	49	0.71	0.32	0.26	0.3434	0.28	0.2276
C15:0 (%)	49	0.98	0.29	0.18	0.6078	0.20	0.5305
C16:0 (%)	49	25.67	4.89	1.63	0.8896	3.50	0.4972
C16:1 9-cis (%)	49	1.32	0.46	0.18	0.8559	0.37	0.3682
C18:0 (%)	49	11.97	2.87	2.66	0.1374	2.77	0.0874
C18:1 (%)	49	29.19	5.74	3.14	0.7014	3.99	0.5265
C18:2 9-cis,12-cis (%)	49	1.96	0.46	0.35	0.4140	0.44	0.1057
C18:3 9-cis,12-cis,15-cis (%)	49	0.58	0.22	0.19	0.2651	0.20	0.1964
C18:2 9-cis,11-trans (%)	49	0.82	0.45	0.20	0.8017	0.37	0.3361
C4:0 (g/dl)	49	0.28	0.11	0.07	0.5911	0.08	0.5060
C6:0 (g/dl)	49	0.13	0.06	0.04	0.6905	0.04	0.5212
C8:0 (g/dl)	49	0.07	0.03	0.02	0.7472	0.02	0.5947
C10:0 (g/dl)	49	0.14	0.06	0.03	0.7743	0.04	0.6398
C10:1 9-cis (g/dl)	43	0.01	0.01	0.01	0.0480	0.01	0.0082
C12:0 (g/dl)	49	0.12	0.04	0.02	0.8200	0.02	0.7364
C14:0 (g/dl)	49	0.41	0.12	0.04	0.8959	0.05	0.8150
C14:1 9-cis (g/dl)	49	0.03	0.01	0.01	0.1178	0.01	0.0689
C15:0 (g/dl)	49	0.04	0.01	0.01	0.5825	0.01	0.4036
C16:0 (g/dl)	49	1.17	0.39	0.11	0.9125	0.17	0.8154
C16:1 9-cis (g/dl)	49	0.06	0.03	0.02	0.7504	0.02	0.6470
C18:0 (g/dl)	49	0.56	0.24	0.12	0.7278	0.13	0.6890
C18:1 (g/dl)	49	1.34	0.51	0.12	0.9488	0.18	0.8815
C18:2 9-cis,12-cis (g/dl)	49	0.09	0.03	0.02	0.7555	0.02	0.6225
C18:3 9-cis,12-cis,15-cis (g/dl)	49	0.03	0.01	0.01	0.1997	0.01	0.1379
C18:2 9-cis,11-trans (g/dl)	49	0.04	0.02	0.02	0.1198	0.02	0.0686
saturés (%)	49	64.87	6.13	2.94	0.7699	3.75	0.6339
insaturés (%)	49	35.13	6.13	2.94	0.7699	3.75	0.6339
monoinsaturés (%)	49	31.74	5.87	3.26	0.6904	4.10	0.5220
polyinsaturés (%)	49	3.39	0.77	0.68	0.2177	0.74	0.1044
saturés (g/dl)	49	2.95	0.78	0.12	0.9768	0.20	0.9384
insaturés (g/dl)	49	1.65	0.57	0.29	0.7393	0.34	0.6578
monoinsaturés (g/dl)	49	1.44	0.55	0.18	0.8895	0.22	0.8479
polyinsaturés (g/dl)	49	0.14	0.05	0.03	0.4338	0.04	0.3924

* C18 :1 correspond à la somme des pics identifiés pour ce type d'AG ; N = nombre d'échantillons ; Mean = moyenne ; SD = écart-type ; SEC = erreur standard lors du calibrage ; RSQ = r², coefficient de détermination pour la droite de calibrage ; SECV = erreur standard lors de la cross-validation ; 1-VR = équivalent au r² pour la cross-validation.

A l'examen du tableau 14, l'efficacité de prédiction des teneurs en acides gras dans la matière grasse laitière (% MG) par les droites de calibrage est plus faible (r^2 de prédiction inférieur) que celle observée pour les quantités en ces mêmes acides gras dans le lait (g / dl). Ceci peut s'expliquer vraisemblablement par un phénomène de lissage. En effet, un pourcentage élevé, par exemple, en C4:0 peut correspondre à un taux en matière grasse bas et vice-versa. Autrement dit, la distribution spatiale des quantités d'acides gras dans le lait est plus cohérente que celle des teneurs en ces mêmes acides gras dans la matière grasse.

Pour le caractère matière grasse, une relation parfaite est établie avec un r^2 de calibration de 0,9984 et un r^2 de prédiction de 0,9978. Ces valeurs étaient prévisibles vu que la teneur en matière grasse est déjà estimée actuellement par le contrôle laitier avec une performance excellente.

Les graphiques de la figure 19 montrent la tendance de variation des r^2 de prédiction des droites de calibrage en fonction des quantités en acides gras dans le lait ou de leurs teneurs dans la matière grasse. Les valeurs des r^2 de prédiction des droites estimant les teneurs en acides gras dans la MG (% dans la MG) ne varient pas en fonction de l'importance de ces derniers dans la matière grasse laitière. La même constatation peut être formulée en posant en graphique les nombres de carbone en fonction des r^2 de prédiction (données non montrées). Par contre, les quantités en acides gras dans le lait (g / dl de lait) influencent de manière logarithmique ($r^2 = 0,7343$) la valeur finale du r^2 de prédiction des droites de calibrage estimant ces teneurs. Cependant, le r^2 de prédiction des acides gras insaturés (1,6506 g / dl) est inférieur à la valeur attendue.

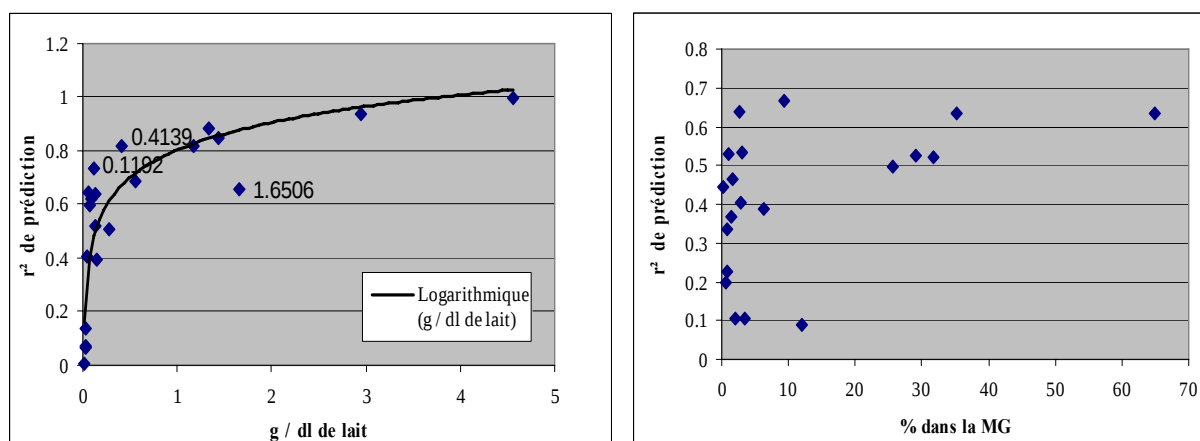


Figure 19 : Tendance de variation des r^2 de prédiction pour les différentes droites de calibrage en fonction des quantités prédites en acides gras (g / dl de lait) dans le lait ou dans la matière grasse (% MG).

Pour les droites de calibrage exprimées en g / dl, un classement basé sur les quantités d'acides gras dans le lait est réalisé.

Pour les acides gras dont la quantité estimée dans le lait se situe :

- entre 0,01 et 0,12 g / dl de lait, le r^2 de prédiction attendu est compris entre 0,0050 et 0,4000 ;
- entre 0,14 et 0,56 g / dl de lait, le r^2 de prédiction attendu est compris entre 0,5000 et 0,7000 ;
- entre 1,17 et 1,34 g / dl de lait, le r^2 de prédiction attendu est compris entre 0,8000 et 0,9000 ;
- vers 2,9 g / dl de lait, le r^2 de prédiction attendu est situé vers 0,9400.

Par conséquent, en règle générale, plus la quantité d'un acide gras est importante dans le lait, plus la valeur du r^2 de prédiction attendue pour sa droite de calibrage pourrait élevée.

Du fait du changement de colonne chromatographique (similaire à celle utilisée précédemment), la répétabilité de la méthode est de nouveau estimée à partir du beurre de référence BIPEA (Tableau 15). Les analyses de beurre sont effectuées pendant la même session chromatographique que les échantillons de lait sélectionnés. Comme précédemment, les acides gras à courte chaîne présentent l'inconvénient d'avoir une répétabilité insuffisante (coefficient de variation largement supérieur à 5 %). Cependant, celles obtenues pour le groupe des saturés, insaturés totaux, monoinsaturés et polyinsaturés restent acceptables (CV inférieur à 5 %).

Tableau 15 : Coefficient de variation (CV) (en %) et intervalle de confiance (IC) (en g / 100 g de beurre) estimés à partir des analyses du beurre de référence.

	CV	IC
C4:0	18.46	5.48 +/- 2.51
C6:0	23.22	3.12 +/- 1.80
C8:0	23.02	1.72 +/- 0.98
C10:0	13.81	3.01 +/- 1.03
C10:1	22.08	0.31 +/- 0.17
C12:0	1.04	3.59 +/- 0.09
C14:0	2.40	11.20 +/- 0.67
C14:1 9-cis	3.13	1.02 +/- 0.08
C15:0	4.06	1.16 +/- 0.12
C16:0	3.82	30.52 +/- 2.89
C16:1 9-cis	4.54	1.63 +/- 0.18
C18:0	3.75	9.58 +/- 0.89
C18:1 *	3.97	24.77 +/- 2.44
C18:2 9cis,12-cis	5.07	1.78 +/- 0.22
C18:3 9-cis,12-cis,15-cis	5.33	0.47 +/- 0.06
C18:2 9-cis,11-trans	1.77	0.64 +/- 0.03
saturés	1.36	69.38 +/- 2.34
insaturés	3.07	30.62 +/- 2.34
monoinsaturés	3.35	27.73 +/- 2.31
polyinsaturés	3.98	2.89 +/- 0.29

* C18 :1 correspond à la somme des pics identifiés pour ce type d' AG ; N = nombre d'échantillons.

Malheureusement, le C18:3 9-cis,12-cis,15-cis a une répétabilité limite (CV au environ de 5 %). Vu que sa quantité dans le lait est assez faible (0,4 g / dl), l'impact d'une telle variation est plus importante que s'il s'agissait d'acides gras en plus forte proportion dans le lait. Par

conséquent, formuler l'expression d'une droite de calibrage pour cet AG à partir de ces données chromatographiques n'est pas très intéressant car l'erreur d'estimation se répercutera sur la valeur prédite par la droite. Même si le coefficient de variation pour le C18:2 *9-cis,12-cis* est proche de celui du C18:3 *9-cis,12-cis,15-cis*, l'impact de cette variation est plus limité car sa proportion dans le lait est plus importante (1,6 g / dl).

Les résultats en g / dl de lait ont été exprimés à partir des teneurs en acides gras dans la matière grasse. Par conséquent, des erreurs dans l'estimation de ces dernières liées aux aires calculées par le chromatographe se répercutent inmanquablement sur les quantités dans le lait. Ceci est d'autant plus vrai pour les acides gras à courte chaîne qui possèdent des répétabilités individuelles mauvaises (Tableau 15). Deuxièmement, les teneurs dans le lait ou dans la matière grasse sont légèrement surestimés. En effet, par la méthode de calcul adoptée, toute la matière grasse présente dans le lait est supposée contenir que les acides gras repris dans le profil sélectionné (Matériel & Méthodes, point 2.5. et 3.6.).

En supposant comme acceptable des droites de calibrage dont le r^2 de prédiction est supérieur à 0,6000, les différents modèles à utiliser dans la suite de cette étude sont ceux qui prédisent les quantités en C10:0, C12:0, C14:0, C16:0, C18:0, C18:1, C18:2 *9-cis,12-cis*, saturés, insaturés totaux et monoinsaturés dans le lait. De même, les droites de calibrage estimant les teneurs en C12:0, C14:0, saturés et insaturés totaux dans la matière grasse laitière peuvent également être employées. Cependant, le modèle prédisant la quantité en C10:0 n'a pas été retenu à cause de la trop faible répétabilité des mesures pour cet acide gras. Deuxièmement, les droites de calibrage estimant les taux en acides gras insaturés dans le lait et dans la matière grasse ne seront également pas reprise. En effet, la somme du taux en saturés et en insaturés faisant 100 %, quand l'un des deux termes est trouvé, l'autre en découle automatiquement. Il n'y aura donc que les droite estimant les taux en saturés dans le lait et la matière grasse qui seront conservées.

Les différences intra- et inter-races

Les caractéristiques de la population animale étudiée sont reprises à l'annexe V.

2.3.1. Composition du profil en acides gras

La première approche envisagée dans le présent travail est l'analyse des différences intra- et inter-races du profil en acides gras dans le lait et la matière grasse laitière (voir Matériel & Méthodes point 4.2.). Malheureusement, la race normande n'a pu être reprise dans cette analyse car, à la fin de l'échantillonnage, celle-ci était en effectif trop réduit (deux animaux)

pour obtenir des résultats représentatifs. Elle sera donc absente de toutes les comparaisons inter-races.

2.3.1.1. Profil en acides gras dans le lait

Le tableau 16 reprend les résultats correspondants à l'effet race obtenus par le modèle mixte pour les quantités en acides gras dans le lait (g / dl de lait ou % dans le lait). Seules les droites de calibrage présentant un r^2 de prédiction supérieur à 0,6000 sont utilisées. Dans une optique de standardisation, ces différences inter-races sont ensuite divisées par la racine carrée de la variance totale ($\sqrt{\sigma_{résiduelle}^2 + \sigma_{animale}^2}$), la variance animale étant estimée à partir des répétitions sur les mêmes animaux (Tableau 17).

Tableau 16 : Différences inter-races brutes du profil en acides gras pour les diverses races étudiées par rapport à la Holstein (en g / dl de lait).

	g / dl de lait									
	MG	SAT	MONO	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2
BBM	-0.287	-0.244	-0.110	-0.003	-0.020	-0.125	-0.006	-0.048	-0.046	-0.001
Pie-rouge	-0.075	-0.003	-0.094	0.008	0.008	-0.028	-0.006	-0.008	-0.068	-0.003
Montbéliarde	0.338	0.320	0.019	0.023	0.075	0.090	-0.004	0.067	0.025	0.002
Jersey	0.875	0.702	0.225	0.033	0.093	0.212	0.005	0.144	0.190	0.016

C16:1 = C16:1 9-cis ; C18:2 = C18:2 9-cis,12-cis.

Tableau 17 : Différences inter-races standardisées exprimées en unités écart-type du profil en acides gras du lait (g / dl de lait) pour les diverses races étudiées par rapport à la Holstein.

	unités écart-type									
	MG*	SAT*	MONO*	C12:0*	C14:0*	C16:0*	C16:1*	C18:0*	C18:1*	C18:2*
BBM	-0.48	-0.56	-0.47	-0.11	-0.30	-0.69	-0.54	-0.49	-0.21	-0.09
Pie-rouge	-0.12	-0.01	-0.40	0.32	0.13	-0.15	-0.52	-0.08	-0.31	-0.23
Montbéliarde	0.56	0.73	0.08	0.97	1.12	0.50	-0.29	0.68	0.11	0.19
Jersey	1.46	1.60	0.95	1.37	1.40	1.16	0.43	1.45	0.88	1.25

* acides gras exprimés en g / dl de lait ; C16:1 = C16:1 9-cis ; C18:2 = C18:2 9-cis,12-cis.

La teneur en matière grasse dans le lait est un caractère déjà fortement étudié d'un point de vue génétique. Le taux moyen en matière grasse du lait des races étudiées pour le présent travail sont reprises dans le tableau 18.

Tableau 18 : Teneur moyenne brute en matière grasse dans le lait des races étudiées.

Races laitières	Taux moyen en MG
Blanc Bleu Mixte (BBM)	4,07 %
Holstein	4,09 %
Pie-rouge	4,10 %
Montbéliarde	4,15 %
Jersey	5,75 %

A l'examen du tableau 16, la BBM et la Pie-rouge détiennent un taux en MG dans leur lait, respectivement, de 0,287 et 0,075 % inférieur à celui de la Holstein. De même, la Montbéliarde et la Jersey produisent un lait plus gras, respectivement, de 0,338 et 0,875 % par rapport à celui de la race de référence. Ces résultats diffèrent légèrement de ceux mentionnés

dans le tableau 18. Ceci s'explique vraisemblablement par le traitement des données. En effet, les données mentionnées dans le tableau 16 correspondent aux différences inter-races estimées dues à l'effet 'race' alors que les valeurs indiquées dans le tableau 18 correspondent aux moyennes brutes estimées pour les laits analysés. De plus, des tendances opposées pour la matière grasse laitière des Pie-rouges par rapport à celle de l'Holstein est observée entre le tableau 16 et 18. Les races dans le tableau 18 sont considérées à partir de l'activité d'élevage. Par conséquent, en plus de traitement des données distinct, le fait qu'une plus grande fraction de gènes Holstein (plus de 50 %) ait été observée pour des animaux préalablement classés comme Pie-rouge (code 02) pourrait également expliquer la divergence de conclusion observée entre ces deux tableaux.

Par opposition à la teneur en matière grasse, le profil en acides gras pour différentes races laitières est moins étudié. PALMQUIST et al. [1992] ont mené une étude de comparaison de la composition en acides gras du lait d'animaux de race Jersey et Holstein. Ils ont ainsi affirmé que le lait de Jersey était 8 à 42 % plus riche en acides gras à courte chaîne (C6:0 → C14:0), 13 % supérieur en C18:0 et 15 % inférieur en C18:1 *9-cis* par rapport à celui d'animaux Holstein. Les résultats fournis par le tableau 16 et ceux issus du modèle mixte (plus de détails, Annexe VI) montrent que le lait de Jersey est supérieur de 36 %, 24 %, 18 % et 12 %, respectivement, en C12:0, C14:0, C18:0 et C18:1 par rapport à celui d'Holstein. Les pourcentages de variation obtenus pour le C12:0 et C14:0 sont donc en adéquation avec ceux obtenus par PALMQUIST et al. [1992]. La divergence de conclusion pour le C18:1 et l'augmentation du C18:0 entre ces deux études s'expliquent probablement par une hétérogénéité raciale chez les animaux étudiés par PALMQUIST et al. [1992]. En effet, les résultats mentionnés dans le tableau 17 concernent des animaux renfermant 100 % de gènes Jersey ou Holstein dans leur patrimoine génétique. De plus, une faiblesse de précision dans la prédiction des quantités en acides gras par les droites de calibrage utilisées et / ou un manque de représentants au sein de chaque race dans le présent travail pourraient également être la cause de ces différences.

Cette étude ne s'est pas cantonnée aux seules races Jersey et Holstein mais a également repris la BBM, la Montbéliarde et la Pie-rouge. D'après les données mentionnées dans le tableau 17, un classement des ces diverses races laitières sur base d'une qualité nutritionnelle théorique de leur lait peut être envisagé. En postulant qu'un lait de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure devrait être composé :

- d'un taux en matière grasse le plus faible ;
- d'une quantité ou d'une teneur en acides gras saturés les plus petites ;
- d'une quantité ou d'un taux en acides gras insaturés les plus élevés ;

un classement est réalisé. La première place est occupée par la BBM, suivi par la Holstein, la Pie-rouge, la Montbéliarde et la Jersey. La race Blanc Bleu Mixte (**BBM**) se démarque des

autres races par son taux en acides gras saturés et, plus particulièrement en C14:0, le plus faible dans son lait. Ceci est intéressant car l'impact de cet AG sur le risque de maladies cardiovasculaires chez l'homme est considéré comme le plus important. Par contre, la Jersey est la race qui produit, dans son lait, la grande quantité d'insaturés tant mono- que polyinsaturés. Cette observation pourrait s'expliquer par l'unité employée (g / dl de lait). En effet, comme les BBM renferment dans leur lait la teneur en MG la plus faible (Tableau 18), il est normal que les quantités en acides gras soient plus faibles que celles émanant, par exemple, d'un lait de Jersey qui possède un taux en MG nettement supérieur. Par conséquent, il est logique d'observer chez les animaux de race Jersey, un lait plus riche, en quantités absolues, en saturés, monoinsaturés et polyinsaturés. Cependant, malgré une teneur en MG plus faible, les quantités en acides gras polyinsaturés de type C18:2 *9-cis,12-cis*, et en monoinsaturés de type C18:1 dans le lait de BBM ne sont pas les plus basses. Cette tendance pourrait s'expliquer par un pourcentage en insaturés et, plus particulièrement en C18:2 *9-cis,12-cis* et en C18:1, dans la matière grasse laitière plus conséquent au sein de cette race. Les propriétés bénéfiques de ces AG ont été recensées dans de nombreuses publications (voir Bibliographie, point 3.5.3.) conférant ainsi à ce lait un intérêt pour la santé humaine.

D'après le tableau 17, les animaux de race Pie-rouge produisent des quantités en acides gras dans leur lait généralement plus faibles que dans celui d'Holstein. Ceci est vraisemblablement dû à leur taux en matière grasse inférieure. Cependant, leur lait renferme des teneurs en C12:0 et C14:0 plus importantes pouvant suggérer des proportions plus élevées en ces deux acides gras saturés dans leur matière grasse par rapport à celles observées chez les animaux Holstein. Les Montbéliardes renferment globalement dans la matière grasse de leur lait une quantité en acides gras supérieure à la Holstein excepté pour le C16:1 *9-cis*. Vu que leur lait possède une teneur en matière grasse plus importante que celui de la Holstein, la faible quantité en C16:1 *9-cis* dans le lait indique probablement une proportion plus petite de cet AG dans la composition de la matière grasse laitière.

La première place occupée par la race BBM dans le classement montre qu'il pourrait être possible d'obtenir un lait de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure sur base d'un simple choix racial mais également qu'un faible taux en matière grasse n'est pas forcément lié à une proportion dans la matière grasse laitière ou à une quantité dans le lait en C18:1 ou C18:2 *9-cis,12-cis* moindres.

Afin d'estimer le degré de signification des différences du profil en acides gras dans le lait des diverses races étudiées par rapport à la race de référence Holstein, les probabilités des tests F sont indiquées dans le tableau 19.

Les valeurs reprises dans le tableau 19 et dans la rubrique 'Toutes les races' correspondent aux probabilités que le profil en acides gras du lait des races étudiées soit identique est à celui

de la Holstein. A l'examen de ce tableau, les quantités en saturés (**SAT**) ou en C14:0 dans le lait diffèrent entre races de manière très hautement significative ('Toutes les races' < 0,01 %).

Tableau 19 : Probabilités des tests F de signification des différences dans le profil en acides gras du lait (g / dl de lait) pour les races étudiées par rapport à la Holstein.

	Probabilités (en %)									
	MG*	SAT*	MONO*	C12:0*	C14:0*	C16:0*	C16:1*	C18:0*	C18:1*	C18:2*
BBM	13.46	8.65	13.97	73.10	34.91	3.25	8.88	12.80	49.88	78.59
Pie-rouge	62.54	98.23	11.61	22.58	62.65	54.87	3.80	74.46	21.42	37.03
Montbéliarde	9.84	3.72	81.35	0.65	0.14	14.83	37.98	4.79	73.29	58.06
Jersey	0.01	< 0.01	0.93	0.05	0.03	2.00	22.96	0.01	1.60	0.10
Toutes les races	0.05	< 0.01	2.69	0.04	< 0.01	0.27	7.42	0.04	9.92	1.76

* Acides gras exprimés en g / dl de lait ; C16:1 = C16:1 9-*cis* ; C18:2 = C18:2 9-*cis*,12-*cis* ; MG = matière grasse;

MONO = quantité d'acides gras monoinsaturés dans le lait; SAT = quantité d'acides gras saturés dans le lait.

Pour les constituants comme la MG, le C12:0, le C16:0 ou le C18:0, les différences inter-races observées sont hautement significatives (0,01 % < 'Toutes les races' < 1 %). De même, les teneurs en monoinsaturés (**MONO**) et en C18:2 9-*cis*,12-*cis* dans le lait varient entre races de manière significative (1 % < 'Toutes les races' < 5 %). Ces observations sont très intéressantes car elles indiquent que des différences dans le profil en acides gras existent entre races et qu'un simple choix racial pourrait modifier globalement la qualité nutritionnelle de la matière grasse du lait. Seuls les C16:1 9-*cis* et C18:1 ne semblent pas se démarquer par l'effet de la race. Le nombre restreint d'échantillons analysés dans la base de données pourrait en être la cause. En effet, en examinant la méthodologie adoptée dans l'analyse de la variance et, plus spécifiquement, la distribution F de FISHER-SNEDECOR, si le nombre d'échantillons augmente, la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle ($H_0 \equiv \text{BBM} + \text{Jersey} + \text{Pie-rouge} + \text{Montbéliarde} = \text{Holstein}$) s'élève. Par conséquent, les différences inter-races pour les composés qui jusqu'ici ne se distinguaient pas par un effet racial, pourraient devenir significatives si la base de données s'étoffait.

Les valeurs reprises dans les rubriques 'BBM', 'Pie-rouge',... représentent les probabilités que le lait issu de la race considérée (BBM, Pie-rouge,...) contienne une teneur différente à celle de l'Holstein pour le constituant de la matière grasse étudié (C12:0, C14:0,...).

Les résultats mentionnés dans la rubrique 'Jersey' montre que cette race produit un lait au profil en acides gras significativement différent de celui de la Holstein excepté pour le C16:1 9-*cis*. Vu leur lait riche en graisse, la faible teneur en cet AG dans le lait de Jersey pourrait probablement s'expliquer par une proportion en C16:1 9-*cis* dans leur MG supérieure à celle de la Holstein. Les différences observées par rapport à la race de référence pour le taux en saturés dans le lait de Jersey sont très hautement significatives (0,1 % < 'Jersey' < 1 %). Ceci est en adéquation avec les conclusions formulées par PALMQUIST et al. en 1992 précisant que la Jersey possédait une teneur en saturés dans le lait plus importante que dans celui de la Holstein.

La seconde race laitière qui se démarque le plus de la race de référence est la Montbéliarde. Ces animaux produisent un lait se distinguant de manière hautement significative pour les teneurs en C12:0 et C14:0 ; et significative pour les taux en acides gras saturés et C18:0 par rapport à la Holstein. Une forte proportion en saturés et, plus particulièrement, en C12:0 et C14:0 dans leur matière grasse pourrait expliquer la richesse en saturés observée dans leur lait. Par conséquent, l'hypothèse postulant que le lait de Montbéliarde renferme dans sa matière grasse une proportion moindre en acides gras insaturés pourrait vraisemblablement être formulée.

Le profil en acides gras du lait de BBM se démarque moins fortement de la Holstein que ce qui avait été annoncé quelques lignes auparavant. En effet, elle ne semble se distinguer de la race de référence que pour sa teneur en C16:0 plus faible. Cependant, les probabilités observées dans le tableau 19 pour les autres acides gras ne sont pas très élevées tendant ainsi à montrer un profil en acides gras légèrement différencié de la BBM sauf pour le C12:0, C18:2 *9-cis,12-cis* et C18:1. Le caractère indifférencié du lait de BBM par rapport à celui de la Holstein pour les C18:1 et C18:2 *9-cis,12-cis* pourrait indiquer une plus forte proportion de ces deux acides gras dans la matière grasse de la BBM.

Malgré une différence significative observée pour leur teneur en C16:1 *9-cis* dans le lait, les probabilités mentionnées pour les autres acides gras étudiés sont élevées tendant vraisemblablement à montrer une similitude dans le profil en acides gras du lait de Pie-rouge et d'Holstein.

2.3.1.2. Profil en acides gras dans la matière grasse laitière

A côté de l'étude de la variabilité intra- et inter-races des quantités en acides gras estimées dans le lait, une analyse identique est menée sur les proportions occupées par ces AG dans la matière grasse laitière (% MG ou g / 100 g de beurre). Seuls le groupe des saturés, le C12:0 et le C14:0 sont étudiés car seules leurs droites de calibrage présentent un r^2 de prédiction supérieur à 0,6000. Le modèle mixte utilisé recense un effet fixe supplémentaire, une régression sur la matière grasse. Cette pratique tend à éviter tout biais pouvant provenir de la variabilité du taux en MG dans les différents laits étudiés. Comme dans le premier cas envisagé, et dans un but de standardisation, les différences inter-races issues du modèle mixte (Tableau 20) sont divisées par la racine carrée de la variance totale (Tableau 21).

Tableau 20 : Différences inter-races brutes du profil en acides gras de la matière grasse laitière pour les diverses races étudiées par rapport à la Holstein (en % dans la matière grasse).

	% MG		
	SAT	C12:0	C14:0
BBM	-0.594	0.004	0.029
Pie-rouge	0.985	0.058	0.159
Montbéliarde	1.062	0.422	0.809
Jersey	0.769	0.297	0.477

Tableau 21 : Différences inter-races standardisées exprimées en unités écart-type du profil en acides gras de la matière grasse laitière (% MG) pour les diverses races étudiées par rapport à la Holstein.

	unités écart-type		
	SAT*	C12:0*	C14:0*
BBM	-0.22	0.01	0.04
Pie-rouge	0.37	0.15	0.19
Montbéliarde	0.39	1.08	0.97
Jersey	0.29	0.76	0.57

* Acides gras exprimés en % dans la matière grasse

En postulant qu'une matière grasse laitière de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure devrait être composée :

- d'une quantité ou d'une teneur en acides gras saturés les plus petites ;
- d'une quantité ou d'un taux en acides gras insaturés les plus élevés ;

un classement est réalisé. Ce dernier est similaire à celui obtenu au point 2.3.1.1. excepté pour les deux dernières places. En effet, la première position est occupée par la BBM, suivi de la Holstein, la Pie-rouge, la Jersey et la Montbéliarde.

La plus forte proportion observée en acides gras saturés notamment de type C12:0 et C14:0 dans le lait de Montbéliarde est responsable de son recul dans le classement. Cette constatation semble confirmer l'hypothèse formulée précédemment mentionnant que le lait de Montbéliarde renfermait une proportion plus faible en acides gras insaturés dans sa matière grasse laitière.

A l'examen du tableau 21, les animaux Jersey produisent un profil en acides gras plus nuancé que celui décrit au point 2.3.1.1. pour celui du lait. En effet, leur lait ne contient pas la matière grasse la plus riche en acides gras saturés et, plus spécifiquement, en C12:0 et C14:0. Par conséquent, la dernière position occupée par cette race dans le premier classement était probablement dû à son taux en MG plus élevé qui engendrait une augmentation de toutes les teneurs en acides gras dans le lait. En conclusion, le beurre issu d'animaux Jersey contient moins d'acides saturés qu'un beurre de Pie-rouge ou de Montbéliarde. Cependant, le beurre de Montbéliarde est plus riche en C12:0 et C14:0 que celui produit à partir du lait de Pie-rouge.

Le tableau 21 semble vérifier l'hypothèse mentionnée au point 2.3.1.1. précisant que les animaux de race Pie-rouge produisaient dans leur matière grasse laitière une proportion plus importante en acides gras saturés.

Finalement, La BBM, quant à elle, continue à se démarquer des autres races en renfermant au sein de sa MG la proportion en saturés la plus faible. Ceci semble corroborer la conclusion formulée au point précédemment postulant que la matière grasse de la BBM possédait la fraction insaturée la plus conséquente. Cette constatation est très intéressante car cela signifie qu'un beurre plus riche en insaturés peut être obtenu sur base d'un simple choix raciale.

Afin d'estimer le degré de signification des différences du profil en acides gras de la matière grasse laitière des diverses races étudiées par rapport à la Holstein, les probabilités des tests F sont mentionnées dans le tableau 22.

Comme précisé précédemment, les valeurs reprises dans la rubrique 'Toutes les races' correspondent aux probabilités que la composition en acides gras de la MG laitière des races étudiées soit identique à celle de la Holstein.

Tableau 22 : Probabilités des tests F de signification des différences dans le profil en acides gras exprimé en % dans la matière grasse du lait pour les races étudiées par rapport à la Holstein.

	Probabilités (en %)		
	SAT*	C12:0*	C14:0*
BBM	49.52	97.56	91.18
Pie-rouge	15.68	56.88	45.20
Montbéliarde	25.72	0.22	0.47
Jersey	46.02	5.19	12.86
Toutes les races	33.35	1.10	3.21

* Acides gras exprimés en % dans la matière grasse.

D'après le tableau 22, la fraction occupée par les acides gras saturés dans la matière grasse laitière ne diffère pas sur base d'un effet racial. Par contre, les constituants de ce groupe tels que le C12:0 et C14:0, montrent des teneurs dans la MG qui varient de manière significative par rapport à celles estimées chez les animaux Holstein. Ceci pourrait suggérer l'hypothèse que la composition en acides gras saturés peut varier dans la matière grasse même si le taux en saturés reste constant.

Similaire à la rubrique 'Toutes les races, les valeurs 'BBM', 'Jersey',... reprises dans le tableau 22 représentent les probabilités que la MG du lait de la race considérée présente une composition distincte en acides gras de celle observée chez les animaux Holstein.

Seules les Montbéliardes se distinguent de manière hautement significative de la race Holstein pour les fractions en C12:0 et C14:0 contenues dans sa matière grasse laitière ($0,01 \% < \text{'Montbéliarde'} < 1 \%$). Ceci pourrait suggérer une proportion en saturés dans la matière grasse laitière des Montbéliardes globalement similaire à celle des Holsteins mais une composition en saturés différente (plus de C12:0 et C14:0 dans leur MG).

2.3.1.3. Variabilité intra-race du profil en acides gras

En estimant la répétabilité 'animale' ($\sigma_{\text{animale}}^2 / (\sigma_{\text{animale}}^2 + \sigma_{\text{résiduelle}}^2)$), l'estimation de la variabilité intra-race pour le profil en acides gras du lait est approchée (Tableau 23). En effet, la variance animale étant composée de la variance génétique et de la variance due à

l'environnement permanent, une répétabilité élevée pourrait suggérer une grande variance génétique et donc une variabilité intra-race importante.

L'héritabilité pour le caractère quantité de matière grasse estimé par INTERBULL [2005] pour les vaches laitières wallonnes de race Holstein est de 43 %. Cependant, les héritabilités estimées pour les taux, notamment en MG, au niveau des lactations sont généralement considérées comme supérieures. En effet, l'héritabilité moyenne estimée par DRUET et al. [2005] pour la première lactation est environ de 49 %.

Dans le cas présent, c'est la répétabilité 'animale' qui est estimée. Celle-ci, par opposition à l'héritabilité, englobe l'environnement permanent intra-lactation. Par conséquent, les répétabilités obtenues doivent être plus conséquente que les héritabilités mentionnées précédemment. En se basant sur les résultats communiqués par DRUET (communication personnelle) et utilisés dans l'article DRUET et al. [2005], la répétabilité 'animale' moyenne attendue serait d'environ 60 %. En conclusion, l'estimation de la répétabilité pour le caractère taux de matière grasse (47,83 %) obtenue dans la présente étude est donc plausible.

Tableau 23 : Répétabilité animale pour le profil en acides gras du lait exprimé en g / dl de lait et en % dans la matière grasse.

	Répétabilité animale (en %)	
	AG en g / dl	AG en % MG
MG	47.83	/
SAT	55.99	54.64
MONO	44.48	/
C12:0	60.91	57.69
C14:0	55.26	48.24
C16:0	49.73	/
C16:1	41.33	/
C18:0	49.63	/
C18:1	43.91	/
C18:2	51.78	/

Les fortes valeurs de répétabilité, comprises environ entre 41 et 61 %, obtenues pour les teneurs en acides gras étudiés dans le lait ou dans la matière grasse laitière semble suggérer donc l'existence d'une variabilité importante au sein des races laitières étudiées. A condition que cette variabilité soit partiellement héritable (ce qui est hautement probable), elle permet d'envisager une sélection animale axée sur l'amélioration de la qualité nutritionnelle de la matière grasse laitière au sein d'une race.

En conclusion, vu les variabilités intra- et inter-races mentionnées dans le présent travail et comme le précisaient déjà KARLJORD et al. [1982], une sélection animale basée sur le profil en acides gras de la matière grasse laitière est envisageable. Celle-ci pourrait s'exécuter à deux échelons, par un choix racial ou par une sélection dirigée au sein d'une seule race. De plus, une dernière option possible serait le croisement avec des races ayant des profils en acides gras intéressants.

2.3.2. Activité enzymatique de la delta-9 désaturase

Comme précisé précédemment dans la revue bibliographique au point 4.3., les variations dans le profil en matière grasse du lait s'expliquent partiellement par des variations dans l'activité des enzymes impliquées dans la lipogenèse. La delta-9 désaturase fait partie de ces dernières. Elle fixe des structures 9-*cis* sur les acides gras dans les tissus adipeux et mammaires et est ainsi responsable de la production d'une grande part des acides gras monoinsaturés et des CLA retrouvés dans le lait. Dans la glande mammaire, elle convertit le C14:0, C16:0 et C18:0, respectivement, en C14:1 9-*cis*, C16:1 9-*cis* et C18:1 9-*cis*. De plus, elle est également responsable de la transformation du C18:1 11-*trans* en C18:2 9-*cis*,11-*trans*. Pour mesurer cette activité enzymatique, LOCK et al. [2003] préconisent d'estimer les rapports substrat / produit. Les rapports C14:1 9-*cis* / C14:0, C16:1 9-*cis* / C16:0, C18:1 9-*cis* / C18:0 sont donc calculés. Le meilleur rapport pour estimer l'activité de la delta-9 désaturase est le C14:1 / C14:0 car le C14:1 n'est produit que par la seule voie de la désaturation. Malheureusement, le r^2 de prédiction de la droite de calibrage du C14:1 est de seulement 0,0689. Par conséquent, le rapport C14:1 9-*cis* / C14:0 n'est pas très fiable. De même, le C18:1 estimé dans ce travail représente la somme d'une série d'isomères de position et de configuration et pas le seul C18:1 9-*cis*. Par conséquent, le C18:1 11-*trans* qui est le substrat de production pour les CLA est repris dans la catégorie produit. Cependant, l'acide oléique (C18:1 9-*cis*) est le plus important représentant des C18:1. En conclusion, le rapport le plus pertinent pour estimer l'activité enzymatique de la delta-9 désaturase dans le présent travail est le rapport C16:1 9-*cis* / C16:0. Cependant, tous les rapports sont calculés afin d'observer les différentes conclusions s'y rapportant.

La seconde approche envisagée dans le présent travail est donc l'analyse des différences intra- et inter-races pour l'activité enzymatique de la delta-9 désaturase. Les résultats sont obtenus en utilisant un modèle mixte similaire à celui employé pour estimer les différences intra- et inter-races du profil en acides gras du lait exprimé en % dans la MG. Le tableau 24 reprend les données brutes issues du modèle mixte. Dans une optique de standardisation, ces différences sont ensuite divisées par la racine carrée de la variance totale (Tableau 25).

Tableau 24 : Différences inter-races brutes pour l'activité enzymatique de la delta-9-désaturase.

	C18:1/C18:0	C16:1/C16:0	C14:1/C14:0
BBM	0.104	0.001	0.002
Pie-rouge	-0.132	-0.006	-0.002
Montbéliarde	-0.249	-0.007	-0.006
Jersey	-0.002	-0.002	-0.001

Tableau 25 : Différences inter-races standardisées pour l'activité enzymatique de la delta-9-désaturase exprimées en unités écart-type.

	unités écart-type		
	C18:1/C18:0	C16:1/C16:0	C14:1/C14:0
BBM	0.30	0.06	0.20
Pie-rouge	-0.38	-0.60	-0.21
Montbéliarde	-0.72	-0.67	-0.62
Jersey	-0.01	-0.17	-0.06

Comme pour les différences intra- et inter-races exprimées pour le profil en acides gras, un classement est réalisé, la première place étant attribuée à la race dont le rapport estimé est le plus élevé. Le classement pour l'activité delta-9 désaturase est le suivant : en première position, la BBM suivi par la Holstein, la Pie-rouge, la Jersey et la Montbéliarde. Bien que les rapports C14:1 / C14:0 et C18:1 / C18:0 sont qualifiés moins fiables, les conclusions en émanant sont similaires à celles obtenues avec le rapport C16:1 / C16:0. Les variations observées dans les estimations des rapports émanent probablement des imprécisions de mesure et au fait que le C16:0 ou C18:0 ne sont pas issus du seul processus de désaturation. Les imprécisions de mesure concernent les différences de r^2 de prédiction des droites de calibrage et / ou le fait que le C18:1 repris ne concerne pas seulement le C18:1 *9-cis*.

Le classement pour l'activité enzymatique de la delta-9 désaturase est donc identique à celui obtenu pour le profil en acides gras de la matière grasse laitière. Cela pourrait témoigner du lien étroit qui existe entre l'activité enzymatique et les proportions d'acides gras dans la matière grasse laitière.

Il est intéressant d'observer que la BBM occupe toujours la première position. Cela semble indiquer une plus grande activité de la delta-9 désaturase chez cette race et donc une plus forte propension à convertir ses acides gras saturés C14:0, C16:0 et C18:0 en acides gras monoinsaturés. Cette constatation pourrait expliquer l'hypothèse formulée au point 2.3.1.1. mentionnant que la BBM renfermait dans sa MG une plus grande proportion d'AG insaturés.

A l'opposé, les animaux de race Jersey qui produisent la quantité en acides gras monoinsaturés la plus forte dans leur lait, démontrent une activité pour cette enzyme plus faible. Ceci est dû probablement aux quantités en saturés dans leur lait à la base plus élevées (C14:0, C16:0 et C18:0). Par conséquent, même si l'activité enzymatique est moindre, les produits obtenus par cette conversion sont en plus fortes concentrations que pour d'autres races dont les taux en saturés de départ sont plus faibles.

La dernière place occupée par les Montbéliardes semble corroborer le fait qu'elles renferment la fraction saturée la plus conséquente et donc la plus faible en acides gras insaturés. En effet, ces dernières ne possèdent pas une activité enzymatique de la delta-9 désaturase aussi importante que dans les autres races étudiées.

Afin d'estimer le degré de signification des différences d'activité enzymatique de la delta-9 désaturase chez les diverses races laitières étudiées par rapport à la Holstein, les probabilités des tests F sont reprises dans le tableau 26.

Les valeurs reprises dans la rubrique 'Toutes les races' représente les probabilités que l'activité enzymatique de la delta-9 désaturase chez les races laitières étudiées soit similaire à celle estimée pour l'Holstein.

Tableau 26 : Probabilités des tests F de signification des différences d'activité enzymatique de la delta-9 désaturase par rapport à la Holstein.

	Probabilités (en %)		
	C18:1/C18:0	C16:1/C16:0	C14:1/C14:0
BBM	34.47	85.37	51.84
Pie-rouge	13.55	1.79	41.12
Montbéliarde	3.53	4.73	6.43
Jersey	98.93	64.33	86.63
Toutes les races	9.17	4.35	31.87

La probabilité 'Toutes les races' obtenue pour le rapport C16:1 / C16:0 et le C18:1 / C18:0 montrent que les diverses races laitières étudiées se distinguent par leur activité delta-9 désaturase de la race de référence de manière significative. La divergence de résultats obtenue avec le rapport C14:1 / C14:0 pourrait probablement s'expliquer par le r^2 de prédiction pour la droite de calibrage du C14:1 très faible (0,0689).

Les rubriques 'BBM', 'Jersey',... reprises dans le tableau 26 représentent les probabilités que la race considérée renferme une activité enzymatique delta-9 désaturase similaire à celle des animaux de race Holstein. Des variations dans les valeurs sont observées s'expliquant probablement, comme précédemment, par une imprécision dans les mesures. En se référant au rapport C16:1 / C16:0 considéré comme le plus pertinent dans le présent travail, l'activité de la delta-9 désaturase pour les races Montbéliarde et Pie-rouge se distingue globalement de manière significative de la race référence. Leur activité delta-9 désaturase plus faible pourrait indiquer leur inaptitude à convertir les saturés en monoinsaturés. Ceci pourrait dès lors expliquer partiellement pourquoi les Pie-rouges renferment des quantités en monoinsaturés plus faibles dans leur matière grasse laitière.

Les Jersey ne possèdent pas une activité delta-9 désaturase différente de la Holstein indiquant vraisemblablement que seul son taux élevé en MG et, plus particulièrement, en saturés est responsable de la forte concentration en monoinsaturés dans son lait.

De même, la BBM ne semble pas se démarquer de manière significative de la race de référence. Cependant, vu la faible teneur en matière grasse dans son lait, cette activité enzymatique pourrait se révéler suffisante pour parvenir à convertir un plus grand pourcentage de saturés en monoinsaturés dans sa matière grasse laitière.

Comme dans le cas précédent, la variabilité intra-race est approchée par la répétabilité 'animale' estimée par le rapport de la variance animale sur la variance totale (Tableau 27).

Tableau 27 : Répétabilité animale pour l'activité enzymatique de la delta-9 désaturase.

Répétabilité animale (en %)	
C18:1 / C18:0	45.79
C16:1 / C16:0	41.78
C14:1 / C14:0	43.12

Les valeurs élevées obtenues pour la répétabilité ‘animale’, comprises globalement entre 41 et 46 %, pourraient suggérer une forte variabilité de l’activité de la delta-9 désaturase au sein des races laitières étudiées.

En conclusion, l’hypothèse qu’une augmentation de l’activité de la delta-9 désaturase traduit, *in fine*, l’obtention d’un beurre de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure pourrait être émise.

2.3.2. Variabilité du profil en acides gras au sein de la population animale étudiée

Après avoir étudié les différences de profil en acides gras entre animaux aux travers des effets races et les estimations de la répétabilité ‘animale’, un effet moyen phénotypique corrigé, dénommé ‘effet individuel’, peut être établi. Celui-ci est estimé pour un animal considéré à partir de la somme de sa déviation individuelle et des effets races attendus sur base de sa composition raciale. Ensuite, dans une optique de standardisation, chaque effet individuel est divisé par la racine carrée de la variance totale.

A partir de ces effets standardisés, des corrélations sont calculées entre les différents constituants du profil en acides gras du lait.

Dans un deuxième temps, un classement des animaux est réalisé à partir de ces mêmes effets.

2.3.2.1. Corrélations entre les composés du profil en acides gras

Toute sélection sur la composition du lait doit s’accommoder des liens existants entre les différents composés. La connaissance des corrélations génétiques et phénotypiques est donc nécessaire. Si l’estimation de corrélations génétiques n’est pas possible dans le présent travail à cause d’un nombre limité de données, l’estimation des corrélations entre effets moyens phénotypiques donnent une première idée des corrélations génétiques entre ceux-ci (Tableau 28).

Tableau 28 : Corrélations phénotypiques entre les composés du profil en acides gras estimées à partir des effets individuels standardisés. Les différents acides gras sont exprimés en g / dl de lait ou en % dans la matière grasse laitière.

	MG	SAT	MONO	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2
MG	1.00	0.95	0.85	0.68	0.77	0.94	0.58	0.98	0.80	0.82
SAT		1.00	0.70	0.83	0.89	0.94	0.39	0.97	0.60	0.70
MONO			1.00	0.24	0.36	0.79	0.91	0.81	0.96	0.89
C12:0				1.00	0.95	0.67	-0.12	0.72	0.16	0.89
C14:0					1.00	0.75	-0.01	0.80	0.31	0.39
C16:0						1.00	0.54	0.95	0.68	0.72
C16:1							1.00	0.52	0.87	0.75
C18:0								1.00	0.75	0.79
C18:1									1.00	0.87
C18:2										1.00

Acides gras exprimés en g / dl de lait.

	SAT	C12:0	C14:0
SAT	1.00	0.78	0.82
C12:0		1.00	0.94
C14:0			1.00

Acides gras exprimés en % dans le MG.

Comme indiqué dans le tableau 28, malgré quelques corrélations élevées (p. ex entre les SAT et MG), d'autres corrélations sont faibles à très faibles (p. ex entre C14:0 et C18:1) voire négatives (p. ex entre C12:0 et C16:1 ou C14:0 et C16:1). Ce fait est intéressant car il montre l'étendue des possibilités offertes à la sélection animale pour modifier le profil en acides gras du lait. Par exemple, l'acide myristique (C14:0) est reconnu comme étant l'acide gras saturé élevant le plus fortement le risque de maladies cardiovasculaires. Si l'objectif de la sélection était de baisser le taux de cet AG dans le lait, nous pourrions nous attendre, dans le cas d'une sélection directe sur cet AG et sur base des corrélations figurant dans le tableau 28, à ce que les teneurs en C12:0, en C16:0 et en C18:0 dans le lait diminuent, les taux en C18:1 et C18:2 diminuent légèrement (corrélations très faibles, respectivement, 0,31 et 0,39) et que la quantité en C16:1 reste stable ou augmente légèrement (corrélation négative, -0,01). Ceci est évidemment intéressant pour la sélection animale. Une connaissance plus précise de ces corrélations pourrait dès lors servir à réaliser un index de sélection en basant les coefficients 'a' sur les effets globalement positifs et négatifs connus de ces acides gras sur la santé humaine (VAN VLECK, 1993). En outre, les coefficients pourraient être choisis de telle manière à assurer une réponse neutre pour le caractère MG total. Un tel index 'santé' du lait aurait comme intérêt de classer les animaux sur base d'une qualité nutritionnelle globale de leur lait et non plus seulement à partir de chacun des constituants du profil en acides gras étudié.

2.3.2.2. Classement des animaux sur base de leur profil en acides gras

Les paramètres statistiques estimés à partir des teneurs prédites en acides gras dans le lait et la matière grasse sont repris à l'annexe VII.

2.3.2.2.1. *Profil en acides gras dans le lait*

Afin d'observer la variabilité dans le profil en acides gras du lait existant entre animaux, un classement des 5 individus produisant le lait de qualité nutritionnelle théoriquement la plus élevée, et des 5 plus médiocres représentants est effectué. Pour ce faire, les effets individuels standardisés sont utilisés. Aucune tentative de définition d'un index 'santé' est effectuée à ce stade car elle nécessiterait la connaissance des héritabilités et des corrélations génétiques.

Les animaux de race normande sont conservés car les effets individuels et ceux dus à la race sont combinés. Le tableau 29 reprend le classement des animaux sur base du profil en acides gras de leur lait et mentionne l'identification de l'animal, l'effet individuel standardisé pour le composé considéré, et les composantes raciales de ce dernier.

L'échelle de variation observée pour les effets individuels pour les quantités en acides gras dans le lait s'étend d'environ – 1,5 à 3 unités écart-type pour chacun des acides gras analysés. Cette variabilité est intéressante car elle pourrait vraisemblablement suggérer une forte variabilité du profil en acides gras du lait dans la population animale étudiée. Cette hétérogénéité pourrait montrer la possibilité de sélectionner au sein des races laitières wallonnes des animaux aux profils en acides gras distincts.

Tableau 29 : Classement des animaux à partir de leurs effets individuels estimés pour chaque constituant du profil en acides gras du lait (g / dl de lait).

n°	MG (g / dl)			SAT (g / dl)			MONO (g / dl)		
	animal	effet	race	animal	effet	race	animal	effet	race
1	13336975	-1.337	88H:13R	13337458	-1.430	81H:19R	13494697	2.789	100H
2	13044545	-1.087	100B	13195683	-1.243	100H	12980472	2.406	81H:16R:3I
3	13337458	-1.079	81H:19R	13140363	-1.229	50B:50I	13156186	1.940	50B:50I
4	13178595	-1.033	100B	13336975	-1.187	88H:13R	13246709	1.915	100J
5	13195683	-0.980	100H	13422855	-1.152	100H	13181322	1.804	100J
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
271	13494697	2.071	100H	12899443	2.433	100J	13647081	-0.997	100B
272	13366284	2.475	100J	13246709	2.434	100J	13156124	-1.020	50B:50I
273	13246709	2.504	100J	13366284	2.878	100J	13178595	-1.050	100B
274	13181322	2.612	100J	13181322	2.916	100J	13336975	-1.273	88H:13R
275	13255366	2.690	100J	13255366	3.028	100J	13087379	-1.438	100R

n°	C12:0 (g / dl)			C14:0 (g / dl)			C16:0 (g / dl)		
	animal	effet	race	animal	effet	race	animal	effet	race
1	13494673	-1.879	100N	13494673	-1.412	100N	13336975	-1.536	88H:13R
2	13422855	-1.595	100H	13422855	-1.357	100H	13140363	-1.462	50B:50I
3	13337458	-1.313	81H:19R	13337458	-1.247	81H:19R	13337458	-1.414	81H:19R
4	12980472	-1.242	81H:16R:3I	13195683	-1.141	100H	13044545	-1.214	100B
5	13494615	-1.234	100H	13363936	-1.121	88H:9R:3I	13195683	-1.176	100H
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
271	13273585	2.172	48H:44M:8R	13181322	2.298	100J	13241167	1.770	100J
272	13076719	2.341	75M:16R:9H	13366284	2.490	100J	13594015	1.984	100J
273	13366284	2.419	100J	13076719	2.621	75M:16R:9H	13366284	2.125	100J
274	12899443	3.137	100J	12899443	2.678	100J	13181322	2.257	100J
275	13255366	3.288	100J	13255366	2.977	100J	13255366	2.333	100J

n°	C16:1 (g / dl)			C18:0 (g / dl)			C18:1 (g / dl)		
	animal	effet	race	animal	effet	race	animal	effet	race
1	12980472	2.615	81H:16R:3I	13336975	-1.235	88H:13R	13494697	2.761	100H
2	13494697	2.576	100H	13021735	-1.181	84H:16R	13156186	2.288	50B:50I
3	13494673	1.766	100N	13337458	-1.156	81H:19R	12980472	2.266	81H:16R:3I
4	13156186	1.722	50B:50I	13178595	-1.024	100B	13246709	1.951	100J
5	13423449	1.710	100H	13044545	-0.990	100B	13594015	1.662	100J
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
271	13178595	-1.037	100B	12899443	2.103	100J	13337461	-0.810	96H:4R
272	13156124	-1.052	50B:50I	13181322	2.467	100J	13599919	-0.861	100R
273	13647081	-1.092	100B	13366284	2.548	100J	13647081	-0.866	100B
274	13599919	-1.111	100R	13255366	2.623	100J	13336975	-1.121	88H:13R
275	13087379	-1.494	100R	13246709	2.631	100J	13087379	-1.455	100R

n°	C18:2 (g / dl)		
	animal	effet	race
1	13494697	3.404	100H
2	13246709	2.489	100J
3	13181322	2.281	100J
4	13366284	2.217	100J
5	13156186	2.120	50B:50I
...	...	...	...
271	13322513	-0.953	75H:25I
272	13178595	-0.982	100B
273	13635517	-0.985	100H
274	13221748	-1.084	100H
275	13336975	-1.341	88H:13R

animal = numéro interne de l'animal considéré ; effet = effet individuel standardisé ; race = pedigree de l'animal considéré ; B = BBM ; J = Jersey ; H = Holstein ; M = Montbéliarde ; N = Normande ; R = Pie-rouge.

A l'examen du tableau 29, beaucoup d'animaux se répètent dans le classement d'un composé de la matière grasse à l'autre. Ceci est probablement une conséquence des corrélations élevées observées dans le tableau 28.

Des exceptions aux conclusions formulées pour les animaux de race pure se rencontrent dans le tableau 29. L'animal 13494697 bien qu'il possède 100 % de gènes d'origine Holstein renferme le taux en MG le plus élevé tendant vraisemblablement à montrer la forte variabilité de la teneur en matière grasse dans le lait existant au sein même des races laitières étudiées.

L'animal 13494673 de race normande se démarque des autres individus avec des quantités en C14:0 et en C12:0 les plus faibles bien qu'il ne possède pas la teneur en matière grasse la plus basse dans son lait. Cette observation est évidemment intéressante du point de vue de la qualité nutritionnelle du lait.

2.3.2.2.2. Profil en acides gras dans la matière grasse laitière

Afin d'observer la variabilité dans le profil en acides gras de la matière grasse laitière existant entre animaux, un classement des 5 individus produisant la matière grasse de qualité nutritionnelle théoriquement la plus élevée, et des 5 plus médiocres représentants est effectué (Tableau 30). Les principes inhérents à sa réalisation sont les mêmes que ceux énoncés au point 2.3.2.2.1.

L'échelle de variation pour les teneurs en acides gras dans la matière grasse laitière s'étend d'environ - 2,5 à 2,5 unités écart-type pour chacun des AG analysés. La variabilité obtenue est similaire à celle observée au point 2.3.2.2.1. pouvant suggérer une forte variabilité de la

composition en MG au sein des animaux laitiers et pouvant indiquer la possibilité de sélectionner des animaux sur base du profil en acides gras de leur matière grasse laitière.

Tableau 30 : Classement des animaux étudiés à partir de leurs effets individuels estimés pour chaque constituant du profil en acides gras de la matière grasse laitière (en % MG).

n°	SAT (% MG)			C12:0 (% MG)			C14:0 (% MG)		
	animal	effet	race	animal	effet	race	animal	effet	race
1	13494697	-2.383	100H	13494673	-2.248	100N	13494697	-2.180	100H
2	13156186	-2.238	50B:50I	13494697	-2.094	100H	13494673	-1.987	100N
3	12980472	-1.748	81H:16R:3I	12980472	-1.991	81H:16R:3I	12980472	-1.746	81H:16R:3I
4	13158633	-1.435	100H	13156186	-1.952	50B:50I	13156186	-1.488	50B:50I
5	13340903	-1.364	50B:50I	13385170	-1.433	50B:50I	13322505	-1.174	100H
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
271	13076719	1.301	75M:16R:9H	13081137	1.686	75M:25R	13021732	1.626	100M
272	13322494	1.367	53H:44R:3I	13021732	1.746	100M	13255366	1.638	100J
273	13021732	1.384	100M	13273585	1.865	48H:44M:8R	13076719	1.649	75M:16R:9H
274	13219924	1.515	100H	13255366	2.002	100J	13081137	1.673	75M:25R
275	13337461	1.683	96H:4R	12899443	2.404	100J	12899443	1.754	100J

animal = numéro interne de l'animal considéré ; effet = différence due à l'effet de l'animal et de la race; race = pedigree de l'animal considéré ; B = BBM ; J = Jersey ; H = Holstein ; M = Montbéliarde ; N = Normande ; R = Pie-rouge.

Comme dans le tableau 29, des animaux se répètent dans ce classement s'expliquant probablement aussi par les corrélations élevées observées entre composés.

L'animal 13494673 de race normande s'est déjà démarqué dans le précédent classement pour sa quantité en C12:0 et en C14:0 faible dans son lait. Ceci pourrait probablement être dû à des proportions en C12:0 et en C14:0 moindres dans la matière grasse laitière de cet individu (Tableau 30).

Comme précisé dans le tableau 29, les animaux de race Holstein sont rencontrés dans les premières et dernières places du classement pour les SAT pouvant montrer la grande variabilité de la teneur en saturé au sein de la race Holstein.

En conclusion, une grande variabilité est rencontrée au sein de la population animale étudiée. Cependant, le fait de classer les animaux sur base de leurs effets individuels pour le constituant du profil en acides gras considéré ne transmet pas une image claire de l'aptitude de l'animal à produire un lait de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure. Le recours à l'index 'santé' tel qu'il a été décrit précédemment serait intéressant car une seule valeur pourrait témoigner de cette aptitude. Ce critère pourrait ainsi aider dans le choix des géniteurs les plus appropriés pour améliorer la qualité nutritionnelle du lait et permettre une sélection animale équilibrée.

*CHAPITRE V : CONCLUSIONS GÉNÉRALES
ET PERSPECTIVES*

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'objectif général du présent travail de fin d'études était d'étudier la faisabilité d'une sélection animale axée sur le profil en acides gras du lait. A ce titre, une analyse de la variabilité intra- et inter-races fut entreprise. Ce travail a également introduit les bases en terme d'acquisition de données et de traitement de celles-ci afin d'estimer le profil en acides gras à partir des spectres issus du moyen infrarouge.

L'estimation des différences de profil en acides gras du lait de cinq races laitières permit d'approcher la variabilité inter-races. Que ce soit la Blanc Bleu Mixte, la Holstein, la Jersey, la Montbéliarde ou la Pie-rouge, toutes ont montré des caractéristiques propres dans leur composition en matière grasse. Notamment, la Blanc Bleu Mixte s'est démarquée des autres races en produisant une matière grasse laitière et un lait de qualité nutritionnelle théoriquement supérieure. Par conséquent, le choix de la race peut déjà modifier la qualité nutritionnelle attendue du lait.

Les valeurs importantes obtenues pour la répétabilité 'animale' pourraient suggérer l'existence d'une forte héritabilité pour les caractères 'acides gras' au sein des races laitières étudiées. Par conséquent, une forte variabilité génétique intra-race pour le profil en acides gras du lait ou de la matière grasse laitière pourrait exister. Malheureusement, la présente étude n'était pas assez étendue pour effectuer les estimations de paramètres génétiques.

Finalement, une variabilité importante dans les quantités en acides gras dans le lait ou la matière grasse fut également observée au sein de la population étudiée pouvant suggérer une forte variation du profil en acides gras du lait suivant l'animal étudié. De plus, les corrélations obtenues entre les composés du profil en acides gras ont montré qu'une sélection différenciée, axée sur un nombre restreint de caractères, est possible.

En conclusion, cette étude apporte de grands espoirs quant à une amélioration génétique de la qualité nutritionnelle de la matière grasse laitière au travers d'une sélection animale basée sur le profil en acides gras du lait.

Les perspectives futures sont liées à l'étude d'une sélection animale basée sur la qualité nutritionnelle de la matière grasse laitière. Dans cette optique, des améliorations substantielles à la méthodologie adoptée dans ce travail peuvent être apportées.

Le calibrage de la technologie du moyen infrarouge étant basé sur des résultats d'analyses chromatographiques, une validation de cette méthode est nécessaire. De plus, l'augmentation du nombre de valeurs de référence utiles à l'estimation de ces droites de calibrage élèverait les performances de prédiction de ces dernières et permettrait vraisemblablement d'accroître le nombre d'acides gras étudiés.

Au-delà de se révéler intéressant dans l'estimation du profil en acides gras du lait, cette technologie est également un nouvel outil de criblage performant permettant de caractériser des animaux laitiers. En effet, il est tout à fait concevable d'analyser directement les données spectrales afin de détecter des zones hérissables a priori. Une telle démarche pourrait faciliter un calibrage ultérieur en atténuant le bruit de fond. De plus, cet outil pourrait également être utilisé dans le domaine de la génétique moléculaire pour cibler une population spécifique afin de déceler d'éventuels QTL.

L'introduction d'une matrice de parenté dans le modèle mixte permettrait non seulement d'augmenter la précision du modèle mais encore d'estimer des paramètres génétiques et des valeurs d'élevage pour des animaux sans production. Pour ce faire, un élargissement de la base de données est nécessaire. Deux approches peuvent être envisagées. La première consisterait à continuer le travail déjà entrepris c'est-à-dire à lier manuellement les données spectrales et les informations basées sur l'identification animale. La seconde serait de mettre en place, en collaboration avec le contrôle laitier, une analyse en routine du profil en acides gras du lait.

Les valeurs d'élevage pour les caractères de production considérés (acides gras saturés, insaturés, C12:0, C14:0,...) obtenus lors de l'évaluation génétique pourraient combinées d'une manière optimale dans un index 'santé' permettant aux éleveurs wallons de choisir les meilleurs géniteurs par rapport aux objectifs de sélection fixés (plus de C18:1, un lait de qualité théorique supérieure,...). La définition d'un tel index est nécessaire car l'estimation des valeurs d'élevage pour chaque composé considéré ne donne pas une image très claire de l'aptitude de l'animal à produire un lait de qualité nutritionnelle supérieure. En s'inspirant du système wallon VEG, un tel index de sélection basé sur les effets potentiellement positifs et négatifs des acides gras sur la santé humaine pourrait être développé.

En conclusion, l'index 'santé' permettrait une sélection active sur la qualité nutritionnelle du lait de la population wallonne des bovins laitières.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARGMANN W., KNOOP A. [1959], *Über die morphologie der milchsekretion, licht und elektronenmikroskopische studien an der milchdrüse der ratte*, Z. Zellforsch, 49:344-388 (cité par JENSEN, 1995; DANTHINE, 2000).
- BELURY M.A. [1995], *Conjugated dienoic linoleate: a polyunsaturated fatty acid with unique chemoprotective properties*, Nutr. Rev., 53:83-89 (cité par CHOUINARD et al., 1999 ; LOOR et al., 1998).
- BENNEWITZ J., REINSCH N., PAUL S., LOOFT C., KAUPÉ B., WEIMANN C., ERHARDT G., THALLER G., KÜHN C., SCHWERIN M., THOMSEN H., REINHARDT F., REENTS R., KALM E. [2003], *The DGAT1 K232A mutation is not solely responsible for the milk production quantitative trait locus on the bovine chromosome 14*, J. Dairy Sci., 87:431-442.
- BITMAN J., WOOD D.L., MILLER R.H., TYRRELL H.F., REYNOLDS C.K., BAXTER H.D. [1996], *Comparison of milk and blood lipids in Jersey and Holstein cows fed total mixed rations with or without whole cottonseed*, J. Dairy Sci., 79:1596-1602.
- BONANOME A., GRUNDY S.M. [1988], *Effect of dietary stearic acid on plasma cholesterol and lipoprotein*, New Engl. J. Med., 318:1244-1248 (cité par WILLIAMS, 2000).
- BUCHHEIM W. [1986], *Membranes of milk fat globules – ultrastructural, biochemical, and technological aspects*, Kiel. Milchwirtsch. Forschungsber., 38:227-246 (cité par DANTHINE et al., 2000).
- CADUCEE [2005], *Image de la structure d'une lipoprotéine*, disponible sur <http://www.caducee.net/Images/Dossiers/lipoproteine.jpg> (consulté le 18/03/2005).
- CHAUHAN V.P.S., HAYES J.F. [1991], *Genetic parameters for first lactation milk production and composition traits for Holsteins using multivariate restricted maximum likelihood*, J. Dairy Sci., 74:603-610.
- CHILLIARD Y., FERLAY A., MANSBRIDGE R.M., DOREAU M. [2000], *Ruminant milk fat plasticity: nutritional control of saturated, polyunsaturated, trans and conjugated fatty acids*, INRA, Ann. Zootech., 49:181-205.
- 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 Prod. Anim., 14(5):323-335.
- CHILLIARD Y., FERLAY A. [2003], *Facteurs d'élevage et caractéristiques de la matière grasse laitière bovine et caprine*, Les Journées Filière Lait, Rennes.
- CHOUINARD Y.P., 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*, The Journal of Nutrition, 129:1579-1584.
- CHOUINARD Y.P., GERVAIS R. [2003], *Effet des acides linoléiques conjugués sur le métabolisme de la vache et leur rôle dans la réduction de la teneur en matières grasses du lait*, Eastern Nutrition Conference, disponible sur http://www.dsm.com/en_US/downloads/dnpus/enc_03_13.pdf (consulté le 23/03/2005).
-

- COATES J. [2000], *Interpretation of Infrared Spectra, a practical approach*, Encyclopedia of Analytical Chemistry, John Wiley & Sons Ltd, 10815-10837.
- COLLOMB M., BÜHLER T. [2000], *Analyse de la composition en acides gras de la graisse de lait*, Mitt. Lebensm. Hyg., 91:306-332.
- CONNOR W.E. [2000], *Importance of n-3 fatty acids in health and disease*, Am. J. Clin. Nutr., 71(suppl.):171-175.
- COOK M.E., MILLER C.C., PARK Y., PARIZA M. [1993], *Immune modulation by altered nutrient metabolism: nutritional control of immune-induced growth depression*, Poult. Sci., 72:1301-1305 (cité par CHOUINARD et al., 1999).
- CORL B.A., BAUMGARD L.H., BAUMAN D.E., GRINARI J.M. [2000], *Role of Δ^9 -desaturase in the synthesis of the anticarcinogenic isomer of conjugated linoleic acid and other milk fatty acid*, Proceedings of the Cornell Nutrition Conference, Cornell University, Rochester, NY, 203-212 (cité par LOCK et al., 2003).
- DAGNELIE P. [1992], *Statistique théorique et appliquée, Tome 1*, Les Presses Agronomiques de Gembloux.
- DAGNELIE P. [1998], *Statistique théorique et appliquée, Tome 2*, Bibliothèque des Universités, Statistiques, De Boeck Université.
- DANONE [1999], *Lipids from alpha to omega*, Nutrition and Health Collection.
- DANTHINE S., BLECKER C., PAQUOT M., INNOCENTE N., DEROANNE C. [2000], *Evolution des connaissances sur la membrane du globule gras du lait : synthèse bibliographique*, INRA, Lait, 80:209-222.
- DEAVILLE E.R., GIVENS D.I., BLAKE J.S. [2004], *Dietary supplements of whole linseed and vitamin E to increase levels of α -linolenic acid and vitamin E in bovine milk*, INRA, Animal Research, 53 (1):1-80.
- DEBRY G. [2001], *Lait, nutrition et santé*, Editions TEC & DOC.
- DEJAGER D., KENNEDY B.W. [1987], *Genetic parameters of milk yield and composition and their relationship with alternative breedings goals*, J. Dairy Sci., 70:1258 (cité par CHAUHAN et al., 1991).
- DEMEYER D., DOREAU M. [1999], *Pourquoi et comment modifier les lipides du lait et de la viande bovine*, Cah. Nutr. Diét., 34:5.
- DOREY F., BRODIN D., LE QUERLER J.-F., KUZDZAL-SAVOIE S. [1988], *Analyse des acides gras du beurre par chromatographie en phase gazeuse couplée avec la spectrométrie de masse, étude préliminaire*, Industries Agro-Alimentaires.
- DRUET T., JAFFRÉZIC F., DUCROCQ V. [2005], *Estimation of genetic parameters for test day records of dairy traits in the first three lactations*, Genet. Sel. Evol., 257-271.
-

- ELINFO [2005], *Evolution des valeurs d'élevage pour le caractère matières grasses*, disponible sur <http://www.elinfo.be/elinfo/>, consulté le 11/07/2005.
- FAO [1995], *Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine – Laites d'animaux laitiers, Chapitre 2 Laites d'animaux laitiers*, FAO, disponible sur <http://www.fao.org/docrep/T4280F/T4280F04.htm> (consulté le 08/02/2005).
- FOSS [2005], *MilkoscanTM FT6000*, , disponible sur <http://www.foss.dk/c/p/default.asp> (consulté le 07/02/2005).
- FUJIMOTO K., KIMOTO H., SHISHIKURA M., ENDO Y., OGIMOTO K. [1993], *Biohydrogenation of linoleic acid by anaerobic bacteria isolated from the rumen*, Biosci. Biotechnol. Biochem., 57:1026-1031 (cité par LOOR et al., 1998).
- GENGLER N. [2004], *Génétique et amélioration animales*, Notes de cours, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- GENGLER N. [2005a], *Productions animales*, Notes de cours, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.
- GENGLER N., VANDERICK S., MAYERS P., GILLON A. [2005b], *Description des systèmes d'évaluations génétiques utilisées en Wallonie*, disponible sur <http://www.elinfo.be/elinfo/> (consulté le 04/08/2005).
- GIVENS D.I., ALLISON R., BLAKE J.S. [2004], *Enhancement of oleic acid and vitamin E concentrations of bovine milk using dietary supplements of whole rapeseed and vitamin E*, INRA, Animal Research, 53(1):1-80.
- GRIINARI J.M., BAUMAN D.E., JONES L.R. [1995], *Low milk fat in New-York Holstein herds*, Proceedings of the Cornell Nutrition Conference, 96-105 (cité par LOOR et al., 1998).
- GRIINARI J.M., CORL B.A., LACY S.H., CHOUINARD P.Y., NURMELA K.V.V., BAUMAN D.E. [2000], *Conjugated linoleic acid is synthesized endogenously in lactating dairy cows by Δ^9 -desaturase*, J. Nutr., 130:2285-2291.
- GRUMMER R.R. [1991], *Effect of Feed on the Composition of Milk Fat*, J. Dairy Sci., 74:3244-3257.
- HENDERSON C.R. [1984], *Application of linear models in animal breeding*, University of Guelph, Guelph, Canada.
- HILLGARTNER F.B., SALATI L.M., GOODRIDGE A.G. [1995], *Physiological and molecular mechanisms involved in nutritional regulation of fatty acid synthesis*, Physiolog. Rev., 75:47-46 (cité par LOCK et al., 2003).
- HOUSEKNECHT K.L., VANDEN HEUVEL J.P., MOYA-CAMARENA S.Y., PORTOCARRERO C.P., PECK L.W., NICKEL K.P., BELURY M.A. [1998], *Dietary conjugated linoleic acid normalizes impaired glucose tolerance in the Zucker diabetic fatty fa/fa rat*, Biochem. Biophys. Res. Commun., 244:678-682 (cité par CHOUINARD et al., 1999).
-

- HU F.B., STAMPFER M.J., MANSON J.E., ASCHERIO A., COLDITZ G.A., SPEIZER F.E., HENNEKENS C.H., WILLET W.C. [1999], *Dietary saturated fat and their food sources in relation to the risk of coronary heart disease in women*, Am J Clin Nutr, 70:1001-1008 (cité par HU et al., 2001).
- HU F.B., MANSON J.E., WILLETT W.C. [2001], *Types of Dietary Fat and Risk of Coronary Heart Disease: A Critical Review*, Journal of the American College of Nutrition, 20(1):5-19.
- INTERBULL [2005], *Genetic evaluation, Production*, disponible sur <http://www-interbull.slu.se/eval/framesida-prod.htm> (consulté le 05/04/2005).
- IP C., SCIMECA J.A., THOMPSON H.J. [1994], *Conjugated linoleic acid: a powerful anticarcinogen from animal fat sources*, Cancer, 74:1050-1054 (cité par CHOUINARD et al., 1999).
- JENKINS T.C. [1993], *Symposium: Advances in ruminant lipid metabolism, Lipid Metabolism in the Rumen*, J. Dairy Sci., 76:3851-3863.
- JENSEN R.G. [1995], *Handbook of milk composition*, Academic Press.
- KARLJORD Ø., STANDAL N., SYRSTAD O. [1982], *Sources of variation in composition of milk fat*, Z. Tierz. Zuechtungsbiol., 99:81 (cité par PALMQUIST et al., 1993).
- LOCK A.L., GARNSWORTHY P. C. [2003], *Seasonal variation in milk conjugated linoleic acid and Δ^9 -desaturase activity in dairy cows*, Livestock Production Science, 79:47-59.
- LOOR J.J., JOSEPH H.H. [1998], *Exogenous Conjugated Linoleic Acid Isomers Reduce Bovine Milk Fat Concentration and Yield by Inhibiting De Novo Fatty Acid Synthesis*, The Journal of Nutrition, 128:2411-2419.
- LOUIS H. [1993], *Analyse du lait par spectroscopie moyen infrarouge*, Mémoire de fin d'étude, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.
- MAHIEU V. [2001], *Le lait, Qu'est ce que c'est « le lait » ?*, Université Libre de Bruxelles, disponible sur <http://www.ulb.ac.be/sciences/cudec/LaitComposition.html> (consulté le 09/02/05).
- MAYERES P. [2002], *Appui technique à la gestion des troupeaux de bovins laitiers à travers la mise en évidence d'influences spécifiques au niveau des troupeaux et des vaches sur les performances et l'efficacité biologique*, mémoire de fin d'étude, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- MATHER I.H., KEENAN T.W. [1998], *Origin and secretion of milk lipids*, J. Mam. Gland Biol. Neoplasia, 3:259-273 (cité par DANTHINE et al., 2000).
- MEINERT T.R., KROVER S., VAN ARENDONCK J.A.M. [1989], *Parameter estimation of milk yield and composition for 305 days and peak production*, J. Dairy Sci., 72:1534 (cité par CHAUHAN et al., 1991).
-

- MEYER K. [1985], *Genetic parameters for dairy production of Australian black and white cows*, Livest. Prod. Sci., 12:205 (cité par CHAUHAN, 1991).
- MUNDAY J.S., THOMPSON K.G., KERRY A.C.J. [1999], *Dietary conjugated linoleic acids promote fatty streak formation in the C57BL/6 mouse atherosclerosis model*, British Journal of Nutrition, 81:251-255.
- NICOLOSI R.J., ROGERS E.J., KRITCHEVSKI D., SCIMECA J.A., HUTH P.J. [1997], *Dietary conjugated linoleic acid reduces plasma lipoproteins and early aortic atherogenesis in hypercholesterolemic hamsters*, Artery, 22:266-277 (cité par CHOUINARD et al., 1999).
- NOAKES M., NESTEL P.J., CLIFTON P.M. [1996], *Modifying the fatty acid profile of dairy product through feedlot technology lowers plasma cholesterol of human consuming the products*, Am. J. Clin. Nutr., 63:42-46.
- NORME INTERNATIONALE [2001], *Lait et produits laitiers – Méthodes d'extraction des lipides et des composés liposolubles*, ISO 14156 :2001(F), FIL 172 :2001(F).
- PALMQUIST D.L., MATTOS W. [1978], *Turnover of lipoproteins and transfer to milk fat of dietary (1-carbon-14) linoleic acid in lactating cows*, J. Dairy Sci., 61:561 (cité par GRUMMER, 1991).
- PALMQUIST D.L., BEAULIEU A.D. [1992], *Differences between Jersey and Holstein cows in milk fat composition*, J. Dairy Sci., 75(Suppl. 1):292 (Abstr.) (cité par PALMQUIST et al., 1993)
- PALMQUIST D.L., BEAULIEU A.D., BARBANO D.M. [1993], *ADSA foundation symposium: milk fat synthesis and modification, Feed and Animal Factors Influencing Milk Fat Composition*, J. Dairy Sci., 76:1753-1771.
- PAQUOT M. [2000], *Nature et composition des matières grasses*, Journée d'étude "Santé animale – Santé humaine", Ciney.
- PARIZA M.W., PARK Y., COOK M.E. [2001], *The biologically active isomers of conjugated linoleic acid*, Prog. Lipid Res., 40:283-298.
- PARK Y., ALBRIGHT K.J., LIU W., STORKSON J.M., COOK M.E., PARIZA M.W. [1997], *Effect of conjugated linoleic acid on body composition in mice*, Lipids, 32:853-858 (cité par CHOUINARD et al., 1999).
- PARODI P.W. [1977], *Conjugated octadecadienoic acids of milk fat*, J. Dairy Sci., 60:1550-1553 (cité par LOOR et al., 1998).
- PARODI P. W. [1999], *Symposium : a bold new look at milk fat, Conjugated Linoleic Acid and Other Anticarcinogenic Agents of Bovine Milk Fat*, J. Dairy Sci., 82:1339-1349.
- PETRONE G., CONTE M.P., LONGHI C., DI SANTO S., SUPERTI F., AMMENDOLIA M.G., VALENTI P., SEGANTI L. [1998], *Natural milk fatty acids affect survival and invasiveness of Listeria monocytogenes*, Letters in Applied Microbiology, 27:362-368.
-

- POTTIER J., FOCANT M., LARONDELLE Y. [2000], *La matière grasse du ruminant: un réservoir d'acides gras spécifiques aux effets importants pour notre santé*, Journée d'étude "Santé animale – santé humaine: acides gras conjugués CLA et Oméga 3 favorables à la santé; comment intervenir par l'alimentation du bétail pour en garantir la production ? », Ciney.
- PRÉVOT H. [2004], *Comparaison de méthodes statistiques et neuronales pour l'établissement d'équations de calibrage en spectrométrie de réflexion diffuse dans le proche infrarouge*, Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux.
- RENAVILLE R., GENGLER N., VRECH E., PRANDI A., MASSART S., CORRADINI C., BERTOZZI C., MORTIAUX F., BURNY A., PORTETELLE D. [1997], *Pit-1 gene polymorphism, milk yield, and conformation traits for italian Holstein-Friesian bulls*, J. Dairy Sci., 80:3431-3438.
- ROMAN R.M., WILCOXT C.J. [2000], *Bivariate Animal Model Estimates of Genetic, Phenotypic, and Environmental Correlations for Production, Reproduction, and Somatic Cells in Jerseys*, J. Dairy Sci., 83:829-835.
- SAUVANT D., BAS P. [2001], *La digestion des lipides chez le ruminant*, INRA, Prod. Anim., 14(5):303-310.
- SEHAT N., RICKERT R., MOSSOBA M.M., KRAMER J.K.G., YURAWECZ M.P., ROACH J.A.G., ADLOF R.O., MOREHOUSE K.M., FRITCHE J., EULITZ K., STEINHART H., KU Y. [1999], *Improved separation of conjugated fatty acid methyl esters by silver ion-high-performance liquid chromatography*, Lipids, 34:407-413 (cité par CHOUINARD et al., 2003).
- SIMOPOULOS A.P. [2003], *Importance of Ratio of Omega-6/Omega-3 Essential Fatty Acids : Evolutionary Aspects*, World Rev Nutr Diet., 92:1-22.
- SMITH B.C. [1996], *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy*, CRC Press.
- STOKES S.R., WALDNER D.N., JORDAN E.R., LOOPER M.L. [2000], *Managing Milk Composition: Normal Sources of Variation*, Texas Agricultural Extension Service, L-5388, disponible sur <http://stephenville.tamu.edu/~sstokes/l5388.pdf> (consulté le 11/02/2005).
- SWALVE H.H. [2000], *Theoretical basis and computational method for different test-day genetic evaluation methods*, J. Dairy Sci., 83:1115-1124.
- TSURUTA S., MISZTAL I., LAWLOR T.J. [2004], *Genetic Correlations Among Production, Body Size, Udder, and Productive Life Traits Over Time in Holsteins*, J. Dairy Sci., 87:1457-1468.
- VAN DE LAER G., ROLOT J.-L., DARDENNE P., AGNEESSENS R. [2001], *Qualité des pommes de terre : nouvelles méthodes d'évaluation calibrées sur l'analyse sensorielle*, Biotechnol. Agron. Soc. Environ., 5(3):166-170.
-

- VAN DEN WERF J.H.J., DEBOER W. [1989], *Estimation of genetic parameters in a cross bred population of black and white dairy cattle*, J. Dairy Sci., 72:2615 (cité par CHAUHAN et al., 1991).
- VAN VLECK L.D. [1993], *Selection index and introduction to mixed model methods*, CRC Press.
- WATTIAUX M.A., GRUMMER R.R. [2004], *Chapitre 4 : Métabolisme des lipides chez la vache laitière*, Institut Babcock, The University of Wisconsin, disponible sur http://babcock.cals.wisc.edu/downloads/de_html/ch04.fr.html (consulté le 23/02/2005).
- WELPER R.D., FREEMAN A.E. [1992], *Genetic Parameters for Yield Traits of Holsteins, Including Lactose and Somatic Cell Score*, J. Dairy Sci., 75:1342-1348.
- WILLIAMS C.M. [2000], *Dietary fatty acids and human health*, INRA, Ann. Zootech., 49:165-180.
- WONSIL B.J., HERBEIN J.H., WATKINS B.A. [1994], *Dietary and ruminally derived trans-18:1 fatty acids alter bovine milk lipids*, J. Nutr., 124: 556-565 (cité par LOOR et al., 1998).
- YEHUDA S. [2003], *Omega-6/Omega-3 Ratio and Brain-Related Functions*, Simopoulos AP, World Rev Nutr Diet., 92:37-56.
- YIN D., GRIFFIN M.J., ETHERTON T.D. [2001], *Analysis of the signal pathways involved in the regulation of fatty acid synthase gene expression by insuline and somatotropin*, J. Animal Sci., 79:1194-1200 (cité par LOCK et al., 2003).
- ZAMPELAS A., PASCHOS G., RALLIDIS L., YIANNAKOURIS N. [2003], *Linoleic Acid to Alpha-Linolenic Acid Ratio*, Simopoulos AP, World Rev Nutr Diet., 92:92-108.
-

ANNEXES

Liste des annexes

ANNEXE I.: FEUILLE DE PRISE D'ECHANTILLON.

ANNEXE II.: COEFFICIENTS DE VARIATION ($100 \times \sigma / m$) DES ABSORBANCES DU SPECTRE DU LAIT ENTIER STANDARD ET ENRICHI.

ANNEXE III.: CHROMATOGRAMME D'UNE MATIERE GRASSE LAITIERE ET IDENTIFICATION DES ACIDES GRAS REPRIS DANS LE PROFIL ETUDIE.

ANNEXE IV.: RESULTATS CHROMATOGRAPHIQUES UTILISES POUR ESTIMER LES DROITES DE CALIBRAGE.

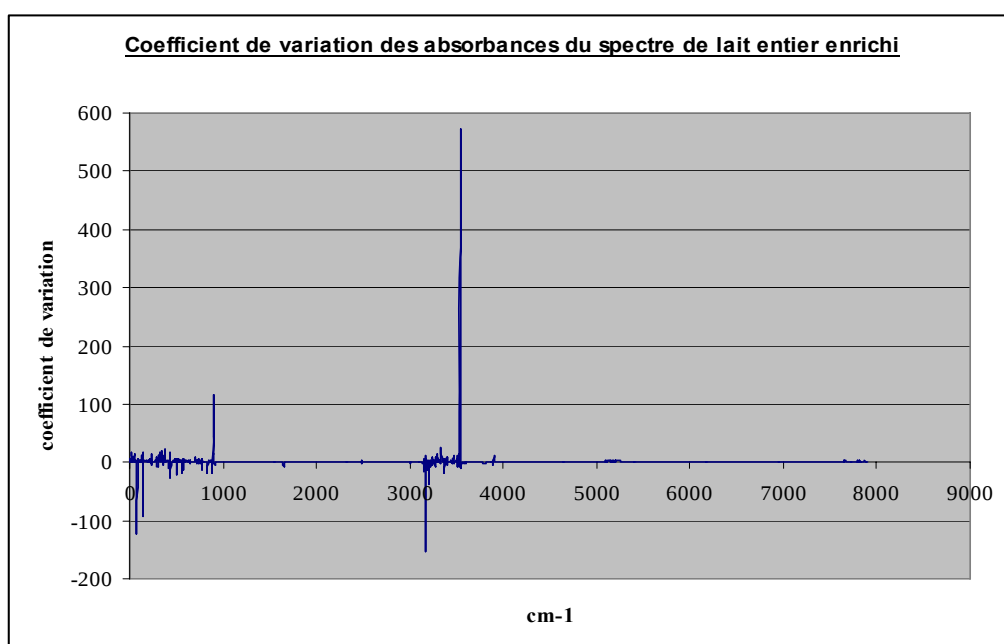
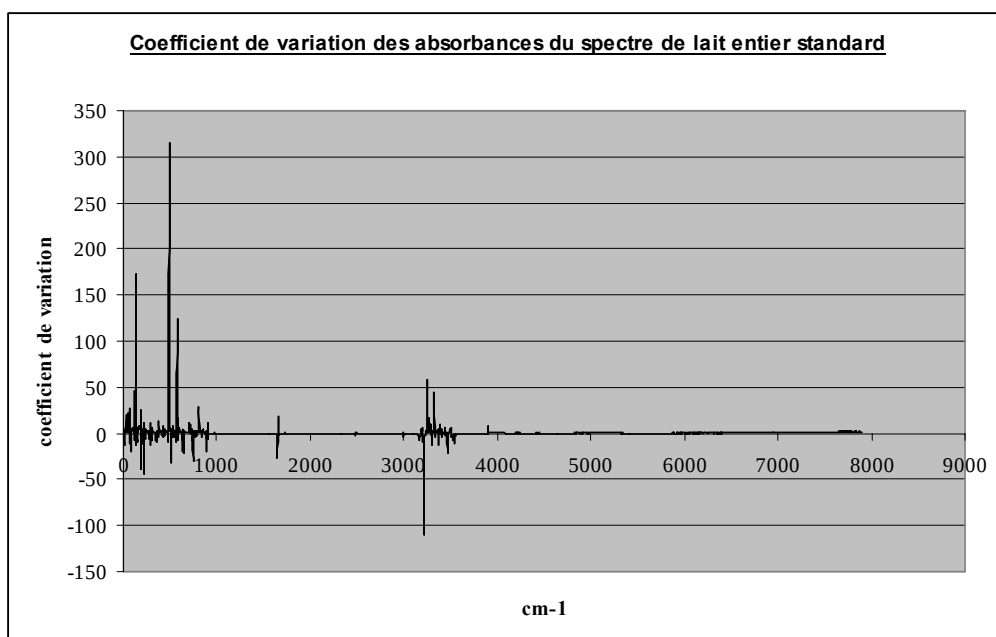
ANNEXE V.: CARACTERISTIQUES DE LA POPULATION ANIMALE ETUDIEE.

ANNEXE VI.: RESULTATS OBTENUS PAR LES MODELES MIXTES POUR LES QUANTITES D'ACIDES GRAS C12:0, C14:0, C18:0 ET C18:1 DANS LE LAIT.

ANNEXE VII.: PARAMETRES STATISTIQUES DES TENEURS ESTIMEES EN ACIDES GRAS DANS LE LAIT (G / DL) ET DANS LA MATIERE GRASSE (%MG) DES ECHANTILLONS ANALYSES.

Annexe I.: Feuille de prise d'échantillon.

Annexe II.: Coefficients de variation ($100 \times \sigma / m$) des absorbances du spectre du lait entier standard et enrichi.



Annexe III.: *Chromatogramme d'une matière grasse laitière et identification des acides gras repris dans le profil étudié.*

Annexe IV.: Résultats chromatographiques utilisés pour estimer les droites de calibrage.

Annexe V.: Caractéristiques de la population animale étudiée.

	Laits analysés	Animaux différents	Nombre de fermes
Blanc Bleu Mixte	66	29	2
Pie-rouge	182	85	5
Holstein	199	91	6
Jersey	78	31	1
Montbéliarde	73	37	1
Normande	2	2	1
Total	600	275	7

Annexe VI.: Résultats obtenus par les modèles mixtes pour les quantités d'acides gras C12:0, C14:0, C18:0 et C18:1 dans le lait.

Afin d'estimer le pourcentages de différences des teneurs en C12:0, C14:0, C18:0 et C18:1 dans le lait de Jersey et d'Holstein, le recours au résultats du modèle mixte sont utilisés.

EXEMPLE POUR ESTIMER LA DIFFERENCE EN % DE TENEUR EN C14 :0 DANS LE LAIT D'ANIMAUX HOLSTEIN ET JERSEY

Par exemple, si les deux animaux Jersey et Holstein possédaient les caractéristiques suivantes :

- première lactation ;
- appartient au troupeau 500885 ;
- Date de contrôle : le 17/03/2005 ;
- Première classe de 15 jours en lactation.

Les différences de teneurs en C14:0 (en %) entre ces deux laits est de 24 %.

Holstein : $1,9323 - 1,2351 \text{ (valeur bp4)} - 0,051353 + 0,056632 - 0,31636 = 0,39 \text{ g / dl de lait.}$

Jersey : $1,9323 - 1,1417 \text{ (valeur bp7)} - 0,051353 + 0,056632 - 0,31636 = 0,48 \text{ g / dl de lait.}$

Par conséquent, la différence entre les deux est de 24 %.

SOLUTION DES EFFETS FIXES ISSUS DU MODELE MIXTE POUR LE C12:0

Standard Effect	dtest	trp	nlac	cjlac	Estimate	Error	DF	t	Pr
Intercept					124.29	68.7986	253	1.81	0.072
bp1					-1.0461	0.6877	277	-1.52	0.1294
bp2					-1.0358	0.6877	277	-1.51	0.1332
bp4					-1.0434	0.6875	277	-1.52	0.1302
bp7					-1.0105	0.6875	277	-1.47	0.1428
bp40					-1.0202	0.6888	277	-1.48	0.1397
bp50					-1.0722	0.6875	277	-1.56	0.12
bp100					-1.031	0.688	277	-1.5	0.1351
nlac			1		-2.4484	2.5609	277	-0.96	0.3399
nlac			2		-1.3667	2.5707	277	-0.53	0.5954
nlac			3		-1.2718	2.5613	277	-0.5	0.6199
nlac			4		-0.8897	2.5774	277	-0.35	0.7302
nlac			5		-1.0964	2.5852	277	-0.42	0.6718
nlac			6		-1.007	2.6162	277	-0.38	0.7006
nlac			7		0.6753	2.7252	277	0.25	0.8045
nlac			8		-1.3516	2.7842	277	-0.49	0.6277
nlac			9		0	.	.	.	.
dtest*trp	20050317	500885			1.9967	1.0324	277	1.93	0.0541
dtest*trp	20050321	200859			0.9136	0.8244	277	1.11	0.2687
dtest*trp	20050322	201539			-0.01292	0.7388	277	-0.02	0.9861
dtest*trp	20050325	900735			1.0596	0.8238	277	1.29	0.1994
dtest*trp	20050327	200057			-0.3882	0.7629	277	-0.51	0.6113
dtest*trp	20050405	500348			1.1509	0.432	277	2.66	0.0082
dtest*trp	20050418	500885			1.2495	1.0266	277	1.22	0.2246
dtest*trp	20050423	201539			2.2909	0.748	277	3.06	0.0024
dtest*trp	20050424	200859			2.2779	0.8314	277	2.74	0.0065
dtest*trp	20050426	900735			0.7841	0.8244	277	0.95	0.3423
dtest*trp	20050428	200057			0.8383	0.751	277	1.12	0.2653
dtest*trp	20050506	500348			0.8374	0.4102	277	2.04	0.0421
dtest*trp	20050512	900219			0.5925	0.7256	277	0.82	0.4149
dtest*trp	20050517	201539			-0.8193	0.7469	277	-1.1	0.2736
dtest*trp	20050519	500885			4.9291	1.0074	277	4.89	<.0001
dtest*trp	20050523	200859			-1.3222	0.8339	277	-1.59	0.114
dtest*trp	20050526	200057			0.7943	0.7599	277	1.05	0.2968
dtest*trp	20050607	500348			0	.	.	.	.
cjlac				1	-10.2577	2.5488	277	-4.02	<.0001
cjlac				2	-8.6065	2.4891	277	-3.46	0.0006
cjlac				3	-10.0904	2.5025	277	-4.03	<.0001
cjlac				4	-10.2396	2.492	277	-4.11	<.0001
cjlac				5	-9.5331	2.4905	277	-3.83	0.0002
cjlac				6	-8.8669	2.4843	277	-3.57	0.0004
cjlac				7	-8.1762	2.4795	277	-3.3	0.0011
cjlac				8	-8.0509	2.4979	277	-3.22	0.0014
cjlac				9	-7.9421	2.4869	277	-3.19	0.0016
cjlac				10	-7.6394	2.4772	277	-3.08	0.0022
cjlac				11	-7.6828	2.4697	277	-3.11	0.0021
cjlac				12	-7.5568	2.4731	277	-3.06	0.0025
cjlac				13	-7.2243	2.4646	277	-2.93	0.0037
cjlac				14	-7.406	2.465	277	-3	0.0029
cjlac				15	-7.0533	2.4644	277	-2.86	0.0045
cjlac				16	-7.8741	2.4647	277	-3.19	0.0016
cjlac				17	-6.8218	2.4777	277	-2.75	0.0063
cjlac				18	-8.3705	2.4973	277	-3.35	0.0009
cjlac				19	-6.7152	2.4945	277	-2.69	0.0075
cjlac				20	-7.5706	2.5084	277	-3.02	0.0028
cjlac				21	-6.0283	2.5115	277	-2.4	0.017
cjlac				22	-7.2335	2.5596	277	-2.83	0.0051
cjlac				23	-6.2994	2.557	277	-2.46	0.0144
cjlac				24	-7.5927	2.6217	277	-2.9	0.0041
cjlac				25	-6.6279	2.7691	277	-2.39	0.0174
cjlac				26	-6.2873	2.6903	277	-2.34	0.0201
cjlac				27	-6.9492	2.7607	277	-2.52	0.0124
cjlac				28	-6.4424	2.5344	277	-2.54	0.0116
cjlac				29	-5.1671	2.6344	277	-1.96	0.0508
cjlac				30	-6.5258	2.5422	277	-2.57	0.0108
cjlac				31	-5.9851	2.6147	277	-2.29	0.0228
cjlac				32	-5.4935	2.6076	277	-2.11	0.036
cjlac				33	-6.3799	2.6669	277	-2.39	0.0174
cjlac				34	-5.6504	3.167	277	-1.78	0.0755
cjlac				37	-7.1127	3.51	277	-2.03	0.0437
cjlac				39	-6.2308	3.5089	277	-1.78	0.0769
cjlac				41	-6.1304	3.5047	277	-1.75	0.0814
cjlac				62	0	.	.	.	.

SOLUTION DES EFFETS FIXES ISSUS DU MODELE MIXTE POUR LE C14:0

Standard Effect	dtest	trp	nlac	cjlac	Estimate	Error	DF	t	Pr
Intercept					193.23	188	253	1.03	0.305
bp1					-1.2553	1.8791	277	-0.67	0.5047
bp2					-1.2267	1.8793	277	-0.65	0.5144
bp4					-1.2351	1.8785	277	-0.66	0.5114
bp7					-1.1417	1.8787	277	-0.61	0.5439
bp40					-1.1604	1.8822	277	-0.62	0.5381
bp50					-1.2954	1.8786	277	-0.69	0.491
bp100					-1.1941	1.88	277	-0.64	0.5258
nlac			1		-5.1353	7.1462	277	-0.72	0.473
nlac			2		-2.1475	7.1706	277	-0.3	0.7648
nlac			3		-1.4404	7.1449	277	-0.2	0.8404
nlac			4		-0.9689	7.1886	277	-0.13	0.8929
nlac			5		-1.4713	7.2093	277	-0.2	0.8384
nlac			6		-0.8199	7.2943	277	-0.11	0.9106
nlac			7		3.1645	7.5847	277	0.42	0.6768
nlac			8		-3.4534	7.7443	277	-0.45	0.656
nlac			9		0	.	.	.	.
dtest*trp	20050317	500885			5.6632	2.8417	277	1.99	0.0473
dtest*trp	20050321	200859			0.7606	2.2885	277	0.33	0.7399
dtest*trp	20050322	201539			-3.3532	2.0529	277	-1.63	0.1035
dtest*trp	20050325	900735			2.959	2.2771	277	1.3	0.1949
dtest*trp	20050327	200057			-1.2731	2.1192	277	-0.6	0.5485
dtest*trp	20050405	500348			3.9661	1.2778	277	3.1	0.0021
dtest*trp	20050418	500885			0.7826	2.8265	277	0.28	0.7821
dtest*trp	20050423	201539			-3.3171	2.0845	277	-1.59	0.1127
dtest*trp	20050424	200859			-2.2247	2.3116	277	-0.96	0.3367
dtest*trp	20050426	900735			-7.323	2.2801	277	-3.21	0.0015
dtest*trp	20050428	200057			-2.1648	2.0842	277	-1.04	0.2999
dtest*trp	20050506	500348			0.1711	1.2172	277	0.14	0.8883
dtest*trp	20050512	900219			-1.1814	2.0124	277	-0.59	0.5576
dtest*trp	20050517	201539			-5.3408	2.0806	277	-2.57	0.0108
dtest*trp	20050519	500885			12.3504	2.7687	277	4.46	<.0001
dtest*trp	20050523	200859			-2.3192	2.3211	277	-1	0.3186
dtest*trp	20050526	200057			-1.0312	2.1114	277	-0.49	0.6256
dtest*trp	20050607	500348			0	.	.	.	.
cjlac				1	-31.636	7.1067	277	-4.45	<.0001
cjlac				2	-29.41	6.9295	277	-4.24	<.0001
cjlac				3	-31.9289	6.9704	277	-4.58	<.0001
cjlac				4	-33.3021	6.9402	277	-4.8	<.0001
cjlac				5	-31.7402	6.9362	277	-4.58	<.0001
cjlac				6	-30.685	6.9171	277	-4.44	<.0001
cjlac				7	-29.2993	6.9037	277	-4.24	<.0001
cjlac				8	-29.0917	6.9613	277	-4.18	<.0001
cjlac				9	-28.2269	6.9276	277	-4.07	<.0001
cjlac				10	-27.4795	6.898	277	-3.98	<.0001
cjlac				11	-27.3684	6.8753	277	-3.98	<.0001
cjlac				12	-26.3384	6.8858	277	-3.83	0.0002
cjlac				13	-25.6412	6.8593	277	-3.74	0.0002
cjlac				14	-26.6798	6.8608	277	-3.89	0.0001
cjlac				15	-25.1346	6.8584	277	-3.66	0.0003
cjlac				16	-27.8469	6.8598	277	-4.06	<.0001
cjlac				17	-24.9454	6.8995	277	-3.62	0.0004
cjlac				18	-28.9139	6.9601	277	-4.15	<.0001
cjlac				19	-25.1271	6.9499	277	-3.62	0.0004
cjlac				20	-26.0638	6.9916	277	-3.73	0.0002
cjlac				21	-23.4473	6.9986	277	-3.35	0.0009
cjlac				22	-25.4676	7.1484	277	-3.56	0.0004
cjlac				23	-22.9759	7.139	277	-3.22	0.0014
cjlac				24	-27.0855	7.345	277	-3.69	0.0003
cjlac				25	-25.8788	7.801	277	-3.32	0.001
cjlac				26	-24.2533	7.5367	277	-3.22	0.0014
cjlac				27	-26.5841	7.771	277	-3.42	0.0007
cjlac				28	-24.0057	7.0653	277	-3.4	0.0008
cjlac				29	-20.8818	7.3618	277	-2.84	0.0049
cjlac				30	-25.3754	7.0851	277	-3.58	0.0004
cjlac				31	-23.5622	7.3035	277	-3.23	0.0014
cjlac				32	-18.8036	7.2876	277	-2.58	0.0104
cjlac				33	-21.4266	7.4583	277	-2.87	0.0044
cjlac				34	-19.8943	8.9648	277	-2.22	0.0273
cjlac				37	-23.3696	9.7591	277	-2.39	0.0173
cjlac				39	-22.7621	9.7565	277	-2.33	0.0204
cjlac				41	-22.3435	9.7439	277	-2.29	0.0226
cjlac				62	0	.	.	.	.

SOLUTION DES EFFETS FIXES ISSUS DU MODELE MIXTE POUR LE C18:0

Standard Effect	dtest	trp	nlac	cjlac	Estimate	Error	DF	t	Pr
Intercept					350.95	274.78	253	1.28	0.2027
bp1					-2.7833	2.7463	277	-1.01	0.3117
bp2					-2.7431	2.7465	277	-1	0.3188
bp4					-2.7348	2.7453	277	-1	0.32
bp7					-2.5905	2.7456	277	-0.94	0.3463
bp40					-2.6674	2.7508	277	-0.97	0.3331
bp50					-2.7517	2.7456	277	-1	0.3171
bp100					-2.6417	2.7476	277	-0.96	0.3371
nlac			1		3.4124	10.6708	277	0.32	0.7494
nlac			2		2.6652	10.7035	277	0.25	0.8035
nlac			3		2.1456	10.6659	277	0.2	0.8407
nlac			4		2.9039	10.7294	277	0.27	0.7869
nlac			5		1.9632	10.7589	277	0.18	0.8553
nlac			6		2.5246	10.8832	277	0.23	0.8167
nlac			7		3.4979	11.2968	277	0.31	0.7571
nlac			8		0.2699	11.5281	277	0.02	0.9813
nlac			9		0	.	.	.	.
dtest*trp	20050317	500885			17.6654	4.1845	277	4.22	<.0001
dtest*trp	20050321	200859			-0.5268	3.3992	277	-0.15	0.8769
dtest*trp	20050322	201539			-3.7426	3.052	277	-1.23	0.2211
dtest*trp	20050325	900735			5.8407	3.3677	277	1.73	0.084
dtest*trp	20050327	200057			5.8453	3.1495	277	1.86	0.0645
dtest*trp	20050405	500348			6.9021	2.0076	277	3.44	0.0007
dtest*trp	20050418	500885			11.893	4.1629	277	2.86	0.0046
dtest*trp	20050423	201539			-12.1954	3.1076	277	-3.92	0.0001
dtest*trp	20050424	200859			-1.4173	3.4389	277	-0.41	0.6805
dtest*trp	20050426	900735			-11.4657	3.3742	277	-3.4	0.0008
dtest*trp	20050428	200057			4.2397	3.0948	277	1.37	0.1718
dtest*trp	20050506	500348			3.472	1.9184	277	1.81	0.0714
dtest*trp	20050512	900219			-0.2918	2.9864	277	-0.1	0.9222
dtest*trp	20050517	201539			-7.3259	3.1004	277	-2.36	0.0188
dtest*trp	20050519	500885			14.4527	4.0712	277	3.55	0.0005
dtest*trp	20050523	200859			0.5431	3.4568	277	0.16	0.8753
dtest*trp	20050526	200057			-1.1621	3.1389	277	-0.37	0.7115
dtest*trp	20050607	500348			0	.	.	.	.
cjlac				1	-6.6777	10.6045	277	-0.63	0.5294
cjlac				2	-28.3356	10.3257	277	-2.74	0.0065
cjlac				3	-30.2021	10.3917	277	-2.91	0.004
cjlac				4	-38.2364	10.3455	277	-3.7	0.0003
cjlac				5	-37.3898	10.3398	277	-3.62	0.0004
cjlac				6	-34.8476	10.3088	277	-3.38	0.0008
cjlac				7	-35.7404	10.2889	277	-3.47	0.0006
cjlac				8	-36.1779	10.3836	277	-3.48	0.0006
cjlac				9	-34.9793	10.3292	277	-3.39	0.0008
cjlac				10	-35.1408	10.2815	277	-3.42	0.0007
cjlac				11	-33.2424	10.2453	277	-3.24	0.0013
cjlac				12	-34.1198	10.2626	277	-3.32	0.001
cjlac				13	-31.1858	10.2192	277	-3.05	0.0025
cjlac				14	-33.1045	10.2218	277	-3.24	0.0013
cjlac				15	-30.8904	10.217	277	-3.02	0.0027
cjlac				16	-34.2463	10.2199	277	-3.35	0.0009
cjlac				17	-31.0317	10.2838	277	-3.02	0.0028
cjlac				18	-35.0234	10.3826	277	-3.37	0.0008
cjlac				19	-29.9668	10.3637	277	-2.89	0.0041
cjlac				20	-31.9107	10.4294	277	-3.06	0.0024
cjlac				21	-28.7077	10.4372	277	-2.75	0.0063
cjlac				22	-30.6647	10.6823	277	-2.87	0.0044
cjlac				23	-26.7178	10.6657	277	-2.51	0.0128
cjlac				24	-32.1441	11.0096	277	-2.92	0.0038
cjlac				25	-29.8389	11.7524	277	-2.54	0.0117
cjlac				26	-26.1209	11.2934	277	-2.31	0.0215
cjlac				27	-32.8614	11.698	277	-2.81	0.0053
cjlac				28	-26.3654	10.5412	277	-2.5	0.013
cjlac				29	-25.8141	11.0067	277	-2.35	0.0197
cjlac				30	-29.215	10.568	277	-2.76	0.0061
cjlac				31	-29.889	10.9156	277	-2.74	0.0066
cjlac				32	-18.3547	10.8982	277	-1.68	0.0933
cjlac				33	-22.7318	11.1581	277	-2.04	0.0426
cjlac				34	-23.0023	13.5502	277	-1.7	0.0907
cjlac				37	-16.9521	14.5252	277	-1.17	0.2442
cjlac				39	-19.4767	14.5218	277	-1.34	0.181
cjlac				41	-20.6033	14.5018	277	-1.42	0.1565
cjlac				62	0	.	.	.	.

SOLUTION DES EFFETS FIXTES ISSUS DU MODELE MIXTE POUR LE C18:1

Standard Effect	dtest	trp	nlac	cjlac	Estimate	Error	DF	t	Pr
Intercept					370.34	584.01	253	0.63	0.5266
bp1					-2.1101	5.8366	277	-0.36	0.718
bp2					-2.1317	5.8371	277	-0.37	0.7152
bp4					-2.0641	5.8344	277	-0.35	0.7238
bp7					-1.8741	5.8351	277	-0.32	0.7483
bp40					-2.0394	5.8462	277	-0.35	0.7275
bp50					-1.9574	5.8351	277	-0.34	0.7375
bp100					-1.9133	5.8392	277	-0.33	0.7434
nlac			1		3.8603	23.1931	277	0.17	0.8679
nlac			2		-1.5113	23.2564	277	-0.06	0.9482
nlac			3		-0.9263	23.1769	277	-0.04	0.9681
nlac			4		-1.2182	23.3104	277	-0.05	0.9584
nlac			5		-1.5826	23.3716	277	-0.07	0.9461
nlac			6		-0.4173	23.6351	277	-0.02	0.9859
nlac			7		-9.4857	24.4907	277	-0.39	0.6988
nlac			8		5.8566	24.9785	277	0.23	0.8148
nlac			9		0	.	.	.	.
dtest*trp	20050317	500885			32.8722	8.963	277	3.67	0.0003
dtest*trp	20050321	200859			-24.3863	7.3475	277	-3.32	0.001
dtest*trp	20050322	201539			-13.8434	6.6027	277	-2.1	0.0369
dtest*trp	20050325	900735			-9.4159	7.2468	277	-1.3	0.1949
dtest*trp	20050327	200057			2.1246	6.8109	277	0.31	0.7553
dtest*trp	20050405	500348			-14.1295	4.5686	277	-3.09	0.0022
dtest*trp	20050418	500885			34.4571	8.919	277	3.86	0.0001
dtest*trp	20050423	201539			-20.5513	6.7405	277	-3.05	0.0025
dtest*trp	20050424	200859			1.5068	7.4442	277	0.2	0.8397
dtest*trp	20050426	900735			-9.6843	7.2655	277	-1.33	0.1837
dtest*trp	20050428	200057			10.9175	6.6877	277	1.63	0.1037
dtest*trp	20050506	500348			12.1576	4.3779	277	2.78	0.0059
dtest*trp	20050512	900219			9.3642	6.4498	277	1.45	0.1477
dtest*trp	20050517	201539			-0.2916	6.7217	277	-0.04	0.9654
dtest*trp	20050519	500885			5.1188	8.7093	277	0.59	0.5572
dtest*trp	20050523	200859			9.1877	7.4917	277	1.23	0.2211
dtest*trp	20050526	200057			-5.4948	6.7907	277	-0.81	0.4191
dtest*trp	20050607	500348			0	.	.	.	.
cjlac				1	46.668	23.0346	277	2.03	0.0437
cjlac				2	-41.4087	22.4012	277	-1.85	0.0656
cjlac				3	-32.6042	22.5537	277	-1.45	0.1494
cjlac				4	-57.9488	22.4516	277	-2.58	0.0104
cjlac				5	-58.8913	22.44	277	-2.62	0.0092
cjlac				6	-58.7938	22.3672	277	-2.63	0.0091
cjlac				7	-64.5125	22.3244	277	-2.89	0.0042
cjlac				8	-63.8874	22.5481	277	-2.83	0.0049
cjlac				9	-62.7163	22.4214	277	-2.8	0.0055
cjlac				10	-64.5984	22.3111	277	-2.9	0.0041
cjlac				11	-58.7798	22.2279	277	-2.64	0.0087
cjlac				12	-61.4389	22.2687	277	-2.76	0.0062
cjlac				13	-55.0934	22.1667	277	-2.49	0.0135
cjlac				14	-56.7364	22.1734	277	-2.56	0.011
cjlac				15	-51.7521	22.16	277	-2.34	0.0202
cjlac				16	-54.7789	22.1681	277	-2.47	0.0141
cjlac				17	-50.0185	22.3165	277	-2.24	0.0258
cjlac				18	-50.8486	22.5477	277	-2.26	0.0249
cjlac				19	-48.4603	22.499	277	-2.15	0.0321
cjlac				20	-49.1292	22.6475	277	-2.17	0.0309
cjlac				21	-48.5792	22.6587	277	-2.14	0.0329
cjlac				22	-41.5329	23.2342	277	-1.79	0.0749
cjlac				23	-42.8803	23.1934	277	-1.85	0.0655
cjlac				24	-42.5493	24.017	277	-1.77	0.0776
cjlac				25	-56.9595	25.7577	277	-2.21	0.0278
cjlac				26	-33.0078	24.6235	277	-1.34	0.1812
cjlac				27	-39.6265	25.6186	277	-1.55	0.1231
cjlac				28	-38.7745	22.8949	277	-1.69	0.0915
cjlac				29	-39.3226	23.9498	277	-1.64	0.1018
cjlac				30	-40.1148	22.9473	277	-1.75	0.0816
cjlac				31	-43.9272	23.7447	277	-1.85	0.0654
cjlac				32	-21.5681	23.7217	277	-0.91	0.364
cjlac				33	-24.6183	24.2931	277	-1.01	0.3118
cjlac				34	-4.6866	29.7602	277	-0.16	0.875
cjlac				37	-4.5233	31.4769	277	-0.14	0.8858
cjlac				39	-9.3307	31.4705	277	-0.3	0.7671
cjlac				41	-24.7059	31.4247	277	-0.79	0.4324
cjlac				62	0	.	.	.	.

Annexe VII.: Paramètres statistiques des teneurs estimées en acides gras dans le lait (g / dl) et dans la matière grasse (%MG) des échantillons analysés.

	Quantités en acides gras dans le lait (g / dl de lait)										
	MG	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1*	C18:0	C18:1	C18:2**	SAT	INSAT	MONO
moyenne	4.30	0.12	0.41	1.13	0.05	0.52	1.16	0.08	2.88	1.48	1.27
écart-type	0.90	0.03	0.10	0.31	0.02	0.15	0.31	0.02	0.67	0.32	0.32
coefficient de variation	21.00	26.77	23.32	27.01	31.76	29.10	26.82	22.55	23.12	21.50	25.02
max	7.75	0.26	0.80	1.95	0.18	1.09	3.47	0.19	5.25	3.60	3.55
min	1.99	0.03	0.20	0.42	0.01	0.13	0.55	0.04	1.30	0.72	0.66

* C16:1 9-cis ; ** C18:2 9-cis,12-cis ; INSAT = insaturés

	Quantités en acides gras dans la matière grasse (%MG)			
	C12:0	C14:0	SAT	INSAT
moyenne	2.84	9.67	66.44	33.56
écart-type	0.47	1.04	4.06	4.06
coefficient de variation	16.69	10.80	6.11	12.10
max	4.10	12.03	77.48	54.68
min	0.82	2.22	45.32	22.52