

Table de matières

Résumé.....	III
Abstract	V
Table de matières.....	VII
Liste de tableaux	X
Liste de figures.....	XI
Liste des abréviations	XIII
Remerciements.....	XV
Avant-propos.....	XVII
CHAPITRE I	1
1 Introduction	1
CHAPITRE II.....	3
2 Revue des travaux antérieurs.....	3
2.1 Importance de la composition du lait en production laitière	3
2.2 Synthèse des matières grasses du le lait	5
2.3 Facteurs influençant la teneur en matières grasses du lait.....	7
2.3.1 Facteurs liés à l’animal	7
2.3.1.1 Impact de la génétique.....	7
2.3.1.2 Impact du stade de lactation	9
2.3.1.3 Impact des hormones.....	10
2.3.1.4 Impact des maladies	13
2.3.1.4.1 Mammite	13
2.3.1.4.2 Acidose ruminale.....	14
2.3.2 Facteurs liés à la gestion et à l’environnement.....	16
2.3.2.1 Traite.....	16
2.3.2.2 Système d’alimentation et fréquence d’alimentation	17
2.3.2.3 Saison	18
2.3.3 Facteurs alimentaires	18
2.3.3.1 Impact des fibres.....	19
2.3.3.2 Rapport fourrages : concentrés.....	23
2.3.3.3 Choix des aliments énergétiques	24
2.3.3.3.1 Utilisation de l’amidon.....	25
2.3.3.3.2 Utilisation des sucres.....	27
2.3.3.3.3 Utilisation des lipides	28
2.3.3.3.3.1 Effets de l’acide palmitique.....	30
2.3.3.4 Différence alimentaire cations-anions (DACA).....	31
2.4 Fractions de la protéine du lait	37

2.5	Facteurs influençant la teneur en protéines et en urée du lait.....	38
2.5.1	Facteurs liés à l'animal	39
2.5.1.1	Impact de la génétique.....	39
2.5.1.2	Impact du stade de lactation et de la parité.....	40
2.5.1.3	Impact des maladies	41
2.5.2	Facteurs de régie et environnementaux	42
2.5.2.1	Gestion de la traite et fréquence d'alimentation.....	42
2.5.2.2	Saison	43
2.5.3	Facteurs liés à l'alimentation	44
2.5.3.1	Besoins en protéines des vaches laitières	44
2.5.3.2	Impact de l'alimentation sur la teneur en protéines du lait	47
2.5.3.3	Efficience de l'utilisation de l'azote.....	50
2.6	Hypothèses et objectif	53
2.6.1	Premier projet	53
2.6.2	Deuxième projet	54
2.6.3	Troisième projet.....	54
2.7	Bibliographie.....	55
	CHAPITRE III	75
3	Relationship between milk fat concentration and diet composition with a special emphasis on dietary cation-anion difference in commercial dairy herds	75
3.1	Résumé	76
3.2	Abstract	77
3.3	Introduction	79
3.4	Materials and methods.....	80
3.4.1	Data.....	80
3.4.2	Statistical analysis.....	82
3.5	Results and discussion.....	83
3.5.1	Descriptive statistics	83
3.5.2	Prediction models	84
3.5.2.1	General description.....	84
3.5.2.2	Effect of EBV MFC	85
3.5.2.3	Effect of DCAD.....	86
3.5.2.4	Effect of concentrate.....	87
3.5.2.5	Effect of TMR	88
3.5.2.6	Effect of PALM80.....	88
3.5.2.7	Effect of grazing in summer models	89
3.6	Conclusion.....	90
3.7	Acknowledgements	90

3.8	References	104
CHAPITRE IV.....		108
4	Relationship between milk urea nitrogen or urea nitrogen to protein ratio and dietary crude protein in commercial dairy herds.....	108
4.1	Résumé	109
4.2	Abstract	110
4.3	Short Communication.....	112
4.4	Acknowledgments	115
4.5	References	116
CHAPITRE V		122
5	Nitrogen efficiency of commercial dairy herds: impact on production performance and farm profitability.....	122
5.1	Résumé	123
5.2	Abstract	124
5.3	Introduction	126
5.4	Materials and methods.....	127
5.4.1	Data collection.....	127
5.4.2	Calculations	129
5.4.3	Data Analysis.....	130
5.5	Results and discussion.....	131
5.6	Conclusions	137
5.7	Acknowledgments	137
5.8	References	139
CHAPITRE VI.....		148
6	Discussion et conclusions	148
6.1	Discussion générale.....	149
6.2	Conclusion.....	156
6.3	Bibliographie.....	158

Liste de tableaux

Tableau 2.1 Effets de la supplémentation lipidique sur la production et la composition du lait.....	29
Tableau 2.2 Résumé des études de l'effet de la différence alimentaire cations-anions (DACA) sur la matière sèche ingérée, la production laitière et la composition du lait, en utilisant l'équation $DACA = (Na + K - Cl)$	34
Tableau 2.3 Résumé des études de l'effet de la différence alimentaire cations-anions (DACA) sur la matière sèche ingérée, la production laitière et la composition du lait, en utilisant l'équation $DACA = (Na + K) - (Cl + S)$	35
Tableau 2.4 Valeurs recommandées pour l'urée du lait par groupe.....	38
Tableau 2.5 Variations des teneurs en urée et en protéines du lait selon différentes conditions nutritionnelles de la vache	50
Table 3.1 Milk yield and composition during winter and summer at different stages of lactation	92
Table 3.2 Statistical description of diet composition during winter and summer at different stages of lactation	93
Table 3.3 Statistical description of the variables included in models for winter and summer at different stages of lactation.....	94
Table 3.4 Regression parameters between the residuals and the predicted MFC (centered around the mean) in models for winter and summer at different stages of lactation	95
Table 3.5 Relationship between milk fat concentration and explicative variables at different stages of lactation during winter and summer seasons.....	96
Table 4.1 Milk yield and composition by feeding management groups for 100 herds with a positive correlation in comparison to 100 herds with a negative correlation between MUN or MUN:PROT ratio and dietary crude protein (DCP).....	118
Table 4.2 Diet chemical composition and feedstuff categories by feeding management groups for 100 herds with a positive correlation in comparison to 100 herds with a negative correlation between MUN or MUN:PROT ratio and dietary crude protein (DCP).....	119
Table 5.1 Average milk and component yields, FCM, and milk composition for 100 dairy herds of the province of Québec divided into 4 clusters according their nitrogen efficiency	146
Table 5.2 Average intake, diet parameters, type of forage, RDP and MP balances, energy efficiency, and IOFC for 100 dairy herds of the province of Québec divided into 4 clusters according to their nitrogen efficiency	147

Liste de figures

Figure 2.1 Effet de la variation dans la teneur en matières grasses du lait sur le bénéfice net des fermes laitières.	4
Figure 2.2 Rôles des nutriments intervenants dans la synthèse de matières grasses du lait.	6
Figure 2.3 Teneur en matière grasse du lait en fonction du stade de lactation.....	9
Figure 2.4 Évolution de la matière grasse du lait pendant la traite.	17
Figure 2.5 Biohydrogénation ruminale : Sentier normal (ligne continue) et altération du sentier (ligne en tiret).....	19
Figure 2.6 Représentation schématique de la classification des glucides végétaux.	20
Figure 2.7 Taux de fermentation ruminale théorique selon le temps après l'ingestion des glucides et les sources d'azote ruminale nécessaire pour soutenir la synthèse de protéine microbienne.	46
Figure 2.8 Associations entre la teneur en urée du lait et ■ l'efficacité de l'utilisation de l'azote alimentaire (N sécrété dans lait/N ingéré) et ● la production de protéines du lait.	52
Figure 3.1 Dietary cation-anion distribution during winter (A) and summer (B) seasons.	97
Figure 3.2 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak lactation when feedstuffs were fed as TMR (dashed line) or separately (solid line) for diets varying DCAD during summer season ($P = 0.01$).	98
Figure 3.3 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak lactation during summer when grazing (dashed line) or without grazing (solid line) for diets varying DCAD ($P < 0.01$).	99
Figure 3.4 Interaction between results for milk fat concentration of cows when feedstuffs were fed as TMR (dashed line) or separately (solid line) for diets varying in the proportion of concentrate in mid (A) and late (B) lactation during winter ($P < 0.01$) and in peak (C) ($P < 0.01$) and mid (D) ($P < 0.001$) lactation during summer.....	100
Figure 3.5 Interaction between results for milk fat concentration of cows in mid lactation during summer when grazing (dashed line) or without grazing (solid line) for diets varying in the proportion of concentrate in the diet ($P < 0.01$).	101
Figure 3.6 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak (A) and mid (B) lactation during winter with (dashed line) and without (solid line) the addition of supplements having more than 80% of palmitic acid in the diet when varying DCAD ($P < 0.01$).	102
Figure 3.7 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak lactation during summer with grazing or without grazing for diets with or without the	

addition of supplements having more than 80% of palmitic acid (PALM80) in the diet (P = 0.01).....	103
Figure 4.1 Distribution of the correlation within herds between MUN (A) or MUN: milk protein (B) and dietary CP over 36 months (n = 1,903 herds).	121
Figure 5.1 Tree plot from cluster analysis.....	144
Figure 5.2 Relationship between nitrogen efficiency and energy efficiency of commercial dairy herds (n = 100; r = 0.82). Nitrogen efficiency was calculated as [100 × milk N secretion / dietary N intake]. Energy efficiency was calculated as [100 × milk energy concentration (Mcal/kg) × milk yield (kg/d) / NE _L intake (Mcal/d)].	145

Liste des abréviations

AA	Acides aminés
ADF	Fibre insoluble au détergent acide
ADF	Acid detergent insoluble fiber
ADICP	Acid detergent insoluble crude protein
AFS	Automatic feeding system
AG	Acides gras
AGNE	Acides gras non estérifiés
AGV	Acides gras volatiles
AUL	Azote uréique du lait
BHB	β – hydroxybutyrate
BW	Body weight
c	Cis
CONC	Proportion of concentrate
CP	Crude protein
DACA	Différence alimentaire cations–anions
DCAD	Dietary cation-anion difference
DCP	Dietary crude protein
DHI	Dairy herd improvement
DIM	Days in milk
DM	Dry matter
DMI	Dry matter intake
EBV MFC	Estimated breeding value for milk fat concentration
FCM	Fat corrected milk
FMG	Feeding management group
GF	Glucides fibreux
GNF	Glucides non fibreux
GNS	Glucides non structuraux
GS	Glucides structuraux
IOFC	Income over feed cost
JEL	Jours en lactation
MCF	Manual component feeding
MFC	Milk fat concentration
MG	Matières grasses
MP	Metabolizable protein
MS	Matière sèche
MSI	Matière sèche ingérée
MUN	Milk urea nitrogen

NDF	Fibre insoluble au détergent neutre
NDF	Neutral detergent fiber
NDFe	Fibre soluble au détergent neutre efficace
NDFpe	Fibres insolubles au détergent neutre physiquement efficaces
NDICP	Neutral detergent insoluble crude protein
NE	Nitrogen efficiency
NEG	Negative correlations
NE _L	Net energy of lactation
NFC	Non fiber carbohydrates
OM	Organic matter
PALM80	Supplements with more than 80% of palmitic acid
PID	Protéine ingérée dégradable
PIND	Protéine ingérée non dégradable
PMi	Protéine microbienne
POS	Positive correlations
RDP	Rumen degradable protein
RFI	Residual feed intake
RTM	Ration totale mélangée
RUP	Rumen undegradable protein
SCC	Somatic cell count
SNG	Solides non gras
t	Trans
TD	Test date
TDN	Total digestible nutrients
TG	Triglycérides
TMG	Teneur en matières grasses
TMR	Total mixed ration
TPF	Taille de particules du fourrage
VEE	Valeur d'élevage estimée
VFA	Volatile fatty acids

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice et mon co directeur de recherche, Édith Charbonneau et Yvan Chouinard respectivement, ainsi que Doris Pellerin pour leur soutien et leur patience tout au long de mes études doctorales.

Je voudrais spécialement remercier Édith pour sa patience tout au long de ce parcours et pour m'avoir donné l'opportunité de continuer mes études. J'ai beau chercher, j'arrive toujours à la même conclusion, il n'y a pas de mots suffisants pour te remercier !

Je voudrais aussi remercier Michel Wattiaux de l'Université du Wisconsin pour ses conseils et pour avoir fait partie de ce processus.

Je voudrais aussi souligner le soutien financier provenant de la Chaire de recherche industrielle CRSNG/Novalait-PLC-FPLQ-MAPAQ-Valacta sur le contrôle nutritionnel de la production des constituants du lait chez la vache pour mes études de doctorat. Dans le cadre de cette chaire de recherche, j'ai également bénéficié d'un accès à la banque de données de Valacta. Je tiens à remercier cet organisme pour ces données.

À toute la gang de sciences animales, Véronique, Maxime, Daniel, René, Eric, Enrique, Ann-So, Lucie... pour avoir partagé les diners, les voyages, les discussions et, surtout, beaucoup de bonheur ☺! Merci !

Véro, un merci spécial pour les petites pauses bavardage, et, bien sûr, les pauses café ☺!

Le troisième projet de cette thèse n'aurait pas été possible sans la participation et le temps de 100 producteurs, à chacun d'eux un gros merci ! À Roxane Robichaud, Valérie Audet et Isabelle Duval, merci d'avoir partagé avec moi la collecte de données des fermes !

René, muchas gracias por el apoyo durante todos estos años, que son muchos!

A mis abuelas, a Ligia Maria, Eric, Santiago y Pablo, muchas gracias por el apoyo de siempre! Los quiero mucho!

A mi mamá y mis hermanos, aunque lejos, siempre han estado incondicionalmente apoyándome! Ma, porque siempre has sido un ejemplo a seguir, Susana y Pablo sin ustedes nada de esto hubiera sido posible! Los adoro! Y Antonia por el solo hecho de existir! Los adoro infinitamente!

Avant-propos

Cette thèse comprend une introduction (Chapitre 1), une revue des travaux antérieurs (Chapitre 2), trois chapitres présentant de résultats de recherche (Chapitres 3 à 5) ainsi qu'une discussion et une conclusion générale (Chapitre 6). Les Chapitres 3 à 5 sont rédigés en anglais et présentés sous forme de manuscrits. Les Chapitres 3 et 4 seront soumis sous peu à une revue scientifique dans une optique de publication. Tandis que le Chapitre 5 a été soumis pour publication. Je suis la première auteure de tous les articles, ayant analysé les données nécessaires à la rédaction et les ayant rédigés sous la supervision de ma directrice et de mon co directeur de thèse. Dans le cas du dernier article, j'ai aussi participé activement à la collecte de données sur les fermes.

Chapitre 3 :

L. Fadul-Pacheco, D. Pellerin, P. Y. Chouinard et É. Charbonneau.

Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, Canada G1V 0A6

Relationship between milk fat concentration and diet composition with a special emphasis on dietary cation-anion difference in commercial dairy herds.

Chapitre 4:

L. Fadul-Pacheco*, D. Pellerin*, P. Y. Chouinard*, M. A. Wattiaux† and E. Charbonneau*

*Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, Canada G1V 0A6

†Department of Dairy Science, University of Wisconsin, Madison, WI 53706

Relationship between milk urea nitrogen or urea nitrogen to protein ratio and dietary crude protein in commercial dairy herds.

Chapitre 5:

L. Fadul-Pacheco*, D. Pellerin*, P. Y. Chouinard*, M. A. Wattiaux†, M. Duplessis‡ and É. Charbonneau*

*Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, Canada G1V 0A6

†Department of Dairy Science, University of Wisconsin, Madison, WI 53706

‡ Valacta, Dairy Production Centre of Expertise Québec-Atlantic, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada H9X 3R4

Nitrogen efficiency of commercial dairy herds: impact on production performance and farm profitability.

Chapitre I

1 Introduction

Une optimisation de la composition du lait est très importante sous les conditions du marché canadien puisque le paiement du lait se fait en fonction de ses composantes. En effet, les producteurs sont payés selon les quantités de gras, de protéines, et de lactose et autres solides du lait. Il y a donc un intérêt à pouvoir faire varier ces derniers pour améliorer le profit des fermes. La modulation de la composition du lait des vaches peut être effectuée par des modifications aux rations et par l'amélioration génétique. Les changements dans la ration sont souvent privilégiés, puisque la réponse est plus rapide.

L'ampleur des variations est plus grande pour la teneur en matières grasses (**TMG**) du lait que pour les autres composantes. Dans la littérature, des changements jusqu'à trois unités de pourcentage sont rapportés pour cette composante (Jenkins et McGuire, 2006). Pour moduler la TMG du lait, il est connu que des rations pauvres en fibre, riches en concentrés et avec des teneurs élevées en acides gras polyinsaturés diminuent la TMG. En contrepartie, des substances tampons sont normalement utilisées pour atténuer cette chute. Des études plus récentes suggèrent que les minéraux et la différence alimentaire cations-anions de la ration peuvent aussi avoir un effet sur les composantes du lait (Hu et al., 2007b; Iwaniuk et al., 2015), et plus spécialement sur sa TMG. Malgré l'importance de l'alimentation des vaches sur la TMG, cet effet peut aussi varier en fonction d'autres facteurs comme le nombre de lactations, les jours en lactation (**JEL**), la durée du tarissement, le génotype et le niveau de production (Hansen et al., 2006; Brun-Lafleur et al., 2010). Par exemple, la TMG chez les vaches en milieu et en fin de la lactation est plus sensible aux changements de la ration que celle chez les vaches au début de la lactation (Allen, 1997; NRC, 2001).

Les modifications de la teneur en protéines (**TP**) du lait par des changements dans l'alimentation des vaches sont de plus faible ampleur que pour la TMG, soit

approximativement de 0,6 unité de pourcentage (Varga et Ishler, 2007). De plus, la réponse à des modifications dans la ration se traduit par de plus fortes variations pour la production et la concentration en protéines du lait chez les vaches multipares que chez les vaches primipares (Radcliff et al., 2000; Brun-Lafleur et al., 2010). Ces dernières pourraient couvrir préférentiellement leurs besoins de croissance au détriment de la production de protéines du lait.

Outre son importance économique, la composition du lait peut être utilisée comme un outil de gestion de l'alimentation ou d'évaluation environnementale. En effet, l'information de la littérature démontre que l'urée du lait est un indicateur de l'efficacité de l'utilisation de la protéine de la ration et des rejets d'azote dans l'environnement (Nousiainen et al., 2004). Aussi, l'efficacité d'utilisation de l'azote, qui est calculée en partie à partir de la production en protéines du lait, est un indicateur environnemental qui permet une première évaluation des performances de l'entreprise par rapport à sa gestion de l'azote.

Considérant l'importance que la composition du lait peut avoir sur une ferme laitière, une étude plus approfondie des principaux facteurs qui en sont des sources de variation dans le contexte canadien de production était nécessaire. Ainsi, en plus d'une revue de la littérature sur le sujet, cette thèse contient les résultats de trois études. La première avait comme objectif d'évaluer l'effet de la différence alimentaire cations-anions sur la TMG du lait. La deuxième portait sur une meilleure compréhension des facteurs de variation de la teneur en urée du lait comme outil de gestion de l'alimentation pour les fermes laitières. Pour la réalisation de ces études, la base de données de Valacta, Centre d'expertise en production laitière Québec-Atlantique, a été utilisée. Cette base de données contient des informations sur la ration des vaches et la composition du lait de fermes commerciales du Québec. Finalement, la troisième étude visait à identifier les différences dans l'alimentation du troupeau et dans la gestion des fermes selon leur efficacité d'utilisation de l'azote.

Chapitre II

2 Revue des travaux antérieurs

Le suivi de la composition du lait peut servir à des fins diverses, par exemple, répondre aux besoins du marché, surveiller la santé des animaux, réduire l'impact environnemental et valoriser les acides gras (**AG**) bénéfiques pour la santé humaine. La composante la plus variable est le gras suivi de la protéine. Cette revue de littérature se concentrera sur ces deux composantes.

2.1 Importance de la composition du lait en production laitière

Au Canada, le marché du lait est soumis à la gestion de l'offre, ce qui signifie qu'il y a un équilibre entre la demande et la production (Bourbeau, 2010). Le quota de production est calculé par kilogramme des matières grasses (**MG**) du lait par jour (CCL, 2011). Le système de paiement du lait est basé sur la rémunération des composants et permet aux fermes de recevoir un prix par composant basé sur ses quantités produites (CCL, 2013; FPLQ, 2014a). Le prix de chacun des composants varie selon les besoins du marché. Par exemple, pour les années 2014 et 2015, les prix moyens étaient respectivement de 9,85 et 9,86 \$/kg pour les MG, 9,48 et 8,26 \$/kg pour les protéines et de 1,84 et 1,67 \$/kg pour le lactose et autres solides (Les producteurs de lait du Québec, 2016). Ainsi, le prix moyen du lait payé aux producteurs laitiers du Québec était de 76,23 et 71,46 \$/hl en 2014 et 2015 respectivement (Les producteurs de lait du Québec, 2016). Comme mentionné précédemment, ce sont les composants du lait qui sont pris en compte pour le paiement. Cependant, la production est limitée par le quota de production qui est exprimé en kilogrammes de MG par jour qu'une ferme peut produire (FPLQ, 2014b). Lorsque le niveau de production pour combler 100 % des besoins canadiens en MG sont calculés, 110 % des besoins en solides non gras (**SNG**) sont comblés du même coup. Ce surplus de SNG est

qualifié de structurel puisqu'il est associé à la production nécessaire aux besoins canadiens sur une base de MG, et ils doivent être éliminés sous forme de poudre de lait écrémé (FPLQ, 2004; Bourbeau, 2010). Donc, afin d'améliorer le contrôle de la production de surplus structurels, les producteurs se sont imposés des contraintes pour encourager la production de lait contenant un rapport de SNG sur la MG (SNG/MG) qui permet de diminuer le surplus structurel de poudre de lait écrémé (MAPAQ, 2009). Le surplus de SNG est vendu pour l'alimentation animale et l'exportation. Comme les ventes dans ces marchés ont pour effet de réduire le prix moyen aux producteurs (Lamoureux, 2003), les variations de composantes ont un impact majeur sur les revenus des producteurs de lait au Canada (Figure 2.1).

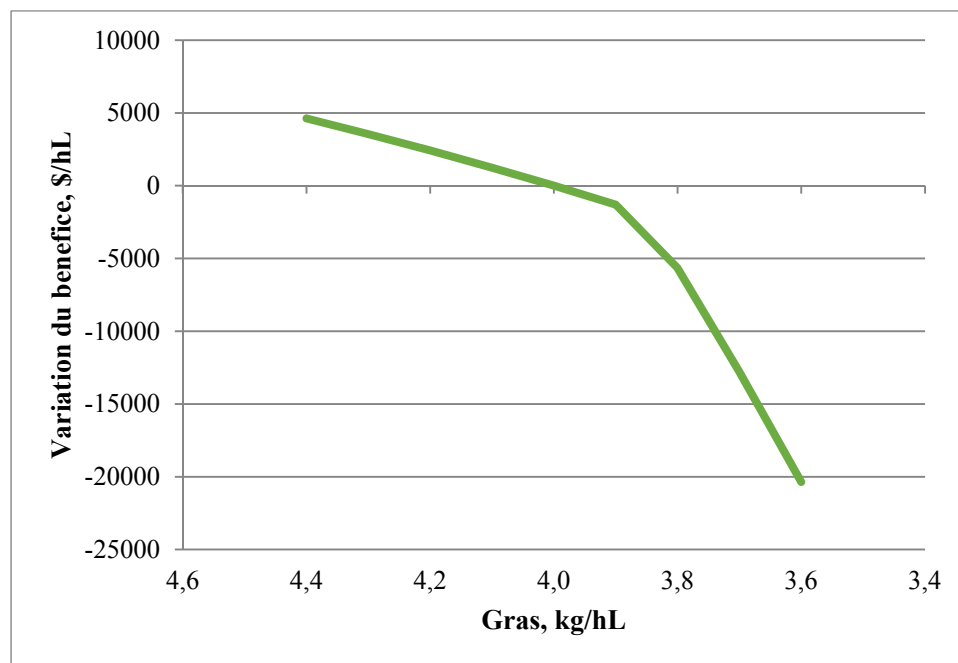


Figure 2.1 Effet de la variation dans la teneur en matières grasses du lait sur le bénéfice net des fermes laitières.

Adaptée de Charbonneau et al., 2011

2.2 Synthèse des matières grasses du lait

Avant de connaître les facteurs affectant la teneur en matières grasses (TMG) du lait, il est important de comprendre comment elles sont synthétisées. Les lipides du lait sont synthétisés dans la glande mammaire (Chatterjee et al., 1979) dont plus des 95 % sont des triglycérides (TG) constitués d'AG et de glycérol. Les triglycérides sont sécrétés sous forme de gouttelettes de différentes tailles dans le lait (Barber et al., 1997; Heid et Keenan, 2005; Rulquin et al., 2007). La MG du lait des ruminants est unique parmi les mammifères parce qu'elle contient une haute proportion d'AG à chaîne courte (Bauman et al., 2011c). Ces AG ne sont pas présents dans la majorité des aliments et ne sont pas trouvés dans la MG du lait d'espèces non ruminantes (sauf pour le lapin) ou dans les graisses corporelles animales (Bauman et al., 2011c).

Chez les ruminants, les AG du lait proviennent de deux sources : 1) des AG à longue chaîne préformés prélevés du plasma (60 % des AG sécrétés dans le lait) et 2) les AG qui sont synthétisés *de novo* dans la glande mammaire (40 %) (Chilliard et al., 2001; Bauman et al., 2011b). Les AG de courte (4 à 8 atomes de carbone) et moyenne chaînes (10 à 14 atomes de carbone) sont dérivés principalement de la synthèse *de novo*, tandis que les AG à longue chaîne (> 16 atomes de carbone) sont dérivés de l'absorption de lipides du plasma sanguin. Finalement, les AG de 16 atomes de carbone sont dérivés des deux sources (Bauman et Griinari, 2003).

Les ruminants utilisent principalement l'acétate et le β -hydroxybutyrate comme source de carbone pour la synthèse de MG, contrairement aux monogastriques qui utilisent le glucose (Neville et Picciano, 1997; Bauman et al., 2011b). L'acétate et le butyrate proviennent de la fermentation ruminale des glucides. Le butyrate est principalement converti en β -hydroxybutyrate par la paroi du rumen et le foie (Bauman et Griinari, 2003; Bauman et al., 2011b). L'acétate et le β -hydroxybutyrate sont ensuite extraits du sang par la glande mammaire (Bauman et al., 2011b). La synthèse des AG à courte et moyenne chaînes est

principalement effectuée dans les cellules alvéolaires de la glande mammaire (Neville et Picciano, 1997).

Le prélèvement des AG à longue chaîne par la glande mammaire est l'autre source d'AG pour la synthèse de MG du lait (Neville et Picciano, 1997; Bauman et al., 2011b). Les AG circulants proviennent des lipides absorbés à partir de l'appareil digestif et des graisses corporelles mobilisées (Bauman et al., 2011b). Le glycérol nécessaire pour la synthèse des triglycérides du lait est fourni par le glucose capté par la glande mammaire (Rulquin et al., 2007). Ainsi, le glucose, les AG, le glycérol, l'acétate et le β -hydroxybutyrate sont des substrats importants pour la synthèse d'AG dans les cellules de la glande mammaire (Neville et Picciano, 1997) (Figure 2.2).

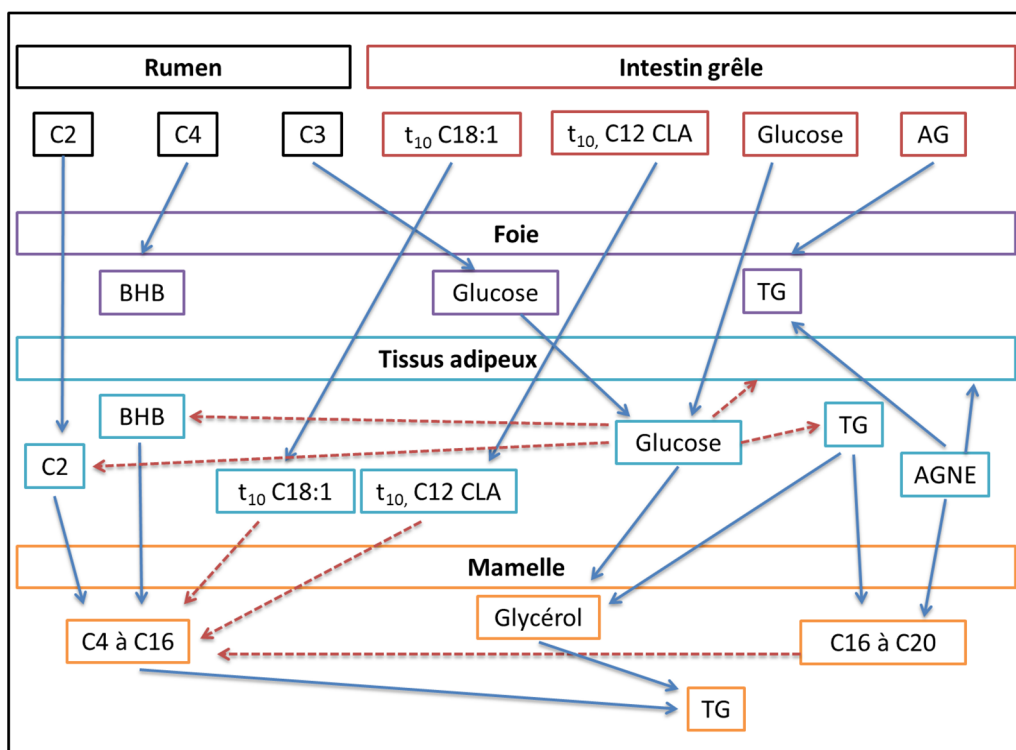


Figure 2.2 Rôles des nutriments intervenant dans la synthèse de matières grasses du lait. Abréviations : C2 = Acétate; C3 = Propionate; C4 = Butyrate; AG = Acides gras; BHB = β - hydroxybutyrate; TG = Triglycérides; AGNE = Acides gras non estérifiés; t = trans; c = cis. Flèches pointillées=inhibition.

Tirée de Rulquin et al., 2007

2.3 Facteurs influençant la teneur en matières grasses du lait

Différents facteurs peuvent influencer la TMG du lait. Il est bien connu que la race a un impact sur la concentration des composants (Cerbulis et Farrell, 1975; Ahlborn-Breier et Hohenboken, 1991). En Amérique du Nord, les races avec les teneurs en protéines et en MG les plus élevées sont la Jersey, la Guernsey et la Suisse Brune et celles avec les plus basses sont la Holstein, l'Ayrshire et la Shorton laitière (Cerbulis et Farrell, 1975; Ahlborn-Breier et Hohenboken, 1991). Il y a aussi des variations journalières importantes dans la teneur des composants du lait. Celui qui varie le moins est le lactose (Δ 0,9 %), suivi de la protéine totale (Δ 1,4 %) et de la caséine (Δ 1,8 %) et finalement de la MG du lait (Δ 7,7 %) qui obtient la plus grande variation (Syrstad, 1977; Forsbäck et al., 2010). Le cycle nyctéméral ainsi que la fréquence de la traite ont également un effet sur les composants du lait. En effet, le lait a une TMG moins élevée le matin par rapport au soir lorsque la traite est effectuée deux fois par jour (Quist et al., 2008). Lorsque trois traites sont effectuées par jour, la TMG augmente pendant la journée pour atteindre son maximum dans la traite de la nuit (Quist et al., 2008). Cependant, il faut noter que les variations pour les composants ne sont pas toujours constantes. D'autres facteurs liés à l'alimentation et à l'animal, comme la génétique, le stade de lactation et l'état physiologique, influencent les teneurs en composants du lait (Gaunt, 1973; Cerbulis et Farrell, 1975; Walker et al., 2004; Jenkins et McGuire, 2006).

2.3.1 Facteurs liés à l'animal

2.3.1.1 *Impact de la génétique*

La sélection génétique offre la seule alternative réelle à la nutrition comme moyen pour modifier la composition du lait (Rode, 2006). Contrairement à l'alimentation qui agit plus rapidement, la génétique a un effet à moyen ou long terme (Hoden et Coulon, 1991). De plus, elle peut altérer la composition du lait dans presque toutes les directions convoitées (Gibson, 1989). Cependant, la rapidité de la réponse peut varier. Par exemple, en raison de

son faible coefficient d'héritabilité, un changement dans la teneur en lactose sera plus lent à observer qu'un changement dans la TMG (Gibson, 1989). Par contre, la sélection pour des teneurs plus élevées en MG aura un effet négatif sur les productions totales de lait et de protéines (Gibson, 1989). En conséquence, il est très difficile d'améliorer la production de lait et la TMG de façon simultanée. Il reste que la production laitière ou la TMG ont une héritabilité élevée, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle elles sont incluses dans de nombreux programmes de sélection (Schutz et al., 1990). Par exemple, Gaunt (1973) avait signalé une héritabilité de 0,57 et 0,71 pour la TMG des races Holstein et Jersey, respectivement.

Au Canada, les indices utilisés pour évaluer le potentiel génétique des animaux sont les valeurs d'élevage estimé (VEE) pour chaque trait. Le VEE est défini comme une estimation de la valeur génétique additive pour un trait en particulier qu'une vache transmet à ses descendants (Goddard et Hayes, 2009). La production laitière, la production de protéines et de gras, ainsi que les pourcentages de gras et de protéines sont les traits les plus importants sur le plan économique pour la sélection des bovins laitiers (Chauhan et Hayes, 1991).

De plus, il semble y avoir un impact de la génétique sur la susceptibilité au développement du syndrome de la chute de TMG du lait (Calus et al., 2005). Une autre étude a aussi montré des différences dans le métabolisme des vaches et dans la répartition des nutriments dans l'animal lors de la comparaison entre deux groupes au potentiel génétique supérieur et inférieur pour la TMG du lait (Åkerlind et al., 1999). Bien que, la génétique détermine le potentiel de production de la vache, celui-ci est influencé par différents facteurs tel l'environnement, l'alimentation et la santé.

2.3.1.2 Impact du stade de lactation

Le stade de lactation a un effet sur tous les composants du lait observable à travers des changements significatifs dans l'état physiologique de la vache (Gaunt, 1973; Walker et al., 2004). La TMG décline après le vêlage et atteint son nadir lorsque les vaches sont entre 40 à 60 jours post-partum, avec une légère augmentation journalière par la suite (Figure 2.3) (Schutz et al., 1990; Barber et al., 1997; Walker et al., 2004). Cette baisse peut être expliquée principalement par un effet de dilution puisque la TMG évolue de façon inverse à la production de lait (Coulon et al., 1991; Varga et Ishler, 2007). Les teneurs plus élevées en MG et en protéines sont dans le colostrum et à environ au 250 JEL, une fois que la production de lait commence à diminuer (Heinrichs et al., 1997). Des variations allant jusqu'à 0,75 unité de pourcentage dans la TMG peuvent être expliquées par les différences de JEL (Oetzel, 2007).

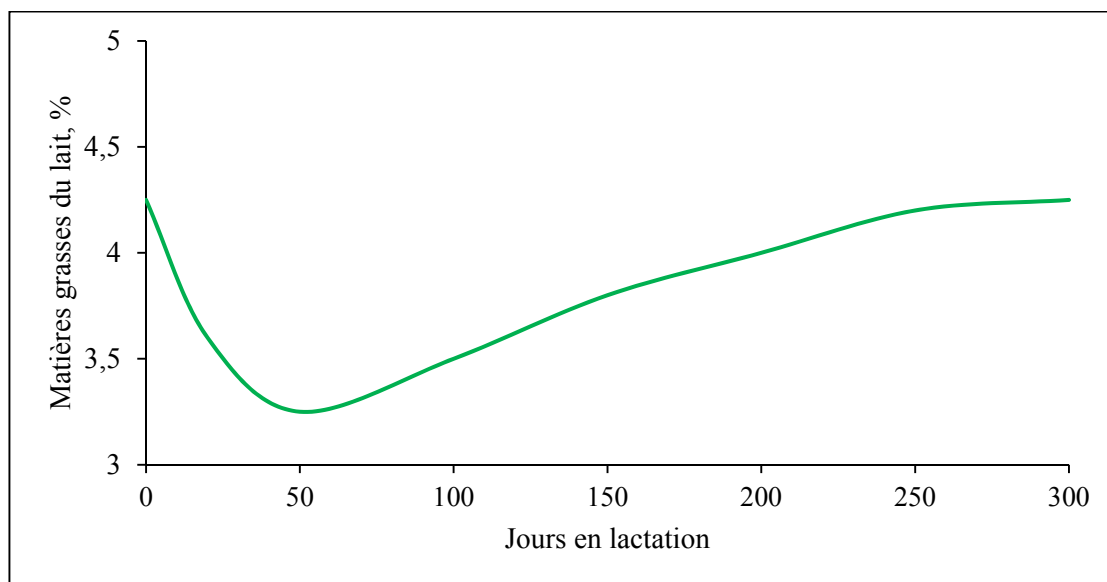


Figure 2.3 Teneur en matière grasse du lait en fonction du stade de lactation.

Adaptée de Schutz et al., 1990

Le stade de lactation peut entraîner jusqu'à 30 % de variabilité de la production des solides totaux du lait pendant la lactation des vaches Holstein et Jersey, mais l'impact est plus faible sur les pourcentages de ces composants (Rodriquez et al., 1985). L'effet du stade de lactation sur la TMG du lait peut être le résultat de la variation dans le bilan énergétique chez la vache (Walker et al., 2004). Au début de la lactation, les vaches sont en déficit énergétique négatif, provoquant la mobilisation de lipides des tissus adipeux. La production de MG du lait représente un besoin en énergie considérable pour la plupart des mammifères et impose un grand effort métabolique pour l'animal, du moins pour une partie de la lactation (Barber et al., 1997). Par exemple, des vaches avec une production laitière de 30 kg/jour sécréteront environ 1,5 kg de MG/jour au cours des premières semaines de lactation et mobiliseront environ 1 kg de lipides des tissus adipeux par jour (Vernon et Flint, 1984). Donc, lorsque les vaches sont en bilan énergétique négatif, la production de MG du lait s'appuie grandement sur la lipolyse des tissus adipeux (Barber et al., 1997). Les AG du lait sont composés d'une plus grande proportion d'AG à longue chaîne quand la lipolyse est élevée (Barber et al., 1997). De plus, lorsque les vaches incorporent ce type d'AG dans la MG du lait, la synthèse de novo dans la glande mammaire est réduite (Palmquist et al., 1993). Comme résultat, les concentrations des AG saturés à chaînes courte et moyenne sont les plus basses dans la MG produite par les vaches en début de lactation, alors que les concentrations des AG saturés à longue chaîne sont plus élevées durant cette période (Palmquist et al., 1993).

2.3.1.3 *Impact des hormones*

Le statut hormonal de la vache peut modifier la répartition de nutriments dans ses tissus spécifiques et résulter en une altération de la production laitière et de certains composants du lait (Griinari et al., 1997). En effet, la lactation est caractérisée par un contrôle hormonal strict (Svennersten-Sjaunja et Olsson, 2005). Trois types d'hormones ont un effet sur la glande mammaire : 1) les hormones reproductives : la progestérone, l'œstrogène, le lactogène placentaire, la prolactine et l'ocytocine; 2) les hormones métaboliques : l'hormone de croissance, les corticostéroïdes, l'hormone thyroïdienne, l'insuline et les hormones du

tractus gastro-intestinal; et 3) les hormones qui sont produites dans la glande mammaire : l'hormone de croissance, la prolactine, et la leptine (Svennersten-Sjaunja et Olsson, 2005). Ces hormones sont importantes dans la régulation des nutriments pour la glande mammaire (Svennersten-Sjaunja et Olsson, 2005). Suite au début de la lactation, les besoins pour la synthèse du lait augmentent. Par conséquent, la priorité devient la satisfaction des besoins en nutriments adéquats de la glande mammaire. Le métabolisme de l'animal change alors d'anabolique à catabolique : la lipolyse dans les tissus adipeux augmente, tandis que la lipogenèse diminue. De plus, les changements métaboliques présentent une production de glucose et une absorption des minéraux de l'intestin accrue. Les AG peuvent être utilisées comme source d'énergie à la place du glucose, et l'entrée en lactation cause aussi une réorientation de plusieurs nutriments des tissus non mammaires vers la mamelle (Svennersten-Sjaunja et Olsson, 2005).

Parmi les hormones liées à la régulation de la lactation, certaines sont plus connues pour leurs effets sur la composition du lait. Il est, entre autres, connu que l'hormone de croissance accroît la production laitière. Cette augmentation peut être d'environ 3,87 litres/jour (Bauman et al., 2015). Elle est largement utilisée aux États-Unis, tandis qu'elle est interdite au Canada. Son effet semble être dû à une redistribution des nutriments, qui augmente l'efficacité chez les vaches par la dilution des coûts liés à l'entretien (Bauman et al., 1985). Des études suggèrent aussi qu'elle pourrait avoir un effet positif sur le contrôle de la synthèse de MG du lait quand les animaux sont en bilan énergétique négatif (Flint et Gardner, 1994). Cependant, d'autres études suggèrent que l'hormone de croissance n'a pas d'effets sur la composition du lait (Knight et al., 2000; Bauman et al., 2015).

La prolactine a depuis longtemps été considérée comme une l'hormone essentielle pour initier et maintenir la lactation (Koprowski et Tucker, 1973). Elle est aussi connue comme un des principaux régulateurs de synthèse des composants du lait (Bauman et Currie, 1980; Neville et Picciano, 1997). Elle augmente l'absorption de calcium et des AG à longue chaîne pour la synthèse de la MG (Svennersten-Sjaunja et Olsson, 2005). En effet, il semble

que la prolactine augmente la prise alimentaire, ce qui aide à fournir les nutriments nécessaires pour soutenir la synthèse du lait (Lacasse et al., 2016). Cependant, une étude portant sur l'administration de prolactine exogène n'a pas démontré de différence significative sur la composition du lait (Plaut et al., 1987). Dans cette dernière expérience, l'hormone avait été administrée aux vaches à différents stades de lactation, soit de 21 à 34 JEL et de 60 à 73 JEL.

L'insuline est aussi impliquée dans la redistribution de nutriments entre les différents organes pendant la lactation (Tucker, 2000). À plusieurs moments pendant la lactation, elle stimule la lipogenèse dans les tissus adipeux (Bauman et Currie, 1980) et elle semble avoir une relation inverse avec la TMG du lait (Samuelsson et al., 1998). Cet effet expliquerait l'inhibition de la protéolyse et de la lipolyse, qui est associée à différents processus détournant l'énergie requise pour la synthèse du lait vers les tissus corporels (Bines et Hart, 1982; Barber et al., 1997). Selon Barber et al. (1997), l'insuline et les AG, ou le rapport de leur concentration dans le sang sont probablement les principaux régulateurs de la synthèse des AG dans la glande mammaire. L'insuline est aussi mise en cause dans l'une des théories qui pourraient expliquer la cause de la chute de la TMG du lait, la théorie insulino-glucogénique. Cette théorie propose qu'une augmentation de la libération d'insuline, qui se produit lorsque des rations élevées en concentrés sont fournies, favorise l'acheminement des nutriments vers les tissus adipeux, causant ainsi une pénurie de précurseurs dans la glande mammaire et ainsi, la chute de la TMG du lait (McClymont et Vallance, 1962; Jenny et al., 1974). Cependant, des études ont montré qu'il n'y avait pas d'évidences pour supporter l'implication de l'insuline dans la chute de la TMG du lait (McGuire et al., 1995; Griinari et al., 1997).

La leptine est une protéine qui pourrait avoir un rôle dans la régulation homéostatique de l'énergie dans l'organisme et dans le comportement alimentaire (Ahima et Flier, 2000; Block et al., 2001; Chilliard et al., 2005). Tel que mentionné par Chilliard et al. (2005), la leptine augmente la lipolyse et diminue la lipogenèse dans les tissus adipeux et le foie. En

plus, il semble que l'insuline est une régulatrice des niveaux de la leptine plasmatique pendant la lactation (Ahima et Flier, 2000; Block et al., 2003).

La somatostatine est une autre hormone catabolique qui inhibe de nombreux processus dans l'organisme, par exemple, la sécrétion d'insuline et de glucagon par le pancréas (Samuelsson et al., 1998). Il semble que la somatostatine permet à l'organisme de prioriser la synthèse de MG dans la glande mammaire avant le dépôt de graisse dans les autres tissus de l'organisme (Samuelsson et al., 1998). Cependant, il y a beaucoup de variation dans les résultats, et il semble possible que des changements dans la fermentation ruminale puissent modifier la libération de la somatostatine (Samuelsson et al., 1998).

Bref, il est bien connu que les hormones ont un rôle très important dans la synthèse du lait, cependant celui qu'elles occupent dans la modulation de la teneur des constituants individuels est moins évident.

2.3.1.4 *Impact des maladies*

2.3.1.4.1 *Mammite*

Les productions et les teneurs en MG et en protéines du lait sont modifiées par les infections intramammaires, dues principalement à une réduction de la production de lait (Seegers et al., 2003). La mammite, par exemple, réduit la teneur en caséine et en lactose, tandis qu'elle augmente les teneurs en protéines totales et en protéines du lactosérum du lait (Rode, 2006). Cependant, la diminution dans la TMG est moindre (environ 10 %) que celle observée pour le lactose ou pour la caséine (environ de 15 %) (NRC, 2001). Houben et al. (1993) ont estimé une chute de la TMG du lait de 8 % causée par la mammite clinique pendant une lactation. Dans une autre étude, l'observation d'épisodes de mammite clinique pendant toute la lactation a été associée à une réduction de 1,5 à 7,5 % de la production de la MG du lait, en fonction du nombre de ces épisodes, de la parité et de la race (Hortet et

Seegers, 1998). Dans cette même étude, des réductions de 0,10 % dans la TMG du lait ont été rapportées pour des vaches Holstein avec des cas de mammites récurrentes. Dans leur revue de littérature, Le Maréchal et al. (2011) mentionnent que les effets de la mammite sur les composants du lait sont contradictoires. Ces auteurs expliquent aussi que le type de pathogène impliqué dans la mammite peut avoir une influence sur la variation de la teneur des composants du lait.

2.3.1.4.2 Acidose ruminale

Pour maximiser l'efficacité énergétique, un taux de fermentation élevé est souhaitable, alors que d'un point de vue de bien-être animal, un taux de fermentation plus lent est préféré (Owens et al., 1998). La fermentation des aliments dans le rumen produit des acides gras volatiles (AGV) et de l'acide lactique. Le pH du fluide ruminal diminue quand les AGV ou l'acide lactique s'accumulent dans le rumen (Dijkstra et al., 2012). Une baisse trop importante du pH résulte en l'acidose ruminale. Cette dernière peut être définie comme des périodes où le pH ruminal est inférieur à 5,5 ou 5,8, dépendant de la méthode utilisée et du laboratoire (Beauchemin et al., 2006). L'acidose affecte les fonctions du rumen. On observe généralement dans ces conditions une diminution de la prise alimentaire et de la digestion de la fibre ainsi qu'une inhibition de la synthèse de la protéine microbienne (Beauchemin et al., 2006; Krause et Oetzel, 2006; Dijkstra et al., 2012). Ces modifications entraînent une baisse de production laitière et de TMG du lait (Beauchemin et al., 2006; Enemark, 2008).

Une acidification du liquide du rumen peut avoir des conséquences avant même de résulter en une acidose clinique. La chute du pH ruminal est généralement conjuguée avec l'augmentation de la production de propionate dans le rumen et résulte en une diminution de la TMG du lait. Les résultats d'études sur le pouvoir acidogène (Rustomo et al., 2006) et le pouvoir tampon des aliments (Jasaitis et al., 1987) démontrent que les aliments énergétiques ont les pouvoirs acidogènes plus élevés, suivi des aliments fibreux (p. ex. graminées), tandis

que des aliments protéiques et les légumineuses ont généralement un pouvoir tampon, par conséquent ils sont capables de neutraliser l'acidification et maintenir un pH stable. La maturité des fourrages a tendance à diminuer le pouvoir acidogène des fourrages. Parmi les aliments énergétiques évalués, l'orge et le blé ont des valeurs plus élevées que l'avoine. Dans une autre étude, Sauvante et Peyraud (2010) ont signalé que les céréales étaient plus ou moins acidogènes en fonction de la vitesse de dégradation de l'amidon dans le rumen, c'est-à-dire que les amidons à dégradation plus lente (p. ex. maïs et sorgho) sont moins acidogènes que les amidons à dégradations plus rapides (p. ex. orge et blé). En ce qui a trait aux fourrages, l'ensilage de maïs obtient une valeur plus acidogène que l'ensilage de luzerne (Jasaitis et al., 1987; Rustomo et al., 2006). Finalement, pour les aliments protéiques, le tourteau de soya a des valeurs plus élevées que le fin gluten de maïs (Jasaitis et al., 1987; Rustomo et al., 2006). Ces résultats indiquent que les aliments avec des pouvoirs acidogènes plus élevés causent des charges acides dans le rumen en augmentant le risque de l'acidose ruminale (Rustomo et al., 2006), ce qui implique un besoin plus élevé de fibres dans la ration pour éviter une chute de la TMG du lait.

Ajoutons que les composants du lait peuvent être utilisés comme des indicateurs pour des maladies métaboliques. de Vries et Veerkamp (2000) ont trouvé que la TMG du lait peut être un indicateur du bilan énergétique. Ces auteurs ont noté qu'une chute de la TMG du lait a été corrélée ($r = 0,60$) avec le nadir du bilan énergétique pendant les premiers 36 JEL. Dans cette étude, ils ont analysé des données de vaches jusqu'au 120^e JEL. Le rapport gras : protéine est un autre indicateur qui peut servir pour évaluer le statut métabolique des vaches. En effet, des études ont montré que les vaches dont le lait présente un rapport $> 1,5$ ont plus de risques d'avoir des maladies métaboliques comme le déplacement de la caillette, la cétose, la boiterie et la mammite (Geishauser et al., 1997; Heuer et al., 1999; Heuer et al., 2000).

2.3.2 Facteurs liés à la gestion et à l'environnement

2.3.2.1 Traite

La TMG du lait progresse au cours de la traite. Le lait au début de la traite, provient des citernes. Ce dernier est de 2,5 à 5 fois moins riche en MG que le lait de la fin de la traite, qui correspond à la sécrétion provenant des alvéoles (Figure 2.4; Lollivier et al., 2002; Rulquin et al., 2007). En effet, pendant la traite, les globules de gras du lait sont transférés de l'alvéole à la citerne sous le réflexe d'éjection via l'action de l'ocytocine (Lollivier et al., 2002).

De plus, le lait de la traite du soir est généralement plus riche en MG et en protéines que le lait de la traite du matin. Quist et al. (2008) ont évalué la relation entre la gestion de l'alimentation et la variabilité de la TMG du lait à court terme (sur 5 jours) sur 14 troupeaux et ils ont signalé que la TMG du lait du matin est en moyenne 0,10 unité de pourcentage plus basse que le lait provenant de la traite du soir. Dans cette même étude, les trois sources de variabilité étudiées (lait du matin vs soir; deux vs trois traites et la fréquence d'alimentation) n'expliquaient pas une grande partie de la variabilité de la TMG du lait. Donc, ces auteurs suggèrent que cette variation peut être due à la longueur des intervalles entre chaque traite. Mais, malheureusement les troupeaux étudiés étaient en stabulation libre avec salles de traite, ce qui rend plus difficile l'obtention de cette information (Quist et al., 2008).

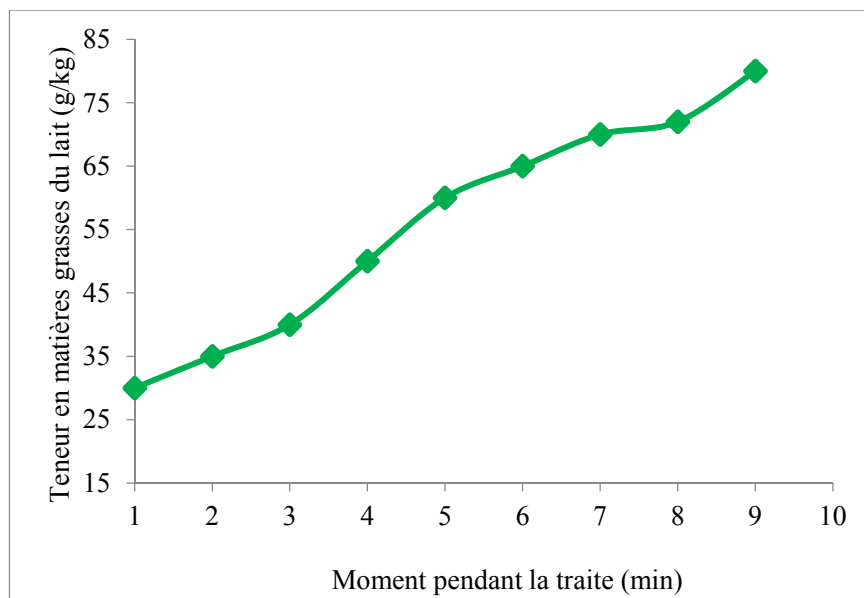


Figure 2.4 Évolution de la matière grasse du lait pendant la traite.

Adaptée de Lollivier et al., 2002

2.3.2.2 *Système d'alimentation et fréquence d'alimentation*

L'utilisation de ration totale mélangée (RTM) a été suggérée comme une façon d'augmenter la TMG du lait (Coppock, 1977; Phipps et al., 1984). Ce système d'alimentation permet de réduire le tri des aliments en plus de s'assurer que les concentrés et les fourrages soient ingérés en même temps. Ainsi, il y a une plus grande stabilité des fermentations dans le rumen et une augmentation de la production de salive, ce qui améliore la capacité tampon (Ørskov, 1986; Coppock, 1977; NRC, 2001). En ce sens, Caccamo et al. (2010) ont comparé deux systèmes d'alimentation, soit la RTM et la distribution séparée des aliments. Ils ont trouvé une augmentation de la TMG du lait pour les vaches alimentées avec une RTM. Néanmoins, les résultats ne sont pas toujours homogènes. Nocek et al. (1986) et Yrjänen et al. (2003) n'ont pas trouvé de différences pour la production ou la composition du lait entre la RTM et la distribution séparée des aliments. Cependant, lorsque l'alimentation se fait avec une distribution séparée des aliments, une augmentation de la fréquence d'alimentation semble avoir un effet positif sur la TMG lorsque les rations sont faibles en fourrages (Sutton et Morant, 1989).

2.3.2.3 Saison

Les pourcentages de gras et de protéines dans le lait sont plus élevés pendant l'hiver que pendant l'été (Varga et Ishler, 2007; Heck et al., 2009; Bauman et al., 2011b). Le composant du lait qui varie le moins dû aux saisons est le lactose et celui qui varie le plus est la MG, avec la protéine qui représente un résultat mitoyen (Heck et al., 2009). Cette variation est due aux changements dans la ration et aux conditions climatiques. Les effets spécifiques de la température, soit chaude ou froide, ne sont pas clairs. Des vaches exposées à des températures au-dessous de -5 C réduisent leur production de lait et, par conséquent, la TMG du lait augmente (Bauman et al., 2011b). En contrepartie, certains travaux suggèrent que le stress thermique en été peut entraîner des conditions semblables à l'acidose et donc une diminution de la TMG du lait (Bauman et al., 2011b). Aussi, les vaches hautes productrices sont plus vulnérables au stress thermique dû à leur production de chaleur métabolique plus élevée qui est fortement associée à la production laitière (Renaudeau et al., 2012). Le stress thermique réduit la consommation de matière sèche (**MS**), qui à son tour réduit la consommation d'énergie. C'est cette diminution d'apport en énergie qui affecterait la teneur des composants du lait (West, 2003; Renaudeau et al., 2012). C'est d'ailleurs pour cette raison que West (2003) a suggéré de modifier les besoins des animaux pendant la saison chaude.

2.3.3 Facteurs alimentaires

La nutrition est à la fois un facteur prédominant qui affecte la TMG du lait et un outil pour la moduler (Bauman et al., 2011a). Il est connu depuis les années 40 que des changements dans la ration peuvent causer des chutes importantes de la TMG du lait (Sutton, 1989; Sutton et Morant, 1989; Rulquin et al., 2007). Certains facteurs, comme une proportion élevée de concentrés ou de lipides insaturés et une taille fine de particules dans la ration sont connus pour contribuer à cette modification dans la TMG. Cette chute de la TMG du lait (« *Low milk fat syndrome* » ou « *milk fat depression* » en anglais) et a été bien documentée

dans la littérature (Bauman et Griinari, 2001; Bauman et Griinari, 2003). En bref, il s'agit d'une altération dans les sentiers de la biohydrogénation des AG polyinsaturés de la ration. Certains de ces changements entraînent la production d'AG qui inhibent la synthèse de la MG du lait (c.-à-d. l'acide linoléique conjugué *trans*-10, *cis* 12; Figure 2.5) (Bauman et Griinari, 2003). Aussi, Maxin et al. (2011) ont suggéré que la chute de la MG du lait était due à des effets additifs entre les nutriments; plus précisément la diminution de la production d'acétate et l'augmentation de celle du propionate en plus de la production accrue de l'acide linoléique conjugué *trans*-10, *cis* 12.

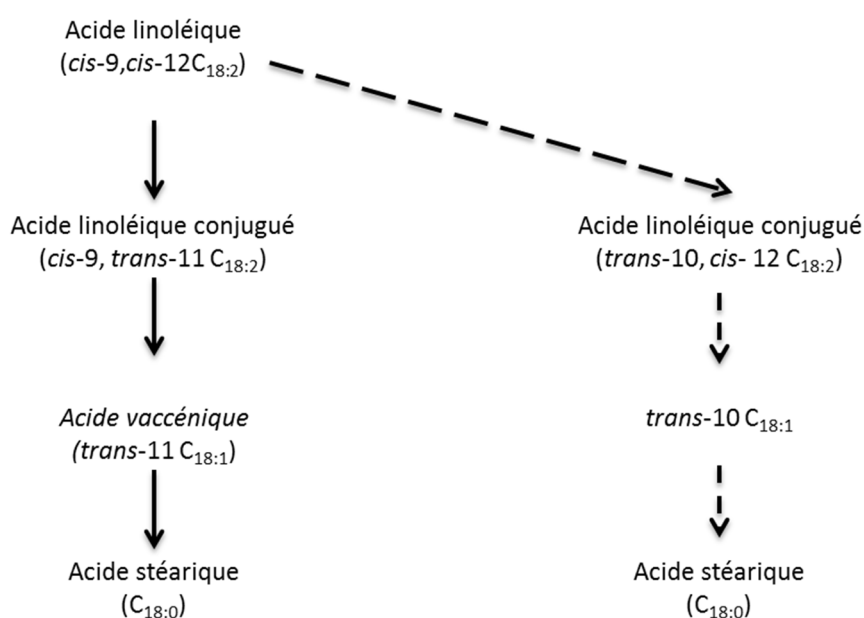


Figure 2.5 Biohydrogénation ruminale : Sentier normal (ligne continue) et altération du sentier (ligne en tiret).

Adaptée de Bauman et Griinari, 2003

2.3.3.1 Impact des fibres

Les fibres sont considérées comme des glucides. Ils sont classés en : glucides non structuraux (**GNS**) et glucides structuraux (**GS**) (Figure 2.6). Les GNS se trouvent à l'intérieur de la cellule de la plante et normalement sont plus dégradables que les GS, qui

font partie des parois cellulaires (NRC, 2001). Les acides organiques et la lignine ne sont pas considérés comme glucides. Cependant, d'un point de vue analytique, les glucides peuvent être classés en glucides non fibreux (GNF) et glucides fibreux (GF). Les acides organiques sont inclus dans le calcul de la fraction des GNF et la lignine est incluse dans la fraction de GF.

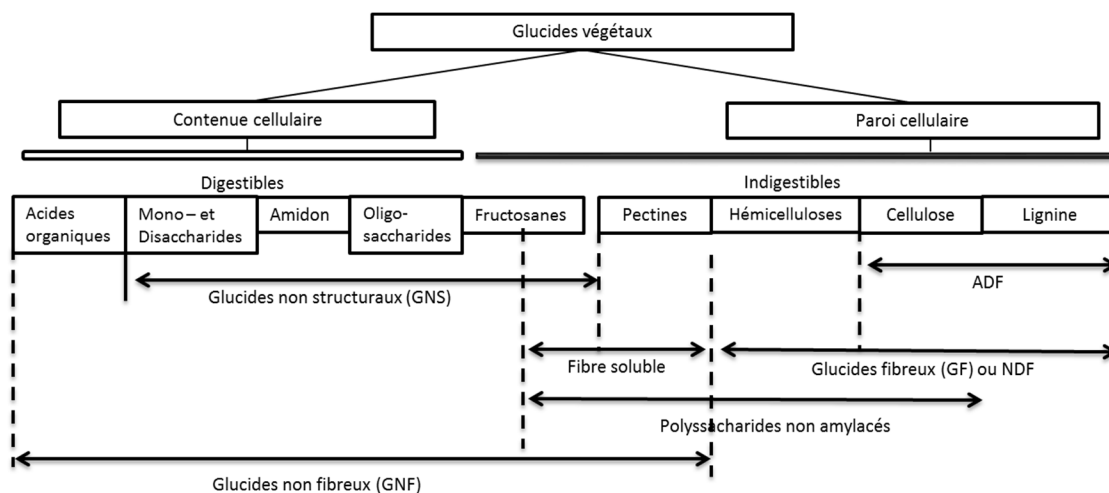


Figure 2.6 Représentation schématique de la classification des glucides végétaux. Abréviations : NDF : fibre au détergent neutre (neutral detergent fiber); ADF : fibres au détergent acide (acid detergent fiber); GF : glucides fibreux.

Adaptée de Hall, 2007

La NDF est moins dégradable que les GNF, et sa concentration est corrélée négativement avec la teneur en énergie des aliments et positivement au pH ruminal (NRC, 2001). Des rations avec une haute teneur en NDF sont associées à une augmentation des taux de production de l'acétate et du butyrate par rapport au propionate. Cette modification au profil en AGV mène à une augmentation de la TMG du lait (Walker et al., 2004). Même si un surplus de NDF peut être associé à une limitation de la prise alimentaire (Allen, 2000), fournir des quantités adéquates de fibres dans la ration est essentiel afin d'éviter des perturbations dans le rumen (Mertens, 1997). Ces perturbations résultent en une chute de la prise alimentaire et de la production laitière, ainsi qu'en des modifications dans la

composition du lait (c.-à-d. diminution de la TMG du lait) (Mertens, 1997; Zebeli et al., 2012).

La fraction de la fibre qui stimule la mastication (c.-à-d. l'augmentation de la production de salive) et aide à maintenir le pH dans le rumen s'appelle la NDF efficace (**NDFe**). La structure physique de la fibre fait référence à la taille de particules du fourrage (**TPF**) de la ration. La TPF a un effet sur la rumination, la fermentation ruminale, la prise alimentaire, le taux de passage et, aussi, sur la population de bactéries cellulolytiques (Zebeli et al., 2012). Une ration est considérée à risque pour l'acidose et la diminution de la TMG du lait lorsque sa taille de particules est inférieure à environ 3-4 mm (Sauvant et Peyraud, 2010). En contrepartie, limiter la TPF peut diminuer le tri dans les rations, ce qui peut aider à prévenir des perturbations dans le rumen, surtout quand les rations contiennent des quantités élevées de grains (NRC, 2001; DeVries et al., 2009). Il faut donc viser un équilibre dans la TPF pour prévenir la chute de pH du rumen. Cette dernière peut avoir un impact direct sur la TMG du lait. En effet, une réduction du pH ruminal peut causer une altération de la biohydrogénation ruminale (Figure 2.5), en conduisant à la production de l'acide linoléique conjugué *trans*-10, *cis*-12 et d'autres AG connus pour inhiber la TMG du lait dans la glande mammaire (Bauman et Griinari, 2001) tel que mentionnée précédemment.

Selon Mertens (1997), il y a deux concepts à considérer pour l'efficacité de la fibre. Le premier est la NDF physiquement efficace (**NDFpe**) qui fait référence à la taille des particules et donc au travail masticatoire. Le deuxième est la NDFe qui représente la capacité relative d'un aliment de remplacer un fourrage ou un foin dans la ration de manière à maintenir de façon efficace la TMG du lait. La NDFpe peut être mesurée pour les aliments et pour les rations sur les fermes avec le séparateur de particules de Penn-State, où la NDFpe est calculée en multipliant la teneur de NDF de la ration par le facteur d'efficacité physique. Le facteur d'efficacité physique (variant de 0 à 1) représente la somme des proportions de particules retenues dans les tamis 1 à 3 de l'outil (19, 8 et 1,18 mm, respectivement) (Lammers et al., 1996; Kononoff et al., 2003). Les valeurs obtenues à partir de cet outil

peuvent être utilisées comme un bon indicateur du potentiel de rumination des aliments (Beauchemin et Yang, 2005). Néanmoins, des études suggèrent de ne pas utiliser le tamis 3 (c.-à-d. 1,18 mm) parce qu'il retient presque tous les échantillons de fourrages et, par conséquent, empêche de différencier les fourrages avec des longueurs de hachage différentes (Kononoff et Heinrichs, 2003b; Yang et Beauchemin, 2006).

Tout comme pour la taille des particules, il existe une relation entre la NDFpe et la TMG du lait qui provient principalement de ses effets sur la production de salive (c.-à-d. substances tampons), la fermentation ruminale et le pH (Allen, 1997). Les auteurs qui ont évalué l'impact du niveau de fibres (haut vs bas) et la TPF (longue vs courte) ont généralement trouvé une diminution significative de la TMG du lait pour les rations basses en fibres ou avec une TPF courte (Grant et al., 1990; Beauchemin et al., 1994).

Bien que le concept de NDFpe est généralement bien accepté pour prévenir des problématiques de chute du pH dans le rumen, certains facteurs peuvent influencer son efficacité. Par exemple, dans l'étude de Yang et Beauchemin (2005), une augmentation de la NDFpe de la ration (8,9, 10,3 et 11,5 %) n'a pas été efficace pour augmenter la TMG du lait, puisqu'un pH très faible dans le rumen était obtenu avec toutes les rations. Dans cette étude, des résultats très faibles pour la TMG ($\leq 3,02$ %) ont été observés pour tous les traitements. Aussi, les besoins en fibres provenant des fourrages semblent être liés au type de grains utilisé dans la ration. Des rations avec de l'orge doivent contenir plus de fibres provenant du fourrage par rapport aux rations avec du maïs pour éviter une chute de la TMG du lait (Beauchemin et Rode, 1997).

Une étude récente (Nasrollahi et al., 2015) en méta-analyse et métarégression renforcent les résultats mentionnés précédemment. Les chercheurs ont étudié l'effet de la TPF sur les performances de la vache laitière, ainsi que le lien entre la TPF et d'autres facteurs de la ration comme la source de fourrage (c.-à-d. maïs vs autres fourrages : luzerne, avoine, pâturage, orge et dactyle), la méthode de conservation des fourrages (c.-à-d. foin vs ensilage)

et la proportion de fourrages dans la ration. Les principales conclusions de cette étude sont au nombre de trois. Premièrement, l'alimentation avec des TPF plus fines augmente la prise alimentaire en moyenne de 0,53 kg/jour. Ce résultat est intéressant puisque cela permettrait aux vaches en début de lactation d'augmenter leur consommation d'énergie nette de lactation de presque 3 à 4 MJ par jour. Deuxièmement, une diminution de la TPF accroît la production laitière. Enfin, une réduction de la TPF entraîne une diminution de la TMG du lait. Par contre, lorsque les comparaisons sont faites avec des rations composées de foin à longues fibres, une diminution de la TPF résulte en une augmentation de la TMG du lait. Ces résultats démontrent l'importance de s'attarder aux types de rations lors de l'utilisation de ce concept.

2.3.3.2 Rapport fourrages : concentrés

L'ampleur de la fermentation des concentrés dans le rumen est extrêmement variable selon les aliments (Allen, 1997). Néanmoins, cette variation est expliquée partiellement par les caractéristiques de l'aliment, ses interactions avec les autres ingrédients de la ration, l'animal et les microorganismes du rumen (Allen, 1997). Les concentrés sont considérés comme acidogènes, parce qu'ils sont digérés plus rapidement dans le rumen que les fourrages et qu'ils favorisent moins la mastication (Sauvant et Peyraud, 2010). Par conséquent, ils induisent une chute du pH ruminal et un changement dans la proportion des AGV (Kennelly et al., 1999; Sutton et al., 2003). Ils entraînent entre autres une diminution des proportions de butyrate et d'acétate et une augmentation de la production de propionate. Comme il l'a été mentionné auparavant, il semble que le propionate et l'acide linoléique conjugué *trans*-10, *cis*-12 ont un effet additif sur la chute de la TMG du lait (Rulquin et al., 2007; Maxin et al., 2011). Aussi, des rations riches en concentrés diminuent la TMG du lait et augmentent la déposition des lipides dans les tissus adipeux (Vernon, 1980; Phuong et al., 2013).

Tout comme pour la NDFpe, il y a un équilibre à viser pour le rapport fourrages : concentrés (Yang et al., 2001; Jenkins et McGuire, 2006). En effet, l'ajout de concentrés à la ration peut favoriser la production laitière et la TP du lait. Par contre, un minimum de

fourrages dans la ration est requis pour éviter des problèmes digestifs et métaboliques chez la vache (Yang et al., 2001; Jenkins et McGuire, 2006). Aussi, quand les grains et les fourrages des rations sont distribués séparément, l'effet d'augmenter la proportion des grains peut entraîner une diminution de la prise alimentaire de fourrages (Reynolds, 2006). Cette diminution ou substitution peut être affectée, entre autres, par la dégradabilité de l'amidon dans le rumen, la fluctuation du pH ruminal et la production d'AGV (Allen, 2000; Reynolds, 2006). Ces facteurs affectent négativement la digestibilité de la fibre.

Lorsque des proportions d'aliments concentrés ont augmenté de 40 à 65 % dans la ration, la TMG du lait a diminué de façon importante (c.-à-d. 3 à 10 g/kg) (Hoden et Coulon, 1991). L'ampleur de cette diminution observée dépendant dans ce cas du type d'aliment complémentaire (c.-à-d. céréales) et/ou du type de fourrages et de son hachage (Hoden et Coulon, 1991). Yang et al. (2001) ont rapporté des interactions entre le rapport fourrages : concentrés, le traitement des grains et la TPF sur la TMG du lait. Pour le lien entre le rapport fourrages : concentrés et le traitement des grains, les auteurs ont noté que la chute de la TMG du lait a été plus importante lorsque l'orge était moulue plus finement pour des rations avec un rapport fourrages : concentrés faible comparés à celles avec un rapport fourrage : concentrés élevé (de 3,89 à 3,69 % et de 3,99 à 3,86 % de TMG, respectivement). Pour l'interaction entre le rapport fourrages : concentrés et la TPF; hacher l'ensilage de manière grossière plutôt que fine a permis une augmentation de la TMG plus grande avec les rations ayant un rapport fourrages : concentrés plus faible par rapport à celles avec un rapport plus élevé (de 3,37 à 3,85 % et de 3,84 à 4,00 % de TMG, respectivement). Ceci dit, dans tous les cas, les rations avec un rapport fourrages : concentrés plus élevé résultaient en un TMG supérieure.

2.3.3.3 *Choix des aliments énergétiques*

En plus de la quantité de concentrés offerts, la nature de ces derniers a également un impact sur la TMG du lait. En effet, des modifications dans le profil des GNF ont des impacts

sur la fermentation ruminale, la digestion de la fibre et la TMG du lait (NRC, 2001). Les lipides alimentaires sont aussi une source d'énergie pouvant influencer la TMG du lait.

2.3.3.3.1 Utilisation de l'amidon

Les grains sont normalement utilisés dans les rations comme principale source d'énergie. Ils sont riches en amidon; la teneur peut varier de 40 à 80 % de la MS (Giuberti et al., 2014). Cependant, les variations dans la teneur en amidon des grains dépendent, entre autres, de la température et des conditions environnementales durant la période de croissance de la plante et de la maturité de la plante (Nozière et al., 2010). L'amidon contient deux composants principaux, l'amylose et l'amylopectine, qui sont en quantités variables dans les grains (Kotarski et al., 1992). Les types d'amidon peuvent être divisés en : céréales, tubercules et légumineuses, en fonction de la longueur des chaînes de l'amylopectine, de leur structure cristalline et leur contenu en eau (Giuberti et al., 2014). La dégradation de l'amidon débute généralement dans le rumen et une portion de l'amidon est aussi dégradée dans l'intestin grêle (Deckardt et al., 2013). Par exemple, quand l'avoine, l'orge ou le blé sont offerts comme grains entiers ou roulés, au moins 90 % de l'amidon est fermenté dans le rumen, tandis que pour le maïs entier, c'est plutôt environ 40 % (Ørskov, 1986). Cependant, si le maïs est concassé, sa fermentation dans le rumen sera égale à celle des autres céréales (Ørskov, 1986). La nature des nutriments absorbés n'est pas la même quand l'amidon est digéré dans le rumen ou dans l'intestin grêle. En fait, la dégradation de l'amidon faite par les bactéries du rumen apportera de l'énergie sous forme d'AGV, tandis que l'amidon digéré dans l'intestin grêle fournira du glucose (Sauvant et al., 1994; Giuberti et al., 2014). L'amidon se rendant dans le gros intestin fournira, quant à lui, de l'énergie également sous forme d'AGV (Sauvant et al., 1994; Giuberti et al., 2014).

Il est connu que le pH du liquide ruminal diminue et que la production des AGV augmente quand l'amidon disponible dans le rumen augmente (NRC, 2001). De plus, la production de lait est généralement augmentée, mais elle est aussi associée à une diminution

de sa TMG (Reynolds, 2006). Cette modification dans la disponibilité peut provenir d'un changement de type de grains dans la ration (p. ex. maïs vs orge) et du type de traitement des grains (p. ex. grains humides vs grains secs) (Sauvant et Peyraud, 2010). La réduction de la taille des particules peut aussi avoir un impact sur la disponibilité de l'amidon dans le rumen. En effet, la mouture d'un grain augmente sa surface de contact, et l'amidon devient plus accessible pour la digestion (Nocek et Tamminga, 1991). La mouture des grains peut également causer une diminution du pH dans le rumen (Ørskov, 1986). Ainsi, presque toutes les perturbations associées à des rations riches en grains (p. ex. ballonnement, acidoses, abcès, chute de la TMG du lait) sont le résultat de la fermentation trop rapide de l'amidon en AGV et de la réduction de la digestion des fibres (Ørskov, 1986; Huntington, 1997).

Le nombre de repas quotidien de concentrés peut influencer l'impact de l'amidon sur les performances des ruminants qui ne sont pas alimentées en ration totale mélangée (Ørskov, 1986). À cet effet, Shabi et al. (1999) ont comparé en dispositif factoriel deux traitements de maïs (moulu vs concassé) avec deux fréquences d'alimentation (deux vs quatre repas/jour). Les vaches alimentées avec le maïs moulu ont produit plus de lait, tandis que l'ajout de repas a permis d'augmenter la TP, la TMG et le lactose du lait de 5,4, 13,2 et 1,7 % respectivement. Mais il n'y avait pas d'interactions entre le traitement du maïs et la fréquence d'alimentation pour la production de lait et les teneurs en protéine, MG et le lactose.

Plusieurs résultats présentés précédemment sont confirmés dans la méta-analyse de Ferraretto et al. (2012). Ces auteurs ont conclu que l'augmentation de l'amidon dans la ration diminue la digestibilité de la NDF dans le rumen et dans l'appareil digestif. Ils ont aussi rapporté une relation négative entre la TMG du lait et les quantités d'amidon digérées dans le rumen. Selon ces auteurs, la diminution de la digestibilité de la NDF pourrait être attribuée à l'effet négatif de l'amidon sur les populations de bactéries fibrolitiques (Russell et Wilson, 1996). Pour sa part, la diminution de la TMG du lait pourrait être expliquée par des faibles ingestion et digestion de la NDF (Jenkins et McGuire, 2006).

2.3.3.3.2 *Utilisation des sucres*

D'autres sources d'énergie telles, les sucres ont été utilisés comme alternatives à l'amidon. Même si les sucres sont considérés rapidement fermentescibles dans le rumen, ils n'affectent pas le pH ou même permettent de l'augmenter lorsqu'ils remplacent une source d'amidon (Broderick et al., 2008; Oba, 2011). La raison expliquant cet effet des sucres comme le sucrose ou le lactose est inconnue (Oba, 2011). Il semblerait, toutefois, que ces sucres favorisent la formation de butyrate plutôt que propionate dans le rumen; le butyrate ayant un pouvoir acidifiant moindre dans le rumen (Dijkstra et al., 2012). En ce sens, Penner et Oba (2009) ont réalisé une étude au corse de laquelle ils remplaçaient du maïs concassé par du sucrose dans les rations de vaches en début de lactation. Les vaches nourries avec le traitement de sucrose ont eu une ingestion et un pH au rumen plus élevé par rapport à celles nourries avec le maïs concassé (18,3 vs 17,2 kg MS/jour et 6,21 vs 6,06 unités de pH respectivement). Les digestibilités de la fibre, de l'amidon et de la matière organique, ainsi que la concentration et les proportions molaires des AGV n'ont pas été modifiées par les traitements. Ces auteurs n'ont noté aucune différence significative pour la production de lait ou ses composantes, mais ils ont rapporté une tendance à l'augmentation de la production de MG du lait avec le sucrose (1,35 vs 1,44 kg/jour) (Penner et Oba, 2009). Chibisa et al. (2015) ont quant à eux observé des résultats similaires lorsqu'ils ont remplacé soit de l'orge ou du maïs par du lactose. Contrairement aux résultats de ces études, Broderick et al. (2008) ont trouvé des différences sur l'ingestion et sur la TMG du lait en remplaçant l'amidon de maïs par du sucrose. Les traitements étaient : 7,5 % d'amidon sans sucrose, 5 % d'amidon avec 2,5 % de sucrose, 2,5 % d'amidon avec 5 % de sucrose et 7,5 % de sucrose sans amidon. Ils ont noté des effets linéaires pour la prise alimentaire et la TMG qui augmentaient avec l'ajout de sucrose dans la ration. Ces résultats suggèrent que de remplacer partiellement l'orge ou le maïs par du sucrose ou du lactose peut être une alternative pour augmenter l'énergie de la ration des vaches au début de la lactation sans incidence négative sur la TMG du lait.

2.3.3.3.3 *Utilisation des lipides*

Comblent le besoin en énergie des vaches hautes productrices, surtout en début de lactation, n'est pas facile. La supplémentation avec des lipides est une façon d'augmenter la densité énergétique des rations des vaches hautes productrices (Jenkins et Harvatine, 2014). L'effet de la supplémentation de lipides sur la TMG du lait est très variable et dépend de la composition des lipides, de la quantité qui est ajoutée dans la ration et de leur disponibilité dans le rumen (NRC, 2001). Une trop grande quantité de gras dans la ration entraîne une diminution de la TMG du lait et des problèmes digestifs chez la vache (Jenkins et Harvatine, 2014). Les réponses positives à la supplémentation de gras non protégés dans la ration atteignent un plateau lorsque la quantité dépasse en moyenne 6 % (Hoden et Coulon, 1991). Un excès de gras dans la ration entraînera une diminution de la TMG du lait et de la prise alimentaire (Jenkins et Harvatine, 2014).

La forme sous laquelle le gras est apporté a aussi une influence sur la réponse. Par exemple, la supplémentation avec de l'huile de poisson entraîne une forte baisse de la TMG du lait tandis que les mêmes lipides protégés de la dégradation au rumen par encapsulation entraînent une augmentation de la TMG (Chilliard et al., 2001). D'autres facteurs comme le stade de lactation, le niveau de production et des interactions avec les autres aliments de la ration peuvent également influencer l'impact des lipides sur la TMG du lait (Chilliard, 1993).

Les suppléments lipidiques peuvent être divisés en deux catégories en fonction de leur impact sur la fermentation ruminale et la digestion (Jenkins et Harvatine, 2014). Le premier groupe est composé des gras inertes et inclut des lipides qui n'ont pas ou très peu d'effets dans le rumen. La plupart de ces lipides contiennent de hautes teneurs en AG saturées ou sont sous forme de sels de calcium. Le deuxième groupe est constitué des gras actifs dans le rumen. Il contient des produits qui ont le potentiel d'altérer la fermentation et la digestion ruminale. Les lipides inclus dans cette catégorie sont principalement sous forme d'AG insaturés et se trouvent normalement dans les fourrages, les céréales, les oléagineux (soya,

graine de coton, canola, tournesol, etc.) et les sous-produits avec une haute teneur en gras (drêches de distillerie) (Jenkins et Harvatine, 2014). De hautes concentrations dans les rations de ce dernier groupe de lipides entraîneront généralement une diminution de la TMG du lait. L'effet de la supplémentation de différents lipides sur la production et la composition du lait est résumé dans le Tableau 2.1. Les suppléments de lipides encapsulés ont généralement un effet positif sur la TMG du lait. Cet effet est dû essentiellement à l'augmentation du prélèvement mammaire des AG, des triglycérides transportés dans les lipoprotéines de très basse densité d'origine intestinale (Chilliard et al., 1993).

Tableau 2.1 Effets de la supplémentation lipidique sur la production et la composition du lait.

Lipide alimentaire	Quantité de lipides servis (g/jour)	Production laitière (kg/jour)	Taux protéique (g/kg)	Taux de matières grasses (g/kg)	Production de matières grasses (g/jour)
Matières grasses animales libres	688	+ 0,5	- 0,6**	- 1,4	- 18
Matières grasses animales encapsulées	941	+ 1,0*	- 1,8**	+ 4,0**	+ 143**
Acides gras saturés	644	+ 1,7**	- 0,6*	+ 0,5	+ 58*
Sels de Ca d'huile de palme	593	+ 0,9**	- 1,2**	+ 0,4	+ 47**
Huiles végétales	573	- 0,6	- 0,9	- 2,8*	- 74*
Graines d'oléagineuses	538	+ 0,3	- 0,4**	- 0,9*	- 18
Huiles végétales encapsulées	693	0,0	- 0,8	+ 6,4**	+ 120**
Huiles marines	305	+ 0,2	- 1,2**	- 9,1**	- 208**

Effets exprimés par différence avec le témoin * où ** : écart significativement différent de zéro ($P < 0,05$ où $P < 0,01$).

Tiré de Chilliard et al., 2001

En comparant différentes sources lipidiques, les aliments ou suppléments pauvres en AG polyinsaturés, comme le suif ou l'huile de palme, peuvent augmenter davantage les MG du lait, par rapport aux aliments riches en AG polyinsaturés (Hoden et Coulon, 1991).

Les résultats de la méta-analyse de Rabiee et al. (2012) confirment qu'effectivement la supplémentation en lipides a un impact sur la production et la composition du lait ainsi que sur la prise alimentaire. Ces auteurs ont trouvé des augmentations de production laitière et de TMG du lait suite à l'ajout des lipides aux rations. Par contre, ils ont observé une diminution de la TP du lait et de la prise alimentaire. La diminution de la prise alimentaire conjuguée à l'augmentation de la production laitière montre que la supplémentation avec des lipides peut améliorer l'efficacité de la production de lait (Rabiee et al., 2012).

2.3.3.3.1 Effets de l'acide palmitique

Les sels de calcium d'huile de palme sont utilisés régulièrement comme supplément énergétique (Palmquist, 2006). Ils contiennent normalement de 45 à 50 % d'acide palmitique (Palmquist, 2006). L'huile de palme peut également être fractionnée afin d'en isoler les AG insaturés (oléique) et les AG saturés (stéarique). Cette dernière fraction peut contenir plus de 85 % d'acide palmitique. La supplémentation avec l'acide palmitique a pris de l'ampleur parce que la glande mammaire semble favoriser son incorporation dans la MG du lait par rapport à l'acide stéarique (Barber et al., 1997; Loften et al., 2014). Son efficacité de transfert de la ration au lait varie de 12 à 50 % (Loften et al., 2014). Les impacts de la supplémentation en acide palmitique sur la TMG du lait sont variables. Des études rapportent une augmentation (Piantoni et al., 2013; Rico et al., 2014c; Chamberlain et DePeters, 2016), tandis que d'autres ne notent aucun effet (Rico et al., 2014a,b) ou même mentionnent un effet négatif de l'ajout de ce supplément sur la TMG du lait (Warntjes et al., 2008). Les variations dans la réponse peuvent provenir des conditions physiologiques (c.-à-d. stade de lactation ou bilan énergétique) (Loften et al., 2014) et environnementales entre les expériences. Par exemple, les vaches avec une teneur plus élevée de MG semblent avoir un taux de transfert plus élevé de l'acide palmitique de la ration au lait (Warntjes et al., 2008). De plus, les vaches au début de la lactation avec une production laitière plus faible ont répondu plus favorablement à la supplémentation avec de l'acide palmitique par rapport aux vaches avec une production laitière plus élevée (Warntjes et al., 2008).

2.3.3.4 *Différence alimentaire cations-anions (DACA)*

La différence alimentaire cations-anions (**DACA**) a été amplement étudiée chez des vaches avant le vêlage pour réduire l'incidence de la fièvre vitulaire (Block, 1984; Oetzel, 1991; Charbonneau et al., 2006). Il est maintenant démontré que de modifier la DACA des rations aurait également un intérêt pour les vaches en lactation (Block, 1994; Apper-Bossard et al., 2009). En fait, les animaux avec un haut niveau de production ont une activité métabolique et digestive intense (Block, 1994). Les rations riches en énergie qui sont offertes en début de lactation entraînent une chute du pH ruminal (Block, 1994; Apper-Bossard et al., 2009). Pour contrôler l'acidification du rumen, l'augmentation de la DACA a été suggérée.

Les résultats des études sur la DACA pour les vaches en lactation sont variables et difficiles à comparer, parce que les éléments minéraux considérés varient d'une étude à l'autre. En effet, différentes équations peuvent être utilisées pour calculer la DACA :

$$1. DACA = (Na + K - Cl) \text{ (Mongin, 1981)}$$

$$2. DACA = (Na + K) - (Cl + S) \text{ (Ender et al., 1971; NRC, 2001)}$$

$$3. DACA = (Na + K) - (Cl + 0,6S) \text{ (Goff et al., 2004)}$$

$$4. DACA = (Na + K + 0,38Ca + 0,30Mg) - (Cl + 0,6S + 0,5P) \text{ (Horst et Goff, 1997)}$$

Néanmoins, la plupart des études utilisent les équations 1 et 2 pour calculer la DACA. Aussi, deux autres facteurs qui rendent difficile la comparaison des résultats sont la variabilité des rations de base et le stade physiologique des animaux sous étude (p. ex. parité et stade de lactation).

Les effets de la DACA et des substances tampons sont souvent confondus, étant donné que la DACA augmente avec l'addition des principales substances tampons (Hu et al., 2007a). Les substances tampons comme le bicarbonate de sodium, le carbonate de calcium ou le sesquicarbonate de sodium sont ajoutées aux rations pour réduire les problèmes liés à la baisse de pH et maintenir le TMG du lait (NRC, 2001). Par exemple, pour compenser l'acidose causée par des rations hautes en amidon (Huntington, 1997; Kennelly et al., 1999). Il semble que l'addition de substances tampons est plus efficace sous certaines circonstances : par exemple, quand la proportion de concentrés de la ration dépasse 50 % de la MS total, lorsque la teneur en propionate est supérieure à 20 % des AGV totaux, lorsque le pH du rumen est inférieur à 6 et lorsque la TMG du lait est faible (Khorasani et Kennelly, 2001; Meschy et al., 2004).

Certains chercheurs ont comparé l'effet des différentes sources de cations pour modifier la DACA (West et al., 1992; Wildman et al., 2007a; Iwaniuk et al., 2015). En comparant le Na et le K, des études suggèrent qu'il n'y a pas des différences dans la production laitière et la composition du lait (West et al., 1992; Wildman et al., 2007a). Pour leur part, Iwaniuk et al. (2015) ont comparé quatre rapport K et Na (100 : 0, 66,7 : 33,3, 33,3 : 66,7 et 0 : 100) comme source de cations dans une ration de base avec une DACA de 15 mEq/100 g de MS. Ils ont constaté une augmentation de 0,30 unité de pourcentage pour la TMG du lait pour des vaches qui recevaient le traitement avec le Na comme seul cation (c.-à-d. 0 : 100 K : Na), par rapport aux vaches qui recevaient le traitement avec le K comme seul cation (c.-à - d. 100 : 0 K : Na). Dans les autres traitements (c.-à-d. 66,7 : 33,3 et 33,3 : 66,7 K : Na), la TMG est restée inchangée (c.-à-d. 3,20 %). Par contre, ils n'ont pas trouvé de différences pour la prise alimentaire et la production laitière.

Harrison et al. (2012) ont rapporté que l'augmentation du K dans la ration (de 1,2 à 2 % de la MS) a augmenté significativement la TMG du lait de 0,37 unité de pourcentage chez les vaches au début de la lactation (85 JEL). Ces auteurs suggèrent que le K peut avoir un effet sur les sentiers de biohydrogénation ruminale des AG, ce qui peut expliquer

l'augmentation de la TMG. Cette hypothèse a été confirmée plus tard avec une étude in vitro dans laquelle le carbonate de potassium a modifié les sentiers de biohydrogénation ruminale des AG de manière cohérente avec l'augmentation de la TMG du lait (Jenkins et al., 2014). Néanmoins, dans ces études, les résultats spécifiques du potassium ne peuvent pas être séparés de celui du carbonate (Harrison et al., 2012). Il reste que des chercheurs ont suggéré que l'effet de la DACA est plus important pour affecter l'équilibre acido-basique de l'animal que les concentrations individuelles de ces minéraux (K, Na, et Cl) dans les rations (Block et Sanchez, 2000; West, 2003; Wildman et al., 2007a).

Le Tableau 2.2 présente un résumé des résultats de l'effet de la DACA, calculée à partir de l'équation 1, sur les performances des vaches en lactation. Dans leur méta-analyse, Hu et Murphy (2004) mentionnent qu'une des raisons pour lesquelles ils n'ont pas trouvé de différences pour la TMG du lait (Tableau 2.2) est que la majorité des traitements (90 %) avait une TMG du lait de plus de 3,3 %. Cela suggère que la DACA semble avoir un effet plus important quand il y a une chute de la TMG du lait (Hu et Murphy, 2004).

La recommandation du NRC (2001) est de calculer la DACA selon l'équation 2. Les résultats sur les performances des vaches lorsque cette formule est utilisée sont présentés dans le Tableau 2.3. Tout comme pour les résultats avec l'équation 1, les réponses de la DACA sur la TMG du lait sont variables, mais suggèrent une augmentation de la TMG du lait (Tableaux 2.2 et 2.3).

Tableau 2.2 Résumé des études de l'effet de la différence alimentaire cations-anions (DACA) sur la matière sèche ingérée, la production laitière et la composition du lait, en utilisant l'équation $DACA = (Na + K - Cl)$

Étude	DACA (mÉq/100 g MS)	Stade de lactation	Paramètre	Réponse
Wildman et al., 2007a	41 et 58	Milieu à la fin	MSI ¹	Pas d'effet significatif
			Production laitière	Pas d'effet significatif
			TMG ² et TP ³ du lait	Pas d'effet significatif
Hu et Murphy, 2004	Meta-analyse ⁴	-- -	MSI	Effet positif avec une DACA de 40 maximale
	26,1 ± 19,4		Production laitière	Effet positif une DACA de 34 maximale
			TMG et TP du lait	Pas d'effet significatif
Iwaniuk et al., 2015	12,9 en moyenne	Début et Milieu	MSI	Pas d'effet significatif
			Production laitière	Pas d'effet significatif
			TMG du lait	Effet positif (linéaire)
	34,6 en moyenne	Début et Milieu	TP du lait	Pas d'effet significatif
			MSI	Effet positif (linéaire)
Hu et al., 2007a	-19,7 à +72,7	Début	Production laitière	Effet positif (linéaire)
			TMG du lait	Effet positif (linéaire)
			TP du lait	Pas d'effet significatif
Hu et al., 2007a		Début	MSI	Effet positif une DACA de 40 maximale
			Production laitière	Non reporté
			TMG du lait	Effet positif (linéaire)
			TP du lait, lactose et solides non gras	Effet positif

¹MSI :Matière sèche ingérée.

²TMG : Teneur en matières grasses.

³TP : Teneur en protéines.

⁴Moyenne et écart type.

Tableau 2.3 Résumé des études de l'effet de la différence alimentaire cations-anions (DACA) sur la matière sèche ingérée, la production laitière et la composition du lait, en utilisant l'équation $DACA = (Na + K) - (Cl + S)$

Étude	DACA (mÉq/100 g MS)	Stade de lactation	Paramètre	Réponse
Delaquis et Block, 1995	5,5 à 25,8	Début	MSI ¹	Effet positif
			Production laitière	Effet positif
			TMG ² du lait	Pas d'effet significatif
	4,0 à 37,3	Milieu	MSI	Effet positif
			Production laitière	Effet positif
			TMG du lait	Pas d'effet significatif
	20 et 37,5	Fin	MSI	Pas d'effet significatif
			Production laitière	Pas d'effet significatif
			TMG du lait	Pas d'effet significatif
Wildman et al., 2007b	15 et 39	Début	MSI	Effet positif
			Production laitière	Effet positif
			TMG et TP ³ du lait	Effet positif
Apper- Bossard et al., 2006	0, 15 et 30	Début-Milieu	MSI	Effet positif
			Production laitière	Pas d'effet significatif
			TMG du lait	Effet positif
			TP du lait	Pas d'effet significatif
Chan et al., 2005	20, 35 et 50	Début	MSI, production laitière, TMG et TP du lait	Pas d'effet significatif
Roche et al., 2005	28 à 88	Début	MSI	Pas d'effet significatif
			Production laitière	Pas d'effet significatif
			TMG du lait	Effet positif (linéaire)
Hu et al., 2007 b	-3,3 à 47	Début	MSI	Effet positif (linéaire)
			TMG du lait	Effet positif (linéaire)
			TP du lait	Effet positif (linéaire)
Harrison et al., 2012	32 vs 53	Début	MSI	Pas d'effet significatif
			TMG du lait	Effet positif

¹MSI : Matière sèche ingérée.

²TMG : Teneur en matières grasses.

³TP : Teneur en protéines.

Aussi, l'étude d'Apper-Bossard et al. (2006) a permis de mieux comprendre l'impact du type de ration sur les résultats obtenus par rapport à la variation de la DACA. Ils ont évalué l'effet de la DACA pour des rations faibles et riches en concentrés. Ils ont noté une interaction entre leur traitement permettant de conclure que l'augmentation de la DACA des rations riches en concentrés avait un effet plus marqué sur la TMG du lait que dans le cas des rations faibles en concentrés. Ils ont aussi trouvé un effet sur la prise alimentaire dans les rations élevées en concentrés qui suggère qu'une hausse de la DACA aurait permis aux vaches de mieux s'adapter aux rations acidogènes.

En revanche, d'autres études n'ont montré aucun effet de la DACA sur la TMG du lait des vaches en début de lactation (Chan et al., 2005) ou à tous les stades de la lactation (Delaquis et Block, 1995) (Tableau 2.3). Delaquis et Block (1995) sont les seules qui ont fait l'analyse sur toute la durée d'une lactation. Bien qu'ils n'aient pas trouvé d'effets sur la TMG du lait, il semble que la sensibilité des vaches à la DACA puisse dépendre du stade de lactation (Delaquis et Block, 1995; Shire et Beede, 2013).

Malgré les résultats divergents, des recommandations pour la DACA, calculée à partir de l'équation 2, chez la vache au début et au milieu de lactation sont respectivement de +50 et entre +27,5 et +40 mEq/100 g MS, selon Block et Sanchez (2000) ou de +30 mEq/100 g MS, selon Shire et Beede (2013) sans égard au stade de lactation.

Finalement, des rations avec plus de cations sont recommandées lors d'épisodes de température élevée pour atténuer les effets du stress thermique (Shire et Beede, 2013). Des études suggèrent en particulier que le K dans la ration a des effets bénéfiques sur la production chez la vache en stress thermique et aussi au début de la lactation. Les vaches en stress thermique sont normalement déficientes en K, parce qu'elles perdent ce minéral dans leur sueur en plus de celui excrété dans le lait (West, 2003).

2.4 Fractions de la protéine du lait

L'azote dans le lait se retrouve sous forme de : caséine, de protéine du lactosérum, et de composés non protéiques. La caséine est le principal composant de la protéine du lait (Cerbulli et Farrell, 1957). Dans la littérature, la TP du lait peut être exprimée sous forme de protéine vraie ou de protéine brute. La protéine vraie représente la protéine synthétisée dans la glande mammaire, par exemple la caséine, de même que les protéines préformées provenant du sang (DePeters et Ferguson, 1992). La TP brute est plutôt un indicateur de l'azote total du lait parce qu'elle inclut l'azote non protéique, principalement l'urée, en plus des protéines (DePeters et Ferguson, 1992). Le sang est la principale source d'azote non protéique du lait chez la vache. La concentration d'urée dans le lait est le reflet de la concentration d'urée dans le sang et les autres fluides corporels (DePeters et Cant, 1992; Ishler, 2008). En effet, les concentrations d'urée s'équilibrent avec l'eau du corps. Cet équilibre est clairement vu dans les corrélations élevées entre les teneurs d'urée dans le sang et le lait (c.-à-d. $R^2 = 0,95$; Broderick et Clayton, 1997).

Le suivi des teneurs en urée du lait peut être utilisé comme outil de gestion nutritionnelle et environnementale des troupeaux laitiers (c.-à-d. niveau et disponibilité optimales de protéines et d'énergie de la ration, estimation de surplus ou carence en ammoniac, etc.) (Nousiainen et al., 2004). Un excès de protéines dans la ration entraîne une augmentation de la concentration en urée du lait, et résulte en des coûts élevés d'alimentation et en un excès d'azote rejeté dans l'environnement. L'urée est le composant azoté principal de l'urine, avec une teneur entre 50 à 90 % de l'azote total, et il a le plus grand potentiel de volatilisation (Bussink et Oenema, 1998). Les valeurs recommandées pour l'urée du lait sont présentées au Tableau 2.4. Cependant, ces valeurs dépendent d'autres facteurs comme le système d'alimentation et le poids des vaches (Patton et al., 2014).

Tableau 2.4 Valeurs recommandées pour l'urée du lait par groupe

Groupe	Plage de valeurs recommandées pour l'urée du lait (mg/dL)	Acceptable (mg/dL)
Troupeau	10-12	9-13
Groupe 1 = 0-30 JEL	14-15	14-16,5
Groupe 2 = 31-60 JEL	10-11	9-12
Groupe 3 = 61-180 JEL	10-12	9-12
Groupe 4 = 181-270 JEL	10-12	9-13
Groupe 5 > 271 JEL	10-13	9-14

Adapté de Patton et al., 2014

2.5 Facteurs influençant la teneur en protéines et en urée du lait

La concentration totale des protéines dans le lait des mammifères peut varier de 10 à 200 g/kg (Murphy et O'Mara, 1993). La TP du lait est déterminée en grande partie par la génétique de la vache (Forsbäck et al., 2010). Cependant, sa teneur peut être aussi affectée par l'alimentation, le stade de lactation, la parité, les maladies et l'environnement (DePeters et Ferguson, 1992; Murphy et O'Mara, 1993). Toutefois, l'ampleur des changements dus à l'alimentation pour la TP par rapport à la MG du lait est plus limitée. Généralement, les races avec plus de protéines dans le lait ont aussi des teneurs plus élevées en MG (par exemple la Jersey) (Murphy et O'Mara, 1993). Le stade de lactation a aussi un effet sur la TP du lait (Beever et al., 2001). Après le vêlage, la TP du lait est la plus haute et descend pour atteindre son nadir entre 5 et 6 semaines de lactation et va augmenter à nouveau graduellement à la fin de la lactation (Beever et al., 2001). La teneur en urée du lait est affectée par de nombreux facteurs liés aux différences dans l'alimentation et la gestion et aussi des différences entre les vaches (Spek et al., 2013b).

2.5.1 Facteurs liés à l'animal

Les facteurs liés à l'animal entraînent beaucoup de variabilité dans la TP ou en urée du lait. Cette variabilité peut, entre autres, être due au stade métabolique de la vache et à son potentiel génétique.

2.5.1.1 *Impact de la génétique*

La génétique a un impact sur la TP et en urée du lait. Il est connu que la composition du lait varie en fonction des races de vaches. En Amérique du Nord, les races en ordre croissant pour leur TP dans le lait sont : la Holstein, l'Ayrshire, la Suisse Brune, la Guernsey et la Jersey (Gibson, 1989). Cependant, il y a tout de même des variations importantes dans la TP du lait au sein de chaque race (DePeters et Ferguson, 1992). Tandis que l'azote non protéique est moins variable d'une race à l'autre, il reste que la plage de variation pour une même race est aussi importante (DePeters et Ferguson, 1992). Pour l'urée du lait, les résultats sont différents. Kauffman et St-Pierre (2001) n'ont pas trouvé de différences entre l'urée du lait des vaches de race Holstein et Jersey. À l'inverse, Wattiaux et al. (2005) ont trouvé des concentrations d'urée plus élevées pour les vaches de races Jersey et Suisse Brune par rapport aux vaches de race Holstein.

Des études suggèrent d'ailleurs que la sélection pour la TP du lait entraîne également une augmentation de l'urée du lait (Stoop et al., 2007). De plus, il semble que la teneur en urée est modérément héritable, ce qui implique qu'il peut y avoir un aspect génétique lié à des modifications dans la concentration en urée du lait (Wood et al., 2003; Spek et al., 2013a). Aussi, des vaches à haut potentiel génétique pour les teneurs en gras et en protéines du lait ont des concentrations plus élevées d'urée dans le lait que les vaches avec un bas potentiel génétique pour ces composantes (Trevaskis et Fulkerson, 1999). En plus, une augmentation de la production du lait va augmenter la teneur en urée du lait à cause d'une plus élevée ingestion de protéine brute (Jonker et al., 2002a,b). De plus, une corrélation négative entre le

poids vif des vaches et la concentration en urée du lait a été rapportée (Jonker et al., 1998). En effet, un animal plus grand a plus de sang qu'un animal plus petit et, si la même quantité d'urée est produite, une dilution résultant en une concentration d'urée plus faible se produit (Jonker et al., 1999). Il semble aussi y avoir des effets phénotypiques pour la concentration d'urée qui ne peuvent pas être expliqués par la consommation d'azote, la production laitière, le poids vif ou d'autres facteurs liés à la production (Aguilar et al., 2012). Ainsi, à cause de la grande variation des teneurs en urée en réponse à une modification dans la ration, il est recommandé d'échantillonner le lait d'au moins quatre vaches pour évaluer une ration (Broderick et Clayton, 1997).

2.5.1.2 Impact du stade de lactation et de la parité

Les premières traites après le vêlage, la TP du lait est très élevée, en moyenne $14,9 \pm 3,3$ % dans le colostrum, principalement à cause de la présence d'immunoglobulines provenant du sang (Murphy et O'Mara, 1993; Kehoe et al., 2007). Ensuite, la teneur diminue rapidement au cours des cinq premiers jours de lactation, puis plus lentement par la suite jusqu'à l'atteinte d'un minimum entre la cinquième et la dixième semaine après le vêlage (Murphy et O'Mara, 1993). Aussi, la TP est généralement plus faible chez les vaches primipares que chez les multipares (Brun-Lafleur et al., 2010). Cette différence peut s'expliquer par la difficulté des vaches primipares à mobiliser leurs réserves de protéines puisqu'elles en ont aussi besoin pour leur croissance.

Tout comme pour la TP, le stade de lactation a un effet sur la concentration en urée dans le lait. Plusieurs études suggèrent que la concentration en urée du lait est légèrement plus faible (1-2 mg/dL) durant les quatre à six premières semaines de lactation (Trevaskis et Fulkerson, 1999; Godden et al., 2001; Rajala-Schultz et Saville, 2003). Par contre, Wattiaux et Karg (2004) rapportent une concentration plus élevée pendant cette période. Ils attribuent ces valeurs à la mobilisation de protéines corporelles (Wattiaux et Karg, 2004). Finalement, Scheper et Meijer (1998) n'ont pas trouvé d'effet du stade de lactation sur l'urée du lait. La

parité des vaches peut aussi avoir un effet sur l'urée du lait. Plusieurs études démontrent que les vaches primipares obtiennent généralement une concentration d'urée légèrement plus faible à celle des vaches en deuxième et troisième lactation (Godden et al., 2001; Arunvipas et al. 2003; Wood et al., 2003). Dans leur expérience, Wood et al. (2003) ont entre autres observé des teneurs en urée du lait de 12,4, 12,8 et 12,7 mg/dL pour les vaches en première, deuxième et troisième lactation, respectivement. Par contre, dans leur étude, Jonker et al. (1998), ont observé des concentrations d'urée plus élevées pour les vaches primipares que pour les multipares. La différence entre ces deux résultats peut être due à la provenance des données. L'étude de Wood et al. (2003) était réalisée à partir de la banque de données du contrôle laitier (Dairy Herd Improvement; DHI), tandis que, dans l'étude de Jonker et al. (1998), les données étaient compilées à partir de plusieurs expériences. Finalement, d'autres études n'ont pas montré d'effet de la parité sur la concentration d'urée du lait (Schepers et Meijer, 1998; Rajala-Schultz et Saville, 2003). Toutefois, certains auteurs ont suggéré (Jonker et al., 1999; Wattiaux et al., 2005) que la concentration en urée du lait augmente avec la production laitière, ce qui peut devenir un facteur confondant.

2.5.1.3 Impact des maladies

L'effet des maladies, comme la mammite, sur les teneurs en protéines et en urée du lait n'est pas clair. Eicher et al. (1999) n'ont pas trouvé d'effet du comptage de cellules somatiques sur la TP et en urée du lait. Wattiaux et Krag (2004) ont pour leur part, rapporté une corrélation négative entre l'urée du lait et le comptage de cellules somatiques. Cependant, il a été déterminé qu'indépendamment de l'espèce (vaches, brebis ou chèvres), il y a une augmentation des protéines du lactosérum, due aux réponses inflammatoires et aux réponses du système immunitaire lors d'une mammite (Le Maréchal et al., 2011). Aussi, comme il l'a été mentionné auparavant, le type de pathogène a un effet. Par exemple, la mammite causée par *Streptococcus uberis* est associée à une augmentation de la TP et de la caséine du lait alors que la mammite de *Streptococcus dysgalactiae* n'affecte pas ces composantes (Le Maréchal et al., 2011).

2.5.2 Facteurs de régie et environnementaux

2.5.2.1 *Gestion de la traite et fréquence d'alimentation*

Une étude (Klei et al., 1997) a montré que la TP du lait était plus élevée quand les vaches étaient traitées deux fois plutôt que trois fois par jour en début, en milieu et en fin de lactation (2,91 vs 2,77; 3,19 vs 3,08 et 3,28 vs 3,16 % respectivement). Dans une autre étude, Erdman et Varner (1995) ont aussi noté une diminution de la TP du lait quand la fréquence de la traite augmente.

Les résultats sont divergents en ce qui a trait à l'effet du nombre de repas sur la TP du lait. Shabi et al. (1999) ont observé une augmentation de 5,4 % de la TP du lait lorsque la fréquence d'alimentation passait de deux à quatre repas par jour. Cependant, d'autres études n'ont pas trouvé de différences dans la TP du lait lorsque le nombre de repas augmentait d'un à quatre (Dhiman et al., 2002) ou à cinq par jour (Mäntysaari et al., 2006).

Les résultats sont aussi divergents en ce qui a trait aux différences de la concentration en urée du lait du matin et du soir, dans un régime à deux traites. Une première étude montrée qu'il n'y a pas de différences de la teneur en urée entre deux traites quotidiennes (Trevaskis et Fulkerson, 1999). D'autres auteurs rapportent plutôt que l'urée est plus faible à la traite du matin qu'à celle du soir (Broderick et Clayton, 1997; Godden et al., 2001). Les variations de la concentration en urée dans le lait entre les traites du matin et du soir semblent être liées au moment de l'échantillonnage par rapport à l'alimentation (Spek et al., 2013a). Des études ont suggéré que le pic d'urée dans le lait est de 3 à 5 heures après le repas (Rajala-Schultz et Saville, 2003; Spek et al., 2013a), ce qui pourrait expliquer la concentration en urée plus faible à la traite du matin. Cependant, selon Gustafsson et Palmquist (1993), si la fréquence d'alimentation augmente (plus de 2 fois par jour) la variation journalière devrait disparaître. À ce résultat peuvent être ajoutés ceux de l'étude de Geerts et al. (2004) qui ont trouvé une concentration d'urée plus élevée à la traite du matin quand les vaches recevaient leur

alimentation en distribution séparée. Par contre, il n'y avait pas de différence entre la concentration d'urée des traites du matin et du soir quand les vaches recevaient une RTM. Broderick et Clayton (1997) ont mentionné que l'utilisation d'un pool d'échantillon de la traite du matin et la traite du soir est plus fiable pour l'interprétation des valeurs de l'urée, plutôt que changer l'échantillonnage du lait entre la traite du matin et la traite du soir.

2.5.2.2 Saison

Tout comme pour la TMG du lait, la TP du lait est plus faible pendant l'été. Bernabucci et al. (2002) ont rapporté une diminution de 9,9 % dans la TP pendant l'été comparée à celle du printemps (3,01 vs 3,31 %, respectivement). Dans une autre étude réalisée pendant trois saisons, soit l'hiver, le printemps et l'été, la TP du lait était aussi plus basse en été par rapport au printemps et à l'hiver (3,29, 3,40 et 3,50 % respectivement; Bernabucci et al., 2015).

Pour l'urée du lait, selon certaines études (Godden et al., 2001; Rajala-Schultz et Saville, 2003), sa concentration est plus élevée pendant l'été et plus faible pendant les mois d'automne, d'hiver et de printemps. L'effet de la saison sur la concentration d'urée du lait peut être expliqué par l'augmentation de la production laitière (Jonker et al., 2002b) et par les changements dans la ration (Rajala-Schultz et Saville, 2003). Ce dernier facteur a encore plus d'impact lorsque les vaches ont accès au pâturage pendant l'été (Rajala-Schultz et Saville, 2003). Par contre, Wattiaux et al. (2005) ont rapporté une interaction entre la saison, la fréquence de traite et la parité. La relation obtenue dans leur étude montrait que les vaches primipares avaient plus d'urée dans le lait au printemps qu'à l'automne quand elles étaient traitées deux fois par jour. Par contre, si la traite était faite trois fois par jour, le contraire se produisait. Pour les vaches multipares, la moyenne d'urée du lait était plus élevée quand la traite était faite trois fois par jour par rapport à deux fois par jour, et ce, pour toutes les saisons (Wattiaux et al., 2005). Cependant, ces auteurs suggèrent une interprétation attentive des

résultats de la fréquence de traite, parce que ce facteur peut être confondu avec la fréquence d'alimentation.

2.5.3 Facteurs liés à l'alimentation

2.5.3.1 *Besoins en protéines des vaches laitières*

Avant d'aller plus loin au sujet de la composition protéique du lait, il faut s'attarder à la nutrition azotée chez les ruminants. Dans le rumen, la protéine ingérée se divise en fractions dégradables (**PID**) et non dégradables (**PIND**) (Bach et al., 2005). La PID est composée d'azote non protéique et de protéine vraie. Cette dernière est dégradée en peptides et acides aminés (**AA**), pour finalement être désaminée afin de libérer ammoniac, ou incorporée dans la protéine microbienne (**PMi**). L'azote non protéique est constitué des fractions présentes dans l'ADN et l'ARN, l'ammoniac, les AA et les petits peptides. Ces trois derniers éléments sont utilisés pour la croissance microbienne (Bach et al., 2005). Une portion variable de la PIND est directement digérée par la vache dans l'intestin grêle (Broderick, 2003; Nadeau et al., 2007). La protéine métabolisable est définie comme les AA totaux disponibles pour la vache pour soutenir ses fonctions physiologiques (Patton et al., 2014). Les tissus corporels ont besoin de protéines pour la croissance, l'entretien et la production laitière. La PMi fournit de 50-75 % des AA nécessaires pour ces besoins et la PIND comble le reste (Varga et Ishler, 2007).

Le métabolisme azoté dans le rumen peut être divisé en deux séries de réactions, soit (1) la dégradation des protéines, qui fournissent les sources d'azote pour les bactéries, et (2) la synthèse de PMi (Bach et al., 2005). L'ammoniac est le produit du catabolisme des protéines dans le rumen, en plus d'être le principal substrat pour la synthèse des PMi (Hristov et Jouany, 2005). L'utilisation d'ammoniac ainsi produit et de l'urée provenant de la salive pour la synthèse de PMi dépend de l'énergie disponible. Donc, la dégradabilité des glucides peut affecter l'absorption de l'ammoniac, ce qui limite l'efficacité de l'utilisation d'azote

(Huntington, 1997; Reynolds et Kristensen, 2008). Autrement dit, quand l'énergie est disponible pour les microorganismes du rumen, l'ammoniac sera utilisé pour la synthèse d'AA. Ces AA vont ensuite être utilisés directement pour la synthèse de PMi. Si l'énergie est limitante, la synthèse d'AA sera réduite et les AA seront désaminés et leurs squelettes carbonés seront fermentés en AGV (Bach et al., 2005). Une augmentation de la synthèse de PMi fournit à l'intestin grêle des protéines avec un profil d'AA équilibré et réduit la concentration d'ammoniac dans le rumen (Calsamiglia et al., 2010). Lorsque les bactéries du rumen ne sont pas capables de capturer l'ammoniac et de le convertir en PMi, l'excès est absorbé à travers la paroi du rumen (Ishler, 2008). L'ammoniac dans la circulation systémique est un composant hautement toxique pour les tissus nerveux (Symonds et al., 1981). Sa conversion en urée est la façon pour la vache de prévenir cette toxicité (Symonds et al., 1981). La formation d'urée à partir de l'ammoniac requiert un apport d'énergie. Pour chaque gramme d'azote consommé en excès qui doit être excrété, les besoins énergétiques augmentent de 13,3 kcal d'énergie nette (Lefebvre, 2003). Aussi, les AA absorbés, mais qui ne sont pas assemblés en protéines du lait, seront métabolisés pour produire de l'énergie (Broderick et Clayton, 1997). L'azote libéré apparaîtra alors sous forme d'urée recyclé dans le système digestif ou sécrété dans le lait ou dans l'urine (Broderick et Clayton, 1997).

Le synchronisme alimentaire énergie - protéine consiste à fournir de façon suffisante et simultanée au rumen des sources d'azote et d'énergie disponibles pour les besoins des microbes (Hall et Huntington, 2008; Reynolds et Kristensen, 2008) (Figure 2.7). Quand le taux de dégradation de la protéine excède celui des glucides, une grande quantité d'azote peut être perdue sous forme d'ammoniac et, inversement, quand le taux de dégradation des glucides excède celui de la protéine, la synthèse de PMi diminue (Nocek et Russell, 1988). Le synchronisme peut être atteint en modifiant la source d'azote, la source d'énergie ou les deux. Une modification dans le rapport fourrages : concentrés peut être considérée comme une méthode pour manipuler ce synchronisme (Cabrita et al., 2006).

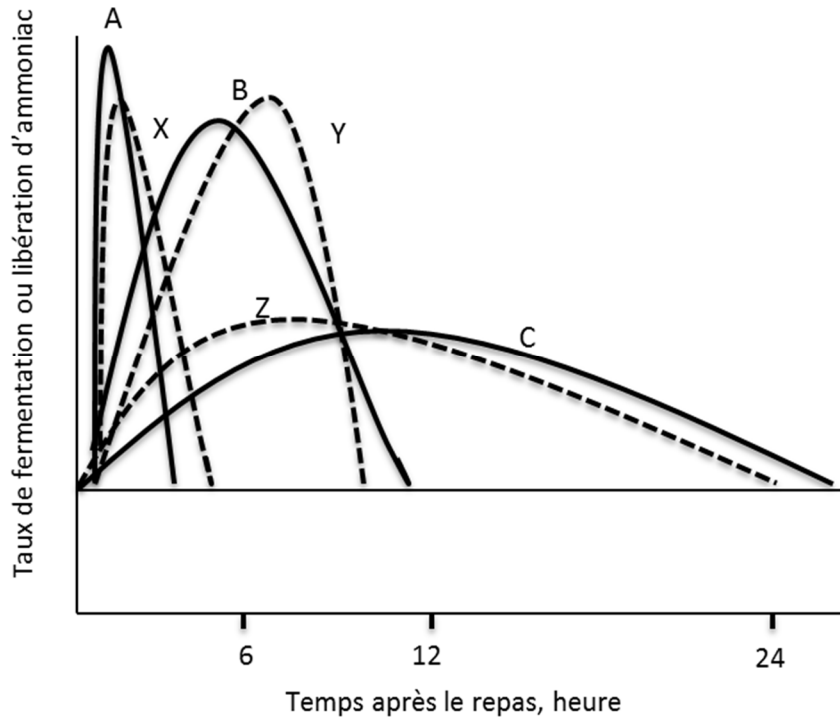


Figure 2.7 Taux de fermentation ruminale théorique selon le temps après l'ingestion des glucides et les sources d'azote ruminale nécessaire pour soutenir la synthèse de protéine microbienne.

A, B et C= Glucides rapidement, modérément et lentement fermentés; X, Y et Z= Sources d'azote.

Adaptée de Johnson, 1976

En considérant la dégradation des glucides et de l'azote dans des rations synchrones, la combinaison rapide - rapide libère plus d'ammoniac que la combinaison lente - lente (Sauvant et Van Milgen, 1995). Ainsi, les microorganismes présentent une capacité limitée de croissance même si les substrats (c.-à-d. énergie et protéine) sont disponibles dans les bonnes proportions (Sauvant et Van Milgen, 1995). Pour les rations asynchrones, la combinaison glucides lent - azote rapide induit une production d'ammoniac plus importante qu'une combinaison glucides rapide - azote lent (Sauvant et Van Milgen, 1995).

Cependant, les recherches portant sur le synchronisme énergie-protéine sont souvent contradictoires et les effets sont beaucoup moins importants que ce qui pouvait être envisagé à priori (Sauvant et Van Milgen, 1995; Cabrita et al., 2006; Hall et Huntington, 2008). En

fait, plusieurs facteurs interreliés tels que l'animal, l'environnement, les microbes du rumen et le type d'alimentation rendent cette relation difficile à observer. De plus, pour les constituants azotés, il semble que les ruminants ont développé des mécanismes physiologiques comme le recyclage de l'azote pour surmonter ou minimiser les effets d'asynchronisme (Cabrita et al., 2006; Cole et Todd, 2008). Pour les constituants énergétiques, il semble que les microorganismes font un stockage transitoire de glucides sous forme de polysaccharides qui pourraient être la source importante d'énergie pour le métabolisme microbien entre 2 à 6 heures après le repas (Sauvant et Van Milgen, 1995).

2.5.3.2 Impact de l'alimentation sur la teneur en protéines du lait

La TP du lait est déterminée en grande partie par la génétique de la vache (Forsbäck et al., 2010). Ainsi, l'alimentation semble avoir un impact restreint sur la TP du lait, parce que sa variation est minimale (Tamminga, 1992). En effet, l'apport en protéines brutes de la ration, sous une gamme de différents systèmes d'alimentation, semble avoir un effet incohérent sur la TP du lait (Walker et al., 2004). Cependant, la TP du lait peut être réduite quand les rations sont supplémentées avec de la PIND qui n'est pas bien équilibrée en AA par rapport aux besoins de la vache (p. ex., avec le fin gluten de maïs) (Schwab et al., 2005).

La disponibilité de l'énergie dans le rumen influence aussi la TP du lait. En effet, des expériences (Kononoff et Heinrichs, 2003a; Brito et Broderick, 2006) ont montré que l'inclusion d'ensilage de maïs permet d'augmenter significativement la TP du lait. Aussi, lors d'expériences (DePeters et Cant, 1992; Zebeli et al., 2012) pendant lesquelles des régimes avec de hautes teneurs en amidon ont été servis aux vaches, la production laitière et la TP du lait ont augmenté. Les auteurs de ces études pensent qu'une plus grande production de PMi serait à l'origine de ces résultats. Aussi, il y a des facteurs comme la supplémentation avec du gras qui peuvent réduire la TP du lait (Cant et al., 1993). Chilliard (1993) a rapporté des réductions en la TP du lait de l'ordre de 0,3 à 1,0 g/kg lorsque des suppléments de gras étaient donnés à des vaches en milieu de lactation.

Pour sa part, une teneur élevée en urée du lait indique qu'une partie de la protéine brute de la ration n'a pas été utilisée pour la production (DePeters et Ferguson, 1992), donc, plus la ration est riche en protéines, plus la quantité d'urée dans le lait augmente (Lefebvre, 2003). Une augmentation d'une unité de pourcentage de la protéine de la ration peut causer un accroissement de 1,04 et 1,24 mg/dL d'urée dans le lait de vaches qui produisent respectivement 40 et 30 kg/jour de lait (Aguilar et al., 2012). De plus, une diminution de la protéine brute de la ration de 17,5 à 16,4 % peut diminuer l'urée du lait ainsi que la consommation d'azote sans nuire à la production et la TP du lait (Wattiaux et Karg, 2004). Une autre étude a pour sa part montré qu'une diminution de 19,4 à 15 % de la protéine brute entraîne une réduction en moyenne de 2,4 mg/dL de l'urée du lait (Olmos Colmenero et Broderick, 2006). En fait, l'urée du lait peut résulter de l'excès de la dégradation des protéines dans le rumen, du catabolisme des AA dans le foie et aussi de l'inefficacité globale de l'utilisation de l'azote (DePeters et Ferguson, 1992; Broderick et Clayton, 1997).

En plus de la nutrition protéique, d'autres facteurs alimentaires peuvent influencer l'urée du lait. Une augmentation des apports en glucides rapidement fermentescibles dans la ration peut avoir pour impact de diminuer l'urée du lait (Trevaskis et Fulkerson, 1999; Hristov et Ropp, 2003; Iqbal et al., 2012). Dans ce cas, l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'azote dans le rumen serait expliquée par une combinaison plus adéquate de l'énergie et de la protéine disponible dans le rumen. D'ailleurs, dans une étude réalisée avec des chèvres, la meilleure prédiction de la concentration d'urée dans le lait a été obtenue, parmi les nutriments de la ration, et avec une relation négative ($R^2 = 0,93$), en utilisant la teneur en GNS (Rapetti et al., 2014).

La substitution d'une quantité équivalente d'énergie sous forme de GNS par des lipides tend à augmenter l'urée du lait parce que la MG contenue dans les aliments n'apporte pas d'énergie aux bactéries du rumen (DePeters et Ferguson, 1992; Lefebvre, 2003). Weiss et Pinos-Rodriguez (2009) ont d'ailleurs rapporté une augmentation de 1,1 mg/dL d'urée dans le lait avec des rations supplémentées avec des lipides. Ils mentionnent que ce résultat

pourrait s'expliquer par une réduction de la quantité de matière organique fermentée dans le rumen, ce qui a un impact sur la capacité des microorganismes à capturer la PID pour produire la PMi.

Aussi, Kauffman et St-Pierre (2001) ont exploré l'impact de la NDF sur la teneur en urée du lait. Ils n'ont pas trouvé de lien entre des variations d'apport en NDF et l'urée du lait. En contrepartie, d'autres auteurs ont suggéré que la concentration d'urée dépend du type de fourrage (ensilage de maïs ou ensilage de graminées) dans la ration (Eicher et al., 1999; De Campeneere et al., 2006). Ces derniers seraient responsables du niveau moyen d'urée du lait d'un troupeau, tandis que les aliments concentrés seraient responsables des variations d'une journée à l'autre (Eicher et al., 1999; De Campeneere et al., 2006).

Les minéraux de la ration semblent aussi avoir un effet sur l'urée. En effet, des régimes avec de hauts niveaux de Na et de K, et qui amène une augmentation de la consommation d'eau et de la production d'urine, vont diminuer l'urée du lait (Spek et al., 2013a; Eriksson et Rustas, 2014). En fait, il est connu qu'une augmentation de la production d'urine favorise le rejet de l'urée de l'organisme ce qui entraîne une diminution de l'urée du lait (Spek et al., 2012).

Comme plusieurs facteurs nutritionnels influencent la concentration en urée dans le lait, elle peut être un outil pour surveiller l'efficacité de l'utilisation de la protéine de la ration (Tableau 2.5; DePeters et Cant, 1992).

Tableau 2.5 Variations des teneurs en urée et en protéines du lait selon différentes conditions nutritionnelles de la vache

Condition nutritionnelle	Teneur en urée du lait	Teneur en protéines du lait
Limitation d'énergie	++ ¹	--
Excès d'énergie	-	+
Limitation de protéine	--	~
Excès de protéine	+	~
Limitation de protéine et d'énergie	~	--
Excès de protéine et d'énergie	++	+
Limitation d'énergie et excès de protéine	++	--
Limitation de protéine et excès d'énergie	++	+

¹Abréviations : + = augmentation; - = diminution; ~ = variation de faible ampleur.

Adapté de DePeters et Cant, 1992

Les résultats variables pour l'urée amènent certains auteurs à suggérer que des valeurs cibles pour l'urée du lait peuvent être utilisées pour un troupeau, mais que ces valeurs doivent être modulées selon les caractéristiques de chacun de ces troupeaux (Aguilar et al., 2012). Ces auteurs suggèrent que des effets phénotypiques existent et que la composante génétique peut expliquer les écarts même entre vaches d'un même troupeau. Huhtanen et al. (2015), ont aussi confirmé des variations entre les vaches pour l'urée du lait et ils ont également suggéré d'utiliser des valeurs cibles de teneurs en urée du lait individuellement pour chaque troupeau.

2.5.3.3 *Efficienc e de l'utilisation de l'azote*

Comme mentionné précédemment, un suivi des concentrations en urée du lait est souvent considéré comme étant un moyen pour vérifier l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les vaches (Olmos Colmenero et Broderick, 2006). La production laitière peut être affectée par de nombreux facteurs liés à l'alimentation, dont l'énergie et la protéine sont les plus critiques (Brun-Lafleur et al., 2010). Un des défis actuellement importants pour l'alimentation des vaches est d'augmenter la conversion de la protéine alimentaire en protéines du lait de manière à réduire les rejets d'azote. En fait, les ruminants sont

relativement inefficaces dans l'utilisation de l'azote ingéré. Une manière de vérifier l'utilisation de l'azote par les vaches est de diviser la quantité d'azote excrété dans le lait par la quantité d'azote ingéré. Plus une vache est efficace, plus ce rapport sera élevé. Ainsi, environ 20 - 35 % de l'azote ingéré est sécrété sous forme de protéines dans le lait, et jusqu'à 50 % de l'azote consommé est excrété dans l'urine (Tamminga, 1992; Chase, 2004). D'ailleurs, en plus des problèmes environnementaux, l'excès de protéines brutes dans la ration peut nuire aux performances des animaux en réduisant, par exemple, la fertilité des vaches et leur production laitière (NRC, 2001). Ces dernières conséquences n'ont toutefois pas été observées dans toutes les études (Broderick, 2003; Nadeau et al., 2007). De plus, l'excès d'azote dans les rations implique des pertes économiques pour le producteur (Powell et al., 2010).

Il y a trois stratégies pour réduire la protéine alimentaire sans nuire aux performances : la première est d'alimenter pour augmenter la synthèse de PMi, ce qui implique la capture de l'azote recyclé dans le rumen (NRC, 2001); la deuxième consiste à bien équilibrer la PID et la PIND, pour combler les besoins en évitant les excès (Schwab et al., 2005), et la troisième est de balancer les rations pour les AA essentiels (Schwab et al., 2005). L'objectif final est de maximiser la croissance microbienne en ayant la bonne quantité de PID pour améliorer l'approvisionnement d'AA dans l'intestin grêle et diminuer les pertes d'azote (Bach et al., 2005).

Le principal facteur de la ration qui affecte l'efficacité d'utilisation de l'azote est la concentration de protéines brutes de la ration (Huhtanen et Hristov, 2009; Dijkstra et al., 2011; Gourley et al., 2012). Olmos Colmenero et Broderick (2006) ont montré qu'une augmentation de 16,5 à 19,4 % de la protéine brute de la ration a entraîné une diminution de l'efficacité de l'utilisation de l'azote de 5,4 unités de pourcentage, et que le niveau de 16,5 % de protéine brute était l'idéal pour maintenir la production avec des rejets minimaux d'azote. Ainsi, la quantité d'azote fourni aux vaches laitières a une forte incidence sur l'efficacité de

son utilisation et ses des proportions relatives de l'azote excrété dans les fèces et l'urine (Broderick, 2003; Wattiaux et Karg, 2004).

Finalement, un suivi des variations de teneurs en urée du lait est souvent considéré comme un moyen de vérifier l'efficacité de l'utilisation de l'azote (Nousiainen et al., 2004). Toutefois, selon l'étude de Nousiainen et al. (2004), la valeur en urée à viser pour maximiser l'efficacité d'utilisation de l'azote n'est pas la même que celle pour la production de protéines du lait. La Figure 2.8 illustre la relation quadratique entre l'urée du lait et la production de protéines du lait. Elle indique qu'une augmentation dans la production de protéines du lait peut être attendue au-delà des valeurs d'urée du lait de 11 mg/dL (Nousiainen et al., 2004). Toutefois l'efficacité de l'utilisation d'azote est plus faible à ces niveaux d'urée. Pour trouver un équilibre entre la production de la protéine du lait et la réduction de l'excrétion d'azote, le rapport urée : protéine du lait a été suggéré comme un indicateur de l'efficacité de l'utilisation de l'azote (Wattiaux et Crump, 2014). Ce concept mérite toutefois d'être validé avant son utilisation à plus grande échelle.

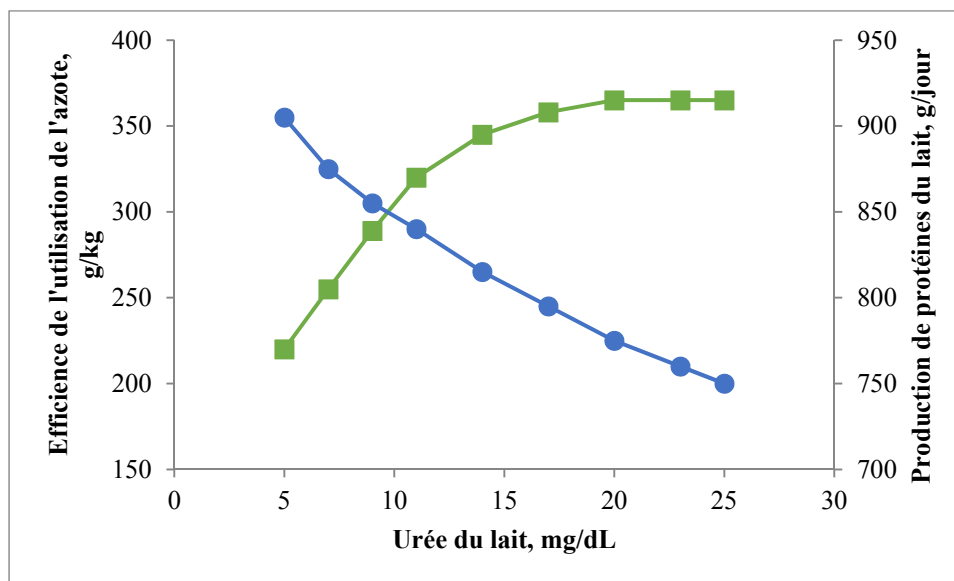


Figure 2.8 Associations entre la teneur en urée du lait et ■) l'efficacité de l'utilisation de l'azote alimentaire (N sécrété dans lait/N ingéré) et ●) la production de protéines du lait. Adaptée de Nousiainen et al., 2004

2.6 Hypothèses et objectif

Cette revue de littérature a souligné l'importance de l'alimentation pour moduler la composition du lait, sans pour autant nier l'importance d'autres facteurs qui peuvent aussi avoir un effet. Des études précédentes montrent que la DACA ou les minéraux peuvent être une alternative nutritionnelle pour moduler la TMG. Cependant, il manque d'études pour valider l'intérêt de ce concept pour moduler la TMG du lait. En ce qui a trait à l'aspect protéique de la composition du lait, malgré les études existantes sur l'urée, la grande variabilité des résultats empêche d'établir des valeurs de références fiables. De plus, il est important de considérer l'efficacité de l'utilisation de l'azote lorsque l'on travaille sur la composition protéique et l'urée du lait. Les données sur l'impact de différentes pratiques de gestion et d'alimentation sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote en conditions commerciales sont rares. L'objectif général de cette thèse a été donc d'établir des relations entre l'alimentation et la composition du lait ainsi que l'alimentation et l'efficacité de l'utilisation de l'azote, et ce, à partir d'analyse de données de fermes commerciales.

Trois projets distincts ont été réalisés dans le but de répondre à cet objectif. Les deux premiers ont été réalisés en analysant les informations contenues dans une base de données du contrôle laitier et le troisième a été fait à partir d'informations recueillies sur des fermes commerciales situées dans la province de Québec.

2.6.1 Premier projet

La génétique est un élément important pour la prédiction de la TMG du lait. De plus, différentes stratégies d'alimentation sont déjà bien connues pour faire varier la teneur en gras du lait sur les fermes laitières commerciales. Parmi elles, on peut mentionner le niveau de concentrés, la supplémentation avec des lipides et le type de distribution des aliments. Par contre, la modification de la DACA pour augmenter la TMG du lait est encore à valider dans un contexte de production commerciale. Ainsi, notre hypothèse était que les rations avec une

DACA plus haute résultent en une TMG plus élevée et ce, peu importe le stade de lactation. L'objectif de cette étude était donc de déterminer la relation entre la DACA et la TMG du lait, en utilisant la base de données du Centre d'expertise en production laitière Québec-Atlantique (Valacta) sur les troupeaux laitiers québécois.

2.6.2 Deuxième projet

Les expérimentations contrôlées montrent clairement une relation entre l'urée du lait et les facteurs nutritionnels comme la TP de la ration et les GNF. Dans ce contexte d'étude, il est aussi montré que des facteurs non nutritionnels ont un grand impact sur la teneur en urée du lait. Notre hypothèse était que les relations existantes entre l'urée du lait et les facteurs nutritionnels qui sont observés en expérimentations contrôlées peuvent être confirmées dans un contexte de production commerciale. Ainsi, l'objectif de ce projet était de déterminer les facteurs nutritionnels qui influencent les niveaux d'urée du lait en utilisant la base de données du Centre d'expertise en production laitière Québec-Atlantique (Valacta) sur les troupeaux laitiers québécois.

2.6.3 Troisième projet

L'efficacité de l'utilisation de l'azote est très variable en conditions commerciales parce que les fermes ont des stratégies de gestion et d'alimentation très différentes. Ainsi, dans cette étude les données de cent troupeaux laitiers du Québec ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques différenciant les fermes ayant une plus grande efficacité de l'utilisation de l'azote. Notre hypothèse était que certaines fermes sont en mesure d'obtenir une grande efficacité de l'utilisation de l'azote par la gestion de l'alimentation de leurs troupeaux, tout en maintenant de bonnes performances économiques. Ainsi, l'objectif de ce projet était de déterminer les caractéristiques des fermes selon leur efficacité d'utilisation de l'azote.

2.7 Bibliographie

- Aguilar, M., M. D. Hanigan, H. A. Tucker, B. L. Jones, S. K. Garbade, M. L. McGilliard, C. C. Stallings, K. F. Knowlton, et R. E. James. 2012. Cow and herd variation in milk urea nitrogen concentrations in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:7261-7268. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5582>.
- Ahima, R. S., et J. S. Flier. 2000. Leptin. *Annu. Rev. Physiol.* 62:413-437. doi:10.1146/annurev.physiol.62.1.413.
- Ahlborn-Breier, G., et W. D. Hohenboken. 1991. Additive and nonadditive genetic effects on milk production in dairy cattle: Evidence for major individual heterosis. *J. Dairy Sci.* 74:592-602. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78206-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78206-4).
- Åkerlind, M., K., Holtenius, J. Bertilsson, et M. Emanuelson. 1999. Milk composition and feed intake in dairy cows selected for high or low milk fat percentage. *Livest. Prod. Sci.* 59:1-11. 10.1016/s0301-6226(99)00034-2.
- Allen, M. S. 1997. Relationship between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber. *J. Dairy Sci.* 80:1447-1462. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76074-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76074-0).
- Allen, M. S. 2000. Effects of diet on short-term regulation of feed intake by lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 83:1598-1624. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75030-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75030-2).
- Apper-Bossard, E., J. L. Peyraud, P. Faverdin, et F. Meschy. 2006. Changing dietary cation-anion difference for dairy cows fed with two contrasting levels of concentrate in diets. *J. Dairy Sci.* 89:749-760. [http://dx.doi:10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72136-1](http://dx.doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72136-1).
- Apper-Bossard, E., J.-L. Peyraud, et J.-Y. Dourmad. 2009. Effet du bilan électrolytique de la ration sur l'équilibre acido-basique et les performances zootechniques des animaux domestiques à fort niveau de production. *INRA Prod. Anim.* 22 :1175-1130.
- Arunvipas, P., I. R. Dohoo, J. A. VanLeeuwen, et G. P. Keefe. 2003. The effect of non-nutritional factors on milk urea nitrogen levels in dairy cows in Prince Edward Island, Canada. *Prev. Vet. Med.* 59:83-93. [http://doi:10.1016/S0167-5877\(03\)00061-8](http://doi:10.1016/S0167-5877(03)00061-8).
- Bach, A., S. Calsamiglia, et M. D. Stern. 2005. Nitrogen metabolism in the rumen. *J. Dairy Sci.* 88 (E Suppl.):E9-E21. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73133-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73133-7).
- Barber, M. C., R. A. Clegg, M. T. Travers, et R. G. Vernon. 1997. Lipid metabolism in the lactating mammary gland. *Biochi. Biophys. Acta (BBA) – Lipids Lipid Met.* 1347:101-126. [http://dx.doi.org/10.1016/S0005-2760\(97\)00079-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0005-2760(97)00079-9).
- Bauman, D. E., et W. Bruce Currie. 1980. Partitioning of nutrients during pregnancy and lactation: A review of mechanisms involving homeostasis and homeorhesis. *J. Dairy Sci.* 63:1514-1529. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(80\)83111-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(80)83111-0).

- Bauman, D. E., P. J. Eppard, M. J. DeGeeter, et G. M. Lanza. 1985. Responses of high-producing dairy cows to long-term treatment with pituitary somatotropin and recombinant somatotropin. *J. Dairy Sci.* 68:1352-1362. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)80972-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)80972-3).
- Bauman, D. E., et J. M. Griinari. 2001. Regulation and nutritional manipulation of milk fat: Low-fat milk syndrome. *Livest. Prod. Sci.* 70:15-29. [http://dx.doi.org/10.1016/s0301-6226\(01\)00195-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0301-6226(01)00195-6).
- Bauman, D. E., et J. M. Griinari. 2003. Nutritional regulation of milk fat synthesis. *Annu. Rev. Nutr.* 23:203-227. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.nutr.23.011702.073408>.
- Bauman, D. E., K. J. Harvatine, et A. L. Lock. 2011a. Nutrigenomics, rumen-derived bioactive fatty acids, and the regulation of milk fat synthesis. *Annu. Rev. Nutr.* 31:299-319. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.nutr.012809.104648>.
- Bauman, D. E., M. A. McGuire, et K. J. Harvatine. 2011b. Mammary gland, milk biosynthesis and secretion: Milk fat. Pages 352-358 in *Encyclopedia of Dairy Sciences*, 2nd ed. J.W. Fuquay, P.F. Fox and L.H McSweeney, ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Bauman, D. E., C. Tyburczy, A. M. O'Donnell, et A. L. Lock. 2011c. Milk lipids: conjugated linoleic acid. Pages 660-664 in *Encyclopedia of Dairy Sciences*. 2nd ed. J.W. Fuquay, P.F. Fox and L.H McSweeney, ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Bauman, D. E., N. R. St-Pierre, G. A. Milliken, R. J. Collier, J. S. Hogan, J. K. Shearer, K. L. Smith, et W. W. Thatcher. 2015. An updated meta-analysis of bovine somatotropin: Effects on health and welfare of dairy cows. Pages 19-26 in *Proc. 24th Tri-State Dairy Nutri. Conf.* Fort Wayne, Indiana.
- Beauchemin, K. A., B. I. Farr, L. M. Rode, and G. B. Schaalje. 1994. Effects of alfalfa silage chop length and supplementary long hay on chewing and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77:1326-1339. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77072-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77072-7).
- Beauchemin, K. A., et L. M. Rode. 1997. Minimum versus optimum concentrations of fiber in dairy cow diets based on barley silage and concentrates of barley or corn. *J. Dairy Sci.* 80:1629-1639. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76094-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76094-6).
- Beauchemin, K. A., et W. Z. Yang. 2005. Effects of physically effective fiber on intake, chewing activity, and ruminal acidosis for dairy cows fed diets based on corn silage. *J. Dairy Sci.* 88:2117-2129. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72888-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72888-5).
- Beauchemin, K. A., W. Z. Yang, et G. Penner. 2006. Ruminal acidosis in dairy cows: Balancing effective fiber with starch availability. Pages 5-17 in *Proc. 41st An. Pac. Northwest Anim. Nutr. Conf.*, Vancouver, BC, Canada.
- Beever, D. E., J. D. Sutton, et C. K. Reynolds. 2001. Increasing the protein content of cow's milk. *Aust. J. Dairy Technol.* 56:138-149.

- Bernabucci, U., N. Lacetera, B. Ronchi, et A. Nardone. 2002. Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows. *Anim. Res.* 51:25-33. <http://dx.doi.org/10.1051/animres:2002006>.
- Bernabucci, U., L. Basiricò, P. Morera, D. Dipasquale, A. Vitali, F. Piccioli Cappelli, et L. Calamari. 2015. Effect of summer season on milk protein fractions in Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 98:1815-1827. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8788>.
- Bines, J. A., et I. C. Hart. 1982. Metabolic limits to milk production, especially roles of growth hormone and insulin. *J. Dairy Sci.* 65:1375-1389. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82358-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82358-8).
- Block, E. 1984. Manipulating dietary anions and cations for prepartum dairy cows to reduce incidence of milk fever. *J. Dairy Sci.* 67:2939-2948. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(84\)81657-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81657-4).
- Block, E. 1994. Manipulation of dietary cation-anion difference on nutritionally related production diseases, productivity, and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 77:1437-1450. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77082-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77082-X).
- Block, E., et W. K. Sanchez. 2000. Is it important to adjust the dietary cation-anion difference for lactating dairy cows. Pages 27-39 in *Proc. Tri-State Dairy Nutr. Conf.*, Ohio State Cooperative Extension Service, Columbus, OH.
- Block, S. S., W. R. Butler, R. A. Ehrhardt, A. W. Bell, M. E. Van Amburgh, et Y. R. Boisclair. 2001. Decreased concentration of plasma leptin in periparturient dairy cows is caused by negative energy balance. *J. Endocrinol.* 171:339-348. <http://dx.doi.org/10.1677/joe.0.1710339>.
- Block, S. S., R. P. Rhoads, D. E. Bauman, R. A. Ehrhardt, M. A. McGuire, B. A. Crooker, J. M. Griinari, T. R. Mackle, W. J. Weber, M. E. Van Amburgh, et Y. R. Boisclair. 2003. Demonstration of a role for insulin in the regulation of leptin in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:3508-3515. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73955-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73955-1).
- Bourbeau, A. 2010. La mise en marché du lait... ici pas comme ailleurs. Pages 1 – 34 in *Proc. 34^e Symposium sur les bovins laitiers*, Drummondville, Québec.
- Brito, A. F., et G. A. Broderick. 2006. Effect of varying dietary ratios of alfalfa silage to corn silage on production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:3924-3938. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72435-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72435-3).
- Broderick, G. A., et M. K. Clayton. 1997. A statistical evaluation of animal and nutritional factors influencing concentrations of milk urea nitrogen. *J. Dairy Sci.* 80:2964-2971. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76262-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76262-3).
- Broderick, G. A. 2003. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:1370-1381. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73721-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73721-7).

- Broderick, G. A., N. D. Luchini, S. M. Reynal, G. A. Varga, et V. A. Ishler. 2008. Effect on production of replacing dietary starch with sucrose in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 91:4801-4810. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1480>.
- Brun-Lafleur, L., L. Delaby, F. Husson, et P. Faverdin. 2010. Predicting energy \times protein interaction on milk yield and milk composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:4128-4143. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2669>.
- Bussink, D. W., et O. Oenema. 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: A review. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 51:19-33. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1009747109538>.
- Cabrita, A. R. J., R. J. Dewhurst, J. M. F. Abreu, et A. J. M. Fonseca. 2006. Evaluation of the effects of synchronizing the availability of N and energy on rumen function and production responses of dairy cows – a review. *Anim. Res.* 55:1-24. <http://dx.doi.org/10.1051/animres:2005045>.
- Caccamo, M., R. F. Veerkamp, J. D. Ferguson, R. Petriglieri, F. La Terra, et G. Licitra. 2010. Associations of breed and feeding management with milk production curves at herd level using a random regression test-day model. *J. Dairy Sci.* 93:4986-4995. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2835>.
- Calsamiglia, S., A. Ferret, C. K. Reynolds, N. B. Kristensen, et A. M. van Vuuren. 2010. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. *Animal* 4:1184-1196. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731110000911>.
- Calus, M. P. L., M. J. Carrick, R. F. Veerkamp, et M. E. Goddard. 2005. Estimation of genetic parameters for milk fat depression in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 88:1166-1177. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72783-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72783-1).
- Cant, J. P., E. J. DePeters, et R. L. Baldwin. 1993. Mammary uptake of energy metabolites in dairy cows fed fat to milk protein depression. *J. Dairy Sci.* 76:2254-2265. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77562-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77562-1).
- Cerbulis, J., et H. Farrell. 1975. Composition of milks of dairy cattle. I. Protein, lactose, and fat contents and distribution of protein fraction. *J. Dairy Sci.* 58:817-827. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(75\)84644-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(75)84644-3).
- Chamberlain, M. B., et E. J. DePeters. 2016. Impacts of feeding lipid supplements high in palmitic acid or stearic acid on performance of lactating dairy cows. *J. Appl. Anim. Res.* 1-10. <http://dx.doi.org/10.1080/09712119.2015.1124327>.
- Chan, P. S., J. W. West, J. K. Bernard, et J. M. Fernandez. 2005. Effects of dietary cation-anion difference on intake, milk yield, and blood components of the early lactation cow. *J. Dairy Sci.* 88:4384-4392. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73125-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73125-8).
- Charbonneau, E., D. Pellerin, et G. R. Oetzel. 2006. Impact of lowering dietary cation-anion difference in nonlactating dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 89:537-548. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72116-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72116-6).

- Charbonneau, E., R. Roy, D. Pellerin et D. Pellerin. 2011. Faire plus de revenu sans acheter de quota. in Proc 35^e Symposium sur les bovins laitiers, Drummondville, Québec.
- Chase, L.E. 2004. Estimated nitrogen excretion in 46 commercial dairy herds in New York. [En ligne] Disponible : <http://www.dairyn.cornell.edu/pages/40dairy/410utilization/416excretion.shtml>. (Page consultée le 13 mars 2014)
- Chatterjee, D., K. V. Subba. Reddy, et T. K. Ray. 1979. Lipid synthesis in lactating mammary gland. *Trends Biochem. Sci.* 4:278-280. [http://dx.doi.org/10.1016/0968-0004\(79\)90300-1](http://dx.doi.org/10.1016/0968-0004(79)90300-1).
- Chauhan, V. P. S., et J. F. Hayes. 1991. Genetic parameters for first lactation milk production and composition traits for Holsteins using multivariate restricted maximum likelihood. *J. Dairy Sci.* 74:603-610. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78207-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78207-6).
- Chibisa, G. E., P. Gorka, G. B. Penner, R. Berthiaume, et T. Mutsvangwa. 2015. Effects of partial replacement of dietary starch from barley or corn with lactose on ruminal function, short-chain fatty acid absorption, nitrogen utilization, and production performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:2627-2640. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8827>.
- Chilliard, Y. 1993. Dietary fat and adipose tissue metabolism in ruminants, pigs, and rodents: A review. *J. Dairy Sci.* 76:3897-3931. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77730-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77730-9).
- Chilliard, Y., A. Ferlay, et M. Doreau. 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.* 14:323-335.
- Chilliard, Y., C. Delavaud, et M. Bonnet. 2005. Leptin expression in ruminants: Nutritional and physiological regulations in relation with energy metabolism. *Domest. Anim. Endocrinol.* 29:3-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.domaniend.2005.02.026>.
- Cole, N. A., et R. W. Todd. 2008. Opportunities to enhance performance and efficiency through nutrient synchrony in concentrate-fed ruminants. *J. Anim. Sci.* 86. <http://dx.doi.10.2527/jas.2007-0444>.
- Commission Canadien du lait (CCL). 2011. Comité canadien de gestion des approvisionnements de lait (CCGAL). [En ligne] Disponible : <http://www.cdc-ccl.gc.ca/CDC/index-fra.php?id=3808>. (Page consultée le 8 mars 2014).
- Commission Canadien du lait (CCL). 2013. Rapport annuel 2012-2013. [En ligne] Disponible : http://www.cdc-ccl.gc.ca/CDC/userfiles/file/CDC_AR_2012-2013_FR.pdf (Page consultée le 8 août 2015).
- Coppock, C. E. 1977. Feeding methods and grouping systems. *J. Dairy Sci.* 60:1327-1336. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(77\)84030-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(77)84030-7).

- Coulon, J. B., Y. Chilliard, et B. Rémond. 1991. Effets du stade physiologique et de la saison sur la composition chimique du lait de vache et ses caractéristiques technologiques (aptitude à la coagulation, lipolyse). *INRA Prod. Anim.* 4:219-228.
- De Campeneere, S., D. L. De Brabander, et J. M. Vanacker. 2006. Milk urea concentration as affected by the roughage type offered to dairy cattle. *Livest. Sci.* 103:30-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2005.12.007>.
- de Vries, M. J., et R. F. Veerkamp. 2000. Energy balance of dairy cattle in relation to milk production variables and fertility. *J. Dairy Sci.* 83:62-69. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74856-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74856-9).
- Deckardt, K., A. Khol-Parisini, et Q. Zebeli. 2013. Peculiarities of enhancing resistant starch in ruminants using chemical methods: Opportunities and challenges. *Nutrients* 5:1970-1988. <http://dx.doi.org/10.3390/nu5061970>.
- Delaquis, A. M., et E. Block. 1995. Dietary cation-anion difference, acid-base status, mineral metabolism, renal function, and milk production of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 78:2259-2284. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76853-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76853-9).
- DePeters, E. J., et J. P. Cant. 1992. Nutritional factors influencing the nitrogen composition of bovine milk: A review. *J. Dairy Sci.* 75:2043-2070. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)77964-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77964-8).
- DePeters, E. J., et J. D. Ferguson. 1992. Nonprotein nitrogen and protein distribution in the milk of cows. *J. Dairy Sci.* 75:3192-3209. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)78085-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)78085-0).
- DeVries, T. J., K. A. Beauchemin, F. Dohme, et K. S. Schwartzkopf-Genswein. 2009. Repeated ruminal acidosis challenges in lactating dairy cows at high and low risk for developing acidosis: feeding, ruminating, and lying behavior. *J. Dairy Sci.* 92:5067-5078. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2102>.
- Dhiman, T. R., M. S. Zaman, I. S. MacQueen, et R. L. Boman. 2002. Influence of corn processing and frequency of feeding on cow performance. *J. Dairy Sci.* 85:217-226. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74070-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74070-8).
- Dijkstra, J., O. Oenema, et A. Bannink. 2011. Dietary strategies to reducing N excretion from cattle: Implications for methane emissions. *Curr. Opin. Env. Sust.* 3:414-422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2011.07.008>.
- Dijkstra, J., J. L. Ellis, E. Kebreab, A. B. Strathe, S. López, J. France, et A. Bannink. 2012. Ruminal pH regulation and nutritional consequences of low pH. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:22-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.12.005>.
- Eicher, R., E. Bouchard, et M. Bigras-Poulin. 1999. Factors affecting milk urea nitrogen and protein concentrations in Québec dairy cows. *Prev. Vet. Med.* 39:53-63. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-5877\(98\)00139-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-5877(98)00139-1).
- Ender, F., I. W. Dishington, et A. Helgebostad. 1971. Calcium balance studies in dairy cows under experimental induction and prevention of hypocalcaemic paresis puerperalis.

- The solution of aetiology and the prevention of milk fever by dietary means. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 28:233-256. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0396.1971.tb01573.x>.
- Enemark, J. M. D. 2008. The monitoring, prevention and treatment of sub-acute ruminal acidosis (SARA): A review. *Vet. J.* 176:32-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tvjl.2007.12.021>.
- Erdman, R. A., et M. Varner. 1995. Fixed yield responses to increased milking frequency. *J. Dairy Sci.* 78:1199-1203. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76738-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76738-8).
- Eriksson, T., et B. O. Rustas. 2014. Effects on milk urea concentration, urine output, and drinking water intake from incremental doses of potassium bicarbonate fed to mid-lactation dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:4471-4484. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7861>.
- Fédération des producteurs de lait du Québec (FPLQ). 2004. Sujet : Les surplus structurels Un problème qu'il faut avoir à œil. [En ligne] Disponible : <https://www.fplq.qc.ca/Bibliotheque/Brochure/SurplusStructurels.pdf> (Page consultée le 9 mai 2014).
- Fédération des producteurs de lait du Québec (FPLQ). 2014a. Sujet : Règlement sur le paiement du lait aux producteurs. [En ligne] Disponible : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/M_35_1/M35_1R203.HTM (Page consultée le 9 mai 2014).
- Fédération des producteurs de lait du Québec (FPLQ). 2014b. Sujet : Règlement sur les quotas des producteurs laitiers. [En ligne] Disponible : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=%2F%2FM_35_1%2FM35_1R208.htm (Page consultée le 9 mai 2014).
- Ferraretto, L. F., et R. D. Shaver. 2012. Meta-analysis: Effect of corn silage harvest practices on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *Prof. Anim. Sci.* 28:141-149. [http://dx.doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30334-X](http://dx.doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30334-X).
- Flint, D. J., et M. Gardner. 1994. Evidence that growth hormone stimulates milk synthesis by direct action on the mammary gland and that prolactin exerts effects on milk secretion by maintenance of mammary deoxyribonucleic acid content and tight junction status. *Endocrinology* 135:1119-1124. <http://dx.doi.org/10.1210/endo.135.3.8070355>.
- Forsbäck, L., H. Lindmark-Månsson, A. Andrén, M. Åkerstedt, L. Andrée, et K. Svennersten-Sjaunja. 2010. Day-to-day variation in milk yield and milk composition at the udder-quarter level. *J. Dairy Sci.* 93:3569-3577. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-3015>.
- Gaunt, N. S. 1973. Genetic and environmental changes possible in milk composition. *J. Dairy Sci.* 56:270-278. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(73\)85162-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(73)85162-8).

- Geerts, N. E., D. L. De Brabander, J. M. Vanacker, J. L. De Boever, et S. M. Botterman. 2004. Milk urea concentration as affected by complete diet feeding and protein balance in the rumen of dairy cattle. *Livest. Prod. Sci.* 85:263-273. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226\(03\)00126-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226(03)00126-X).
- Geishauser, T., K. Leslie, T. Duffield, et V. Edge. 1997. Fat/protein ratio in first DHI test milk as test for displaced abomasum in dairy cows. *Zentralbl Veterinarmed A.* 44:265-270. <http://dx.doi.10.1111/j.1439-0442.1997.tb01110.x>.
- Gibson, J. P. 1989. Altering milk composition through genetic selection. *J. Dairy Sci.* 72:2815-2825. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79427-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79427-3).
- Giuberti, G., A. Gallo, F. Masoero, L. F. Ferraretto, P. C. Hoffman et R. D. Shaver. 2014. Factors affecting starch utilization in large animal food production system: A review. *Starch - Stärke* 66:72-90. <http://dx.doi.org/10.1002/star.201300177>.
- Goddard, M. E., et B. J. Hayes. 2009. Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programs. *Nat. Rev. Genet.* 10:381-391. <http://doi.10.1038/nrg2575>.
- Godden, S. M., K. D. Lissemore, D. F. Kelton, K. E. Leslie, J. S. Walton, et J. H. Lumsden. 2001. Relationships between milk urea concentrations and nutritional management, production, and economic variables in Ontario dairy herds. *J. Dairy Sci.* 84:1128-1139. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74573-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74573-0).
- Goff, J. P., R. Ruiz, et R. L. Horst. 2004. Relative acidifying activity of anionic salts commonly used to prevent milk fever. *J. Dairy Sci.* 87:1245-1255. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73275-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73275-0).
- Gourley, C. J. P., S. R. Aarons, et J. M. Powell. 2012. Nitrogen use efficiency and manure management practices in contrasting dairy production systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147:73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.011>.
- Grant, R. J., V. F. Colenbrander, et D. R. Mertens. 1990. Milk fat depression in dairy cows: Role of particle size of alfalfa hay. *J. Dairy Sci.* 73:1823-1833. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(90\)78862-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(90)78862-5).
- Grinari, J. M., M. A. McGuire, D. A. Dwyer, D. E. Bauman, D. M. Barbano, et W. A. House. 1997. The role of insulin in the regulation of milk protein synthesis in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80:2361-2371. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76187-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76187-3).
- Gustafsson, A. H., et D. L. Palmquist. 1993. Diurnal variation of rumen ammonia, serum urea, and milk urea in dairy cows at high and low yields. *J. Dairy Sci.* 76:475-484. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77368-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77368-3).
- Hall, M. B. 2007. Methodological challenges in carbohydrate analyses. *R. Bras. Zootec.* 36:359-367. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982007001000032>.
- Hall, M. B., et G. B. Huntington. 2008. Nutrient synchrony: Sound in theory, elusive in practice. *J. Anim. Sci.* 86:E287-E292. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2007-0516>.

- Hansen, J. V., N. C. Friggens, et S. Højsgaard. 2006. The influence of breed and parity on milk yield, and milk yield acceleration curves. *Livest. Sci.* 104:53-62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2006.03.007>.
- Harrison, J., R. White, R. Kincaid, E. Block, T. Jenkins, et N. St-Pierre. 2012. Effectiveness of potassium carbonate sesquihydrate to increase dietary cation-anion difference in early lactation cows. *J. Dairy Sci.* 95:3919-3925. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4840>.
- Heck, J. M. L., H. J. F. van Valenberg, J. Dijkstra, et A. C. M. van Hooijdonk. 2009. Seasonal variation in the Dutch bovine raw milk composition. *J. Dairy Sci.* 92:4745-4755. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2146>.
- Heid, H. W., et T. W. Keenan. 2005. Intracellular origin and secretion of milk fat globules. *Eur. J. Cell Biol.* 84:245-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejcb.2004.12.002>.
- Heinrichs, J., C. Jones, et K. Bailey. 1997. Milk components: Understanding the causes and importance of milk fat and protein variation in your dairy herd. *Dairy Anim. Sci.* 5 :1-8.
- Heuer, C., Y. H. Schukken, et P. Dobbelaar. 1999. Postpartum body condition score and results from the first test day milk as predictors of disease, fertility, yield, and culling in commercial dairy herds. *J. Dairy Sci.* 82:295-304. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75236-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75236-7).
- Heuer, C., W. M. Van Straalen, Y. H. Schukken, A. Dirkwager, et J. P. T. M. Noordhuizen. 2000. Prediction of energy balance in a high yielding dairy herd in early lactation: Model development and precision. *Livest. Prod. Sci.* 65:91-105. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226\(99\)00177-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226(99)00177-3).
- Hoden, A., et J.-B. Coulon. 1991. Maîtrise de la composition du lait : Influence des facteurs nutritionnels sur la quantité et les taux de matières grasses et protéiques INRA *Prod. Anim.* 4:361-367.
- Horst, R. L., et J. P. Goff. 1997. Milk fever and dietary potassium. Pages 181-189 in *Proc. Cornell Nutr. Conf. Feed Manuf*, Rochester, NY.
- Hortet, P., et H. Seegers. 1998. Loss in milk yield and related composition changes resulting from clinical mastitis in dairy cows. *Prev. Vet. Med.* 37:1-20. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-5877\(98\)00104-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-5877(98)00104-4).
- Houben, E. H. P., A. A. Dijkhuizen, J. A. M. Van Arendonk, et R. B. M. Huirne. 1993. Short- and long-term production losses and repeatability of clinical mastitis in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 76:2561-2578. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77591-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77591-8).
- Hristov, A. N., et J. P. Jouany. 2005. Factors affecting efficiency of nitrogen utilization in the rumen. Pages 117-150 in *Nitrogen and phosphorus nutrition of cattle: Reducing the environmental impact of cattle operations*. A. N. Hristov and E. Pfeffer, eds. CABI Publishing, Cambridge, MA, USA.

- Hristov, A. N., et J. K. Ropp. 2003. Effect of dietary carbohydrate composition and availability on utilization of ruminal ammonia nitrogen for milk protein synthesis in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:2416-2427. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73836-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73836-3).
- Hu, W., et M. R. Murphy. 2004. Dietary cation-anion difference effects on performance and acid-base status of lactating dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 87:2222-2229. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70042-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70042-9).
- Hu, W., L. Kung, Jr, et M. R. Murphy. 2007a. Relationships between dry matter intake and acid–base status of lactating dairy cows as manipulated by dietary cation–anion difference. *Anim. Feed Sci. Technol.* 136:216-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.09.013>.
- Hu, W., M. R. Murphy, P. D. Constable, et E. Block. 2007b. Dietary cation-anion difference and dietary protein effects on performance and acid-base status of dairy cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 90:3355-3366. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-514>.
- Huhtanen, P., et A. N. Hristov. 2009. A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 92:3222-3232. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1352>.
- Huhtanen, P., E. H. Cabezas-Garcia, S. J. Krizsan, et K. J. Shingfield. 2015. Evaluation of between-cow variation in milk urea and rumen ammonia nitrogen concentrations and the association with nitrogen utilization and diet digestibility in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 98:3182-3196. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8215>.
- Huntington, G. B. 1997. Starch utilization by ruminants: From basics to the bunk. *J. Anim. Sci.* 75:852-867. <http://dx.doi.org/1997.753852x>.
- Iqbal, S., S. J. Terrill, Q. Zebeli, A. Mazzolari, S. M. Dunn, W. Z. Yang, et B. N. Ametaj. 2012. Treating barley grain with lactic acid and heat prevented sub-acute ruminal acidosis and increased milk fat content in dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:141-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.12.024>.
- Ishler, V. A. 2008. Interpretation of milk urea nitrogen (MUN) values. [En ligne] Disponible : <http://extension.psu.edu/animals/dairy/nutrient-management/certified-dairy/tools/interpretation-of-mun-values> (Page consultée le 20 juillet 2015).
- Iwaniuk, M. E., A. E. Weidman, et R. A. Erdman. 2015. The effect of dietary cation-anion difference concentration and cation source on milk production and feed efficiency in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:1950-1960. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8704>.
- Jasaitis, D. K., J. E. Wohlt, et J. L. Evans. 1987. Influence of feed ion content on buffering capacity of ruminant feedstuffs in vitro. *J. Dairy Sci.* 70:1391-1403. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(87\)80161-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(87)80161-3).

- Jenkins, T. C., et M. A. McGuire. 2006. Major advances in nutrition: Impact on milk composition. *J. Dairy Sci.* 89:1302-1310. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72198-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72198-1).
- Jenkins, T. C., W. C. Bridges, Jr., J. H. Harrison, et K. M. Young. 2014. Addition of potassium carbonate to continuous cultures of mixed ruminal bacteria shifts volatile fatty acids and daily production of biohydrogenation intermediates. *J. Dairy Sci.* 97:975-984. 10.3168/jds.2013-7164.
- Jenkins, T. C., et K. J. Harvatine. 2014. Lipid feeding and milk fat depression. *Vet. Clin. North Am. Food Anm. Pract.* 30:623-642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cvfa.2014.07.006>.
- Jenny, B. F., C. E. Polan, et F. W. Thye. 1974. Effects of high grain feeding and stage of lactation on serum insulin, glucose and milk fat percentage in lactating cows. *J. Nutr.* 104:379-385.
- Johnson, R. R. 1976. Influence of carbohydrate solubility on non-protein nitrogen utilization in the ruminant. *J. Anim. Sci.* 43 :184-191. <http://doi.10.2134/jas1976.431184x>.
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, et R. A. Erdman. 1998. Using milk urea nitrogen to predict nitrogen excretion and utilization efficiency in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 81:2681-2692. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75825-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75825-4).
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, et R. A. Erdman. 1999. Milk urea nitrogen target concentrations for lactating dairy cows fed according to National Research Council recommendations. *J. Dairy Sci.* 82:1261-1273. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75349-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75349-X).
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, et J. High. 2002a. Dairy herd management practices that impact nitrogen utilization efficiency. *J. Dairy Sci.* 85:1218-1226. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74185-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74185-4).
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, et J. High. 2002b. Use of milk urea nitrogen to improve dairy cow diets. *J. Dairy Sci.* 85:939-946. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74152-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74152-0).
- Kauffman, A. J., et N. R. St-Pierre. 2001. The relationship of milk urea nitrogen to urine nitrogen excretion in Holstein and Jersey cows. *J. Dairy Sci.* 84:2284-2294. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74675-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74675-9).
- Kehoe, S. I., B. M. Jayarao, et A. J. Heinrichs. 2007. A survey of bovine colostrum composition and colostrum management practices on Pennsylvania dairy farms. *J. Dairy Sci.* 90:4108-4116. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0040>.
- Kennelly, J. J., B. Robinson, et G. R. Khorasani. 1999. Influence of carbohydrate source and buffer on rumen fermentation characteristics, milk yield, and milk composition in early-lactation Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 82:2486-2496. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75500-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75500-1).

- Khorasani, G. R., et J. J. Kennelly. 2001. Influence of carbohydrate source and buffer on rumen fermentation characteristics, milk yield, and milk composition in late-lactation Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 84:1707-1716. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74606-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74606-1).
- Klei, L. R., J. M. Lynch, D. M. Barbano, P. A. Oltenacu, A. J. Lednor, et D. K. Bandler. 1997. Influence of milking three times a day on milk quality. *J. Dairy Sci.* 80:427-436. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)75954-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)75954-X).
- Knight, C. H., A. Sorensen, et D. D. Muir. 2000. Non-nutritional (novel) techniques for manipulation of milk composition. *BSAS Occasional Publication* 223-240.
- Kononoff, P. J., et A. J. Heinrichs. 2003a. The effect of corn silage particle size and cottonseed hulls on cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 86:2438-2451. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73838-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73838-7).
- Kononoff, P. J., et A. J. Heinrichs. 2003b. The effect of reducing alfalfa haylage particle size on cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 86:1445-1457. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73728-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73728-X).
- Kononoff, P. J., A. J. Heinrichs, et D. R. Buckmaster. 2003. Modification of the Penn State forage and total mixed ration particle separator and the effects of moisture content on its measurements. *J. Dairy Sci.* 86:1858-1863. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73773-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73773-4).
- Koprowski, J. A., et H. A. Tucker. 1973. Serum prolactin during various physiological states and its relationship to milk production in the bovine. *Endocrinology* 92:1480-1487. <http://dx.doi.org/10.1210/endo-92-5-1480>.
- Kotarski, S. F., R. D. Waniska, et K. K. Thurn. 1992. Starch hydrolysis by the ruminal microflora. *J. Nutr.* 122:178-190.
- Krause, K. M., et G. R. Oetzel. 2006. Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126:215-236. <http://doi.10.1016/j.anifeedsci.2005.08.004>.
- Lacasse, P., S. Ollier, V. Lollivier, et M. Boutinaud. 2016. New insights into the importance of prolactin in dairy ruminants. *J. Dairy Sci.* 99:864-874. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10035>.
- Lammers, B. P., D. R. Buckmaster, et A. J. Heinrichs. 1996. A simple method for the analysis of particle sizes of forage and total mixed rations. *J. Dairy Sci.* 79:922-928. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(96\)76442-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(96)76442-1).
- Lamoureux, R. 2003. L'organisation de la mise en marché de la production laitière. Pages 61-68 parue dans *Les Bovins Laitiers*. Collectif d'auteurs. CRAAQ, Québec, Qc, Canada.
- Le Maréchal, C., R. Thiéry, E. Vautor, et Y. Le Loir. 2011. Mastitis impact on technological properties of milk and quality of milk products-a review. *Dairy Sci. Technol.* 91:247-282. <http://dx.doi.org/10.1007/s13594-011-0009-6>.

- Lefebvre, D. 2003. L'urée du lait. Pages 1443-1462 parue dans Les Bovins Laitiers. Collectif d'auteurs. CRAAQ, Québec, Qc, Canada.
- Les Producteurs de Lait du Québec. 2016. Rapport annuel 2015. [En ligne] Disponible : <http://lait.org/fichiers/RapportAnnuel/rapportIndex.php?folder=FPLQ-2015>. (Page consultée le 24 juin 2016).
- Loften, J. R., J. G. Linn, J. K. Drackley, T. C. Jenkins, C. G. Soderholm, et A. F. Kertz. 2014. Invited review: Palmitic and stearic acid metabolism in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:4661-4674. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-7919>.
- Lollivier, V., J. Guinard-Flament, M. Ollivier-Bousquet, et P.-G. Marnet. 2002. Oxytocin and milk removal: Two important sources of variation in milk production and milk quality during and between milkings. *Reprod. Nutr. Dev.* 42:173-186. <http://dx.doi.org/10.1051/rnd:2002016>.
- Mäntysaari, P., H. Khalili, et J. Sariola. 2006. Effect of feeding frequency of a total mixed ration on the performance of high-yielding dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:4312-4320. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72478-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72478-X).
- Maxin, G., F. Glasser, C. Hurtaud, J. L. Peyraud, et H. Rulquin. 2011. Combined effects of trans-10,cis-12 conjugated linoleic acid, propionate, and acetate on milk fat yield and composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 94:2051-2059. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3844>.
- McClymont, G., et S. Vallance. 1962. Depression of blood glycerides and milk-fat synthesis by glucose infusion Pages xli-xlii in *Proc. Nutr. Soc.* (Abstr.). <http://dx.doi.org/10.1079/PNS19620036>.
- McGuire, M. A., J. M. Griinari, D. A. Dwyer, et D. E. Bauman. 1995. Role of insulin in the regulation of mammary synthesis of fat and protein. *J. Dairy Sci.* 78:816-824. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76693-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76693-0).
- Mertens, D. R. 1997. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80:1463-1481. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2).
- Meschy, F., D. Bravo, et D. Sauvart. 2004. Analyse quantitative des réponses des vaches laitières à l'apport de substances tampon. *INRA Prod. Anim.* 17 :11-18.
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2009. Portrait sommaire de l'industrie laitière québécoise [En ligne] Disponible : <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Pages/Details-Publication.aspx?docid=DDJ7DZ3RAA3J-202-429> (Page consultée le 10 août 2015).
- Mongin, P. 1981. Recent advances in dietary anion-cation balance: Applications in poultry. *Proc. Nutr. Soc.* 40:285-294. <http://dx.doi.org/10.1079/PNS19810045>.
- Murphy, J. J., et F. O'Mara. 1993. Proceedings of the joint E.A.A.P./A.S.A.S. Workshop nutritional manipulation of milk protein concentration and its impact on the dairy

- industry. *Livest. Prod. Sci.* 35:117-134. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226\(93\)90185-K](http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226(93)90185-K).
- Nadeau, E., J.-E. Englund, et A. H. Gustafsson. 2007. Nitrogen efficiency of dairy cows as affected by diet and milk yield. *Livest. Sci.* 111:45-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2006.11.016>.
- Nasrollahi, S. M., M. Imani, et Q. Zebeli. 2015. A meta-analysis and meta-regression of the effect of forage particle size, level, source, and preservation method on feed intake, nutrient digestibility, and performance in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:8926-8939. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-9681>.
- Neville, M. C., et M. F. Picciano. 1997. Regulation of milk lipid secretion and composition. *Annu. Rev. Nutr.* 17:159-184. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.nutr.17.1.159>.
- Nocek, J. E., R. L. Steele, et D. G. Braund. 1986. Performance of dairy cows fed forage and grain separately versus a total mixed ration. *J. Dairy Sci.* 69:2140-2147. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(86\)80646-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80646-4).
- Nocek, J. E., et J. B. Russell. 1988. Protein and energy as an integrated system. Relationship of ruminal protein and carbohydrate availability to microbial synthesis and milk production. *J. Dairy Sci.* 71:2070-2107. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79782-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79782-9).
- Nocek, J. E., et S. Tamminga. 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.* 74:3598-3629. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78552-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78552-4)
- Nousiainen, J., K. J. Shingfield, et P. Huhtanen. 2004. Evaluation of milk urea nitrogen as a diagnostic of protein feeding. *J. Dairy Sci.* 87:386-398. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73178-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73178-1).
- Nozière, P., I. Ortigues-Marty, C. Loncke, et D. Sauvant. 2010. Carbohydrate quantitative digestion and absorption in ruminants: from feed starch and fibre to nutrients available for tissues. *Animal* 4:1057-1074. <http://doi.10.1017/S1751731110000844>.
- National Research Council (NRC). 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Oba, M. 2011. Review: Effects of feeding sugars on productivity of lactating dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.* 91:37-46. <http://dx.doi.org/10.4141/CJAS10069>.
- Oetzel, G. R. 1991. Meta-analysis of nutritional risk factors for milk fever in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 74:3900-3912. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78583-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78583-4).
- Oetzel, G. R. 2007. Subacute ruminal acidosis in dairy herds: physiology, pathophysiology, milk fat responses, and nutritional management. Preconvention Seminar 7A. *Am. Assoc. Bovine Pract.* 40th Annu. Conf.
- Olmos Colmenero, J. J., et G. A. Broderick. 2006. Effect of dietary crude protein concentration on milk production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:1704-1712. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72238-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72238-X).

- Ørskov, E. R. 1986. Starch digestion and utilization in ruminants. *J. Anim. Sci.* 63:1624-1633. <http://doi.10.2134/jas1986.6351624x>.
- Owens, F. N., D. S. Secrist, W. J. Hill, et D. R. Gill. 1998. Acidosis in cattle: A review. *J. Anim. Sci.* 76:275-286. <http://dx.doi.org/1998.761275x>.
- Palmquist, D. L., A. Denise Beaulieu, et D. M. Barbano. 1993. Feed and animal factors influencing milk fat composition. *J. Dairy Sci.* 76:1753-1771. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77508-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77508-6).
- Palmquist, D. L. 2006. Milk fat: Origin of fatty acids and influence of nutritional factors thereon. Pages 43-92 in *Advanced Dairy Chemistry Volume 2 Lipids*. P. F. Fox et P. L. H. McSweeney, eds. Springer, NY.
- Patton, R. A., A. N. Hristov, et H. Lapierre. 2014. Protein feeding and balancing for amino acids in lactating dairy cattle. *Vet. Clin. North Am. Food Anm. Pract.* 30:599-621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cvfa.2014.07.005>.
- Penner, G. B., et M. Oba. 2009. Increasing dietary sugar concentration may improve dry matter intake, ruminal fermentation, and productivity of dairy cows in the postpartum phase of the transition period. *J. Dairy Sci.* 92:3341-3353. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1977>.
- Phipps, R. H., J. A. Bines, R. J. Fulford, et R. F. Weller. 1984. Complete diets for dairy cows: A comparison between complete diets and separate ingredients. *J. Agric. Sci.* 103:171-180. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859600043434>.
- Phuong, H. N., N. C. Friggens, I. J. M. de Boer, et P. Schmidely. 2013. Factors affecting energy and nitrogen efficiency of dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 96:7245-7259. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6977>.
- Piantoni, P., A. L. Lock, et M. S. Allen. 2013. Palmitic acid increased yields of milk and milk fat and nutrient digestibility across production level of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 96:7143-7154. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6680>.
- Plaut, K., D. E. Bauman, N. Agergaard, et R. M. Akers. 1987. Effect of exogenous prolactin administration on lactational performance of dairy cows. *Domest. Anim. Endocrinol.* 4:279-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0739-7240\(87\)90024-5](http://dx.doi.org/10.1016/0739-7240(87)90024-5).
- Powell, J. M., C. J. P. Gourley, C. A. Rotz, et D. M. Weaver. 2010. Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environ. Sci. Policy.* 13:217-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2010.03.007>.
- Quist, M. A., S. J. LeBlanc, K. J. Hand, D. Lazenby, F. Miglior, et D. F. Kelton. 2008. Milking-to-milking variability for milk yield, fat and protein percentage, and somatic cell count. *J. Dairy Sci.* 91:3412-3423. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2007-0184>.
- Rabiee, A. R., K. Breinhild, W. Scott, H. M. Golder, E. Block, et I. J. Lean. 2012. Effect of fat additions to diets of dairy cattle on milk production and components: A meta-analysis and meta-regression. *J. Dairy Sci.* 95:3225-3247. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4895>.

- Radcliff, R. P., M. J. Vandehaar, L. T. Chapin, T. E. Pilbeam, D. K. Beede, E. P. Stanisiewski, et H. A. Tucker. 2000. Effects of diet and injection of bovine somatotropin on prepubertal growth and first-lactation milk yields of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 83:23-29. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74850-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74850-8).
- Rajala-Schultz, P. J., et W. J. A. Saville. 2003. Sources of variation in milk urea nitrogen in Ohio dairy herds. *J. Dairy Sci.* 86:1653-1661. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73751-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73751-5).
- Rapetti, L., S. Colombini, G. Galassi, G. M. Crovetto, et L. Malagutti. 2014. Relationship between milk urea level, protein feeding and urinary nitrogen excretion in high producing dairy goats. *Small Rumin. Res.* 121:96-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.smallrumres.2014.04.006>.
- Renaudeau, D., A. Collin, S. Yahav, V. de Basilio, J. L. Gourdine, et R. J. Collier. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal.* 6:707-728. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731111002448>.
- Reynolds, C. K. 2006. Production and metabolic effects of site of starch digestion in dairy cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 130:78-94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.01.019>.
- Reynolds, C. K., et N. B. Kristensen. 2008. Nitrogen recycling through the gut and the nitrogen economy of ruminants: An asynchronous symbiosis. *J. Anim. Sci.* 86:E293-E305. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2007-0475>.
- Rico, D. E., Y. Ying, et K. J. Harvatine. 2014a. Comparison of enriched palmitic acid and calcium salts of palm fatty acids distillate fat supplements on milk production and metabolic profiles of high-producing dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:5637-5644. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7723>.
- Rico, D. E., Y. Ying, et K. J. Harvatine. 2014b. Effect of a high-palmitic acid fat supplement on milk production and apparent total-tract digestibility in high- and low-milk yield dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:3739-3751. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7341>.
- Rico, J. E., M. S. Allen, et A. L. Lock. 2014c. Compared with stearic acid, palmitic acid increased the yield of milk fat and improved feed efficiency across production level of cows. *J. Dairy Sci.* 97:1057-1066. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7432>.
- Roche, J. R., S. Petch, et J. K. Kay. 2005. Manipulating the dietary cation-anion difference via drenching to early-lactation dairy cows grazing pasture. *J. Dairy Sci.* 88:264-276. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72684-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72684-9).
- Rode, L. 2006. Formulating dairy cow diets for milk composition. in *Proc. 41st Pacific Northwest Anim. Nutr. Conf. Vancouver, BC, Canada.*
- Rodriguez, L. A., G. Mekonnen, C. J. Wilcox, F. G. Martin, et W. A. Krienke. 1985. Effects of relative humidity, maximum and minimum temperature, pregnancy, and stage of lactation on milk composition and yield. *J. Dairy Sci.* 68:973-978. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(85\)80917-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(85)80917-6).

- Rulquin, H., C. Hurtaud, S. Lemosquet, et J-L. Peyraud. 2007. Effet des nutriments énergétiques sur la production et la teneur en matière grasse du lait de vache. *INRA Prod. Anim.* 20:163-176.
- Russell, J. B., et D. B. Wilson. 1996. Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH? *J. Dairy Sci.* 79:1503-1509. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(96\)76510-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(96)76510-4).
- Rustomo, B., J. P. Cant, M. P. Fan, T. F. Duffield, N. E. Odongo, et B. W. McBride. 2006. Acidogenic value of feeds. I. The relationship between the acidogenic value of feeds and in vitro ruminal pH changes. *Can. J. Anim. Sci.* 86:109-117. <http://dx.doi.org/10.4141/A04-074>.
- Samuelsson, B., M. Emanuelson, G. Olsson, K. Uvnäs-Moberg, et K. Svennersten-Sjaunja. 1998. Hormonal profiles, rumen volatile fatty acids and milk *trans*-C18:1 fatty acids in relation to milk fat content in restricted or ad libitum fed dairy cows. *Acta Agric. Scand. A – Anim. Sci.* 48:76-85. <http://dx.doi.org/10.1080/09064709809362406>.
- Sauvant, D., P. Chapoutot, et H. Archimède. 1994. La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *INRA Prod. Anim.* 7 :115-124.
- Sauvant, D., et J. Van Milgen. 1995. Les conséquences de la dynamique de la digestion des aliments sur le métabolisme ruminal et les performances animales. *INRA Prod. Anim.* 8 :353-367.
- Sauvant, D., et J.-L. Peyraud. 2010. Calculs de ration et évaluation du risque d'acidose. *INRA Prod. Anim.* 23 :333-342.
- Schepers, A. J., et R. G. M. Meijer. 1998. Evaluation of the utilization of dietary nitrogen by dairy cows based on urea concentration in milk. *J. Dairy Sci.* 81:579-584. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75611-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75611-5).
- Schutz, M. M., L. B. Hansen, G. R. Steuernagel, et A. L. Kuck. 1990. Variation of milk, fat, protein, and somatic cells for dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 73:484-493. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(90\)78696-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(90)78696-1).
- Schwab, C. G., P. Huhtanen, C. G. Hunt, et T. Hvelplund. 2005. Nitrogen requirements for cattle. Pages 14-60 in *Nitrogen and phosphorus nutrition of cattle: Reducing the environmental impact of cattle operations*. A. N. Hristov and E. Pfeffer, eds. CABI Publishing, Cambridge, MA.
- Seegers, H., C. Fourichon, et F. Beaudeau. 2003. Production effects related to mastitis and mastitis economics in dairy cattle herds. *Vet. Res.* 34:475-491. <http://dx.doi.org/10.1051/vetres:2003027>.
- Shabi, Z., I. Bruckental, S. Zamwell, H. Tagari, et A. Arieli. 1999. Effects of extrusion of grain and feeding frequency on rumen fermentation, nutrient digestibility, and milk yield and composition in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82:1252-1260. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(99\)75348-8](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(99)75348-8).

- Shire, J. A., et D. K. Beede. 2013. Influence of DCAD on lactational performance: A review of some practical considerations. Pages 91-98 in Proc. Penn State Dairy Cattle Nutrition Workshop. Grantville, PA.
- Spek, J. W., A. Bannink, G. Gort, W. H. Hendriks, and J. Dijkstra. 2012. Effect of sodium chloride intake on urine volume, urinary urea excretion, and milk urea concentration in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:7288-7298. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5688>.
- Spek, J. W., J. Dijkstra, G. Van Duinkerken, et A. Bannink. 2013a. A review of factors influencing milk urea concentration and its relationship with urinary urea excretion in lactating dairy cattle. *J. Agr. Sci.* 151:407-423. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859612000561>.
- Spek, J. W., J. Dijkstra, G. van Duinkerken, W. H. Hendriks, et A. Bannink. 2013b. Prediction of urinary nitrogen and urinary urea nitrogen excretion by lactating dairy cattle in northwestern Europe and North America: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 96:4310-4322. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-6265>.
- Stoop, W. M., H. Bovenhuis, et J. A. M. van Arendonk. 2007. Genetic parameters for milk urea nitrogen in relation to milk production traits. *J. Dairy Sci.* 90:1981-1986. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-434>.
- Sutton, J. D. 1989. Altering milk composition by feeding. *J. Dairy Sci.* 72:2801-2814. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(89\)79426-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(89)79426-1).
- Sutton, J. D., et S. V. Morant. 1989. A review of the potential of nutrition to modify milk fat and protein. *Livest. Prod. Sci.* 23:219-237. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226\(89\)90073-0](http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226(89)90073-0).
- Sutton, J. D., M. S. Dhanoa, S. V. Morant, J. France, D. J. Napper et E. Schuller. 2003. Rates of production of acetate, propionate, and butyrate in the rumen of lactating dairy cows given normal and low-roughage diets. *J. Dairy Sci.* 86:3620-3633. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73968-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73968-X).
- Svennersten-Sjaunja, K., et K. Olsson. 2005. Endocrinology of milk production. *Domest. Anim. Endocrinol.* 29:241-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.domaniend.2005.03.006>.
- Symonds, H. W., D. L. Mather, et K. A. Collis. 1981. The maximum capacity of the liver of the adult dairy cow to metabolize ammonia. *Br. J. Nutri.* 46:481-486. <http://dx.doi.org/10.1079/BJN19810056>.
- Syrstad, O. 1977. Day-to-day variation in milk yield, fat content and protein content. *Livest. Prod. Sci.* 4:141-151. [http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226\(77\)90031-8](http://dx.doi.org/10.1016/0301-6226(77)90031-8).
- Tamminga, S. 1992. Nutrition management of dairy cows as a contribution to pollution control. *J. Dairy Sci.* 75:345-357. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)77770-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)77770-4).
- Trevaskis, L. M., et W. J. Fulkerson. 1999. The relationship between various animal and management factors and milk urea, and its association with reproductive performance

- of dairy cows grazing pasture. *Livest. Prod. Sci.* 57:255-265. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226\(98\)00174-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00174-2).
- Tucker, H. A. 2000. Hormones, mammary growth, and lactation: A 41-year perspective. *J. Dairy Sci.* 83:874-884. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)74951-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)74951-4).
- Varga, G. A., et V. A. Ishler. 2007. Managing nutrition for optimal milk components. Pages 1-14 in *Proc. Western Dairy Manag. Conf. Reno, NV*.
- Vernon, R. G. 1980. Lipid metabolism in the adipose tissue of ruminant animals. *Prog. Lipid Res.* 19:23-106. [http://dx.doi.org/10.1016/0163-7827\(80\)90007-7](http://dx.doi.org/10.1016/0163-7827(80)90007-7).
- Vernon, R. G., et D. J. Flint. 1984. Adipose tissue: Metabolic adaptation during lactation. Pages 119-145 in *Physiological Strategies in Lactation*. (Symposia of the Zoological Society of London). Vol. 51. M. Peaker, R. G. Vernon, et C. H. Knight, eds. Academic Press, London. UK.
- Walker, G. P., F. R. Dunshea, et P. T. Doyle. 2004. Effects of nutrition and management on the production and composition of milk fat and protein: A review. *Aust. J. Agric. Res.* 55:1009-1028. <http://dx.doi.org/10.1071/AR03173>.
- Warntjes, J. L., P. H. Robinson, E. Galo, E. J. DePeters, et D. Howes. 2008. Effects of feeding supplemental palmitic acid (C16:0) on performance and milk fatty acid profile of lactating dairy cows under summer heat. *Anim. Feed Sci. Technol.* 140:241-257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.03.004>.
- Wattiaux, M. A., et K. L. Karg. 2004. Protein level for alfalfa and corn silage-based diets: II. Nitrogen balance and manure characteristics. *J. Dairy Sci.* 87:3492-3502. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73484-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73484-0).
- Wattiaux, M. A., E. V. Nordheim, et P. Crump. 2005. Statistical evaluation of factors and interactions affecting dairy herd improvement milk urea nitrogen in commercial Midwest dairy herds. *J. Dairy Sci.* 88:3020-3035. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72982-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72982-9).
- Wattiaux, M. A., et P. M. Crump. 2014. Exploring milk urea-N excretion as a nutritional and environmental management tool for the dairy industry. *J. Anim. Sci.* 92 (E-Suppl. 2)/*J. Dairy Sci.* 97(E-Suppl. 1):350. (Abstr.)
- Weiss, W. P., et J. M. Pinos-Rodríguez. 2009. Production responses of dairy cows when fed supplemental fat in low- and high-forage diets. *J. Dairy Sci.* 92:6144-6155. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2009-2558>.
- West, J. W., K. D. Haydon, B. G. Mullinix, et T. G. Sandifer. 1992. Dietary cation-anion balance and cation source effects on production and acid-base status of heat-stressed cows. *J. Dairy Sci.* 75:2776-2786. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)78041-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)78041-2).
- West, J. W. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86:2131-2144. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X).

- Wildman, C. D., J. W. West, et J. K. Bernard. 2007a. Effects of dietary cation-anion difference and potassium to sodium ratio on lactating dairy cows in hot weather. *J. Dairy Sci.* 90:970-977. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(07\)71581-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)71581-3).
- Wildman, C. D., J. W. West, et J. K. Bernard. 2007b. Effect of dietary cation-anion difference and dietary crude protein on milk yield, acid-base chemistry, and rumen fermentation. *J. Dairy Sci.* 90:4693-4700. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-497>.
- Wood, G. M., P. J. Boettcher, J. Jamrozik, G. B. Jansen, et D. F. Kelton. 2003. Estimation of genetic parameters for concentrations of milk urea nitrogen. *J. Dairy Sci.* 86:2462-2469. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73840-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73840-5).
- Yang, W. Z., K. A. Beauchemin, et L. M. Rode. 2001. Effects of grain processing, forage to concentrate ratio, and forage particle size on rumen pH and digestion by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84:2203-2216. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74667-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74667-X).
- Yang, W. Z., et K. A. Beauchemin. 2005. Effects of physically effective fiber on digestion and milk production by dairy cows fed diets based on corn silage. *J. Dairy Sci.* 88:1090-1098. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72776-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72776-4).
- Yang, W. Z., et K. A. Beauchemin. 2006. Increasing the physically effective fiber content of dairy cow diets may lower efficiency of feed use. *J. Dairy Sci.* 89:2694-2704. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72345-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72345-1).
- Yrjänen, S., K. Kaustell, R. Kangasniemi, J. Sariola, et H. Khalili. 2003. Effects of concentrate feeding strategy on the performance of dairy cows housed in a free-stall barn. *Livest. Prod. Sci.* 81:173-181. [http://doi.10.1016/S0301-6226\(02\)00276-2](http://doi.10.1016/S0301-6226(02)00276-2).
- Zebeli, Q., J. R. Aschenbach, M. Tafaj, J. Boguhn, B. N. Ametaj, et W. Drochner. 2012. Invited review: Role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:1041-1056. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2011-4421>.

Chapitre III

3 Relationship between milk fat concentration and diet composition with a special emphasis on dietary cation-anion difference in commercial dairy herds

Ce chapitre sera soumis pour publication dans la revue Canadian Journal of Animal Science

3.1 Résumé

L'objectif de cette étude était de déterminer dans quelle mesure les changements dans la composition de la ration comprenant la DACA, la supplémentation lipidique, ainsi que le système d'alimentation peuvent prédire la TMG du lait. La prédiction de la TMG du lait a été possible pour le pic ($R^2 = 0,38$ et $0,32$), le milieu ($R^2 = 0,55$ et $0,42$) et la fin ($R^2 = 0,66$ et $0,46$) de lactation en hiver et en été, respectivement. Cependant, le modèle n'a pas pu prédire la TMG du lait au début de la lactation pendant ces mêmes saisons. L'augmentation de la DACA avait généralement un impact positif sur la TMG du lait. Plusieurs interactions entre les variables ont également été trouvées dans la présente étude. Ces dernières révèlent l'importance de considérer le contexte particulier de chaque ferme lors de la formulation de rations pour les vaches en lactation.

Mots clé : matière grasse du lait, différence alimentaire cation-anion, vaches en lactation

3.2 Abstract

The farm-gate price of milk in Canada is based on composition, which provides incentive for producers to increase milk fat concentration (**MFC**). Numerous factors are known to influence MFC, and results from recent studies suggest that dietary cation-anion difference (**DCAD**) should be included as one of them. The objective of this study was to determine the extent to which changes in diet composition, including DCAD, and fat supplementation as well as feeding system can predict MFC. Data recorded by Valacta (Dairy Production Centre of Expertise, Québec and Atlantic Provinces, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada) for the years 2009 to 2011 were used and originally comprised 3,481,705 test-day records (275,758 cows in 3,140 herds). Data used for the regression analysis were restricted to those from Holstein cows, between 1 and 305 days in milk (**DIM**), during winter (January-February) and summer (July-August) months. Lactations were divided into early (1 to 50 DIM), peak (51 to 100 DIM), mid (101 to 200 DIM) and late lactation (201 to 305 DIM). Variables tested included DCAD, proportion of concentrate (**CONC**) in the diet, and addition of fat supplements having more than 80 % of palmitic acid (**PALM80**), as well as feeding total mixed ration (**TMR**) compared with separate feed components, and the estimated breeding value for MFC (**EBV MFC**). The impact of grazing was assessed in the summer. All first order interactions with biological relevance were also included. Variables selected by the models were different for each stage of lactation and season. Prediction of MFC was achievable for peak ($R^2 = 0.38$ and 0.32), mid ($R^2 = 0.55$ and 0.42), and late ($R^2 = 0.66$ and 0.46) lactation in winter and summer seasons, respectively. However, the model did not accurately predict MFC in early lactation during winter ($R^2 = 0.08$), and summer ($R^2 = 0.06$). Despite the numerous interactions found, offering feed as TMR, increasing DCAD and feeding PALM80 had generally a positive impact on MFC. On the contrary, increasing CONC had a negative effect on MFC in mid lactation during winter, as well as at the 3 stages of lactation tested during summer. This negative effect of CONC was attenuated by feeding TMR. During summer, grazing had a negative effect on MFC in mid and late lactation. Several interactions between variables were found when trying to predict MFC in the current

study; hence a particular attention should be paid to those interactions while formulating diets for lactating dairy cows.

Keywords: milk fat concentration, dietary cation-anion difference, lactating dairy cow

3.3 Introduction

Farm-gate milk price in Canada is based on milk composition; therefore the incentive for producers to increase milk fat concentration (**MFC**) prevails. Milk fat is the most sensitive component to dietary manipulations, which can be altered by up to 3 percentage units in dairy cows (Sutton, 1989). Furthermore, milk composition can be an indicator of the nutritional and metabolic status of the cow (Hamann and Krömker, 1997), where MFC is usually an indicator of ruminal conditions and dietary fiber adequacy (Zebeli et al., 2010). Dietary factors such as low fiber content, high amounts of concentrate (**CONC**), and fat supplementation can alter rumen fermentation. Such disturbance in rumen functions may lead to a shift in biohydrogenation pathways leading to the production of fatty acid intermediates known to inhibit fat synthesis, thus reducing MFC (Bauman and Griinari, 2003; Bauman et al., 2006). On the contrary, feeding fat supplements rich in palmitic acid has been shown to increase milk yield and MFC (Loften et al., 2014).

Minerals with buffer capacity are added to diets as a way to reduce digestive problems, and thus maintain MFC (NRC, 2001). Studies have shown that dietary cation-anion difference (**DCAD**) can also have a direct impact on the acid-base status of the cow, thus affecting its performance (Hu and Murphy, 2004; Roche et al., 2005; Wildman et al., 2007b). Roche et al. (2005) found a linear increase in MFC and yield with increasing DCAD for cows in early lactation. Wildman et al. (2007b) also reported higher milk fat and protein concentrations when increasing DCAD from 25 to 50 mEq/100 g of dry matter (**DM**). However, other studies reported no effect of DCAD on MFC in early lactation (Chan et al., 2005), or at all stages of lactation (Delaquis and Block, 1995).

The impact of non-dietary factors, such as feeding system, on milk yield and composition has also been studied. Bargo et al. (2002) compared 3 different feeding systems and found that cows fed total mixed ration (**TMR**) had higher milk production and MFC than cows fed pasture only, or pasture with a partial TMR. However, Yrjänä et al. (2003) and

Nocek et al. (1986) found no differences in milk yield and MFC when feeding TMR as compared with separate feed components.

It is also known that genetic merit has an impact on milk yield and composition (Schutz et al., 1990). Fat concentration, having a good heritability (Schutz et al., 1990), has been included in many breeding programs. One index used to evaluate the animal genetic potential is the estimated breeding value for MFC (**EBV MFC**), which is defined as an appraisal of the additive genetic merit for this particular trait that a cow will pass on to its descendants (Goddard and Hayes, 2009).

To our knowledge, no studies have evaluated the impact of feeding strategies and diet composition on MFC under commercial conditions. Furthermore, the interest of considering DCAD as a factor affecting MFC needs to be verified in practical situations. Therefore, the objective of this study was to develop models aiming at predicting MFC using a database of dairy herds from Québec and Atlantic Provinces of eastern Canada. We hypothesized that EBV MFC is an important component of these models, and that specific feeding strategies available to commercial farms constituting this database, such as modifying the mode of feed distribution, adjusting the level of CONC and DCAD, or feeding fat supplementation rich in palmitic acid will have a significant impact on MFC. While developing such models, it was possible to identify potential interaction between factors affecting MFC.

3.4 Materials and methods

3.4.1 Data

The database from Valacta (Dairy Production Centre of Expertise, Québec and Atlantic Provinces, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada) for the years 2009 to 2011 was used. Data available included production and genetic records, as well as the inventory of feedstuffs used in the diets, along with their chemical composition. The quantities and DM

content of each feed offered to individual cow at specific test-day (**TD**) were also reported. Missing data for nutrient composition of feeds were filled when the feedstuff description name was clear and complete, by using the median of this ingredient in our database. When data for ingredients composing the diet were not available for a TD, the ingredient composition of the diet from the closest TD was used, as done previously by Caccamo et al. (2012). Based on the information in the database, diet composition for each cow at each TD was calculated according to the quantity served and the chemical composition of feedstuffs using the SQL procedure of SAS (SAS Institute, 2011).

The database initially contained 3,481,705 TD records (275,758 cows in 3,140 herds) and 230,286 feedstuffs. To exclude outliers of the final diets and production records, data were restricted to those within three standard deviations of the mean, as done previously by de Vries and Veerkamp (2000). In addition, only TD without missing data for MFC, EBV MFC, feeding system and the diet components tested were kept for the analysis.

Lactation length was restricted to 305 days in milk (**DIM**) and was divided into early (1 to 50 DIM), peak (51 to 100 DIM), mid (101 to 200 DIM), and late lactation (201 to 305 DIM). Two seasons were evaluated: winter (January and February) and summer (July and August). Representative months for each season were selected using the REG procedure of SAS, where MFC was used as the dependent variable, and MONTHS of the year were included in the class statement. As no significant differences were found between January and February for winter, and between July and August for summer, data for these months were grouped to represent each season.

Finally, only records for Holstein cows were retained for the analysis. After these restrictions, 409,608 TD records (172,098 cows in 2,904 herds) for winter, and 330,163 TD records (141,573 cows in 2,142 herds) for summer were available for the analysis.

3.4.2 Statistical analysis

A descriptive data analysis of the ration nutrient composition was first completed with the GPLOT procedure of SAS using the smoothing lines method. This operation included dietary concentrations of acid detergent fiber, neutral detergent fiber (NDF), NDF from forage, non fiber carbohydrates, ether extract, crude protein, and DCAD, as well as the proportion of CONC, on a DM basis. The descriptive analysis also included a series of binary variables including the addition or not of fat supplements with more than 80% of palmitic acid (**PALM80**) and dietary buffers, the feeding system (separate feed components or TMR), and the access or not to grazing. This analysis allowed for a better understanding of the relationships between variables. Correlations between these variables were calculated following the CORR procedure of SAS, and variables were tested for collinearity with the variance inflation factor using the REG procedure of SAS. Thereafter, only variables with the higher correlations and without collinearity were kept for the multiple regressions analyses that were carried out with the HPMIXED procedure of SAS.

After completing this procedure, diet component variables proposed to the model were: DCAD (mEq/100 g DM), proportion of CONC (% of DM), addition of PALM80 and use of TMR. In addition, the effect of grazing was tested in the summer models. The PALM80, TMR and grazing were included in the model as binary variables. The EBV MFC was also included as a potential variable to isolate the impact of genetics. The variable YEAR was suggested to the models. All first order interactions with biological relevance were included in the model.

Variables HERD and COW were included in the class statement. In addition, the variables HERD, and COW within HERD were included as random effects. A backwards elimination was carried out until all the independent variables, or interactions between variables, in the model were significant ($P \leq 0.05$). Root mean square error, coefficient of determination, Bayesian information criteria, and Akaike information criterion were

calculated and used to evaluate the prediction accuracy of the models. In addition, the residuals (observed-predicted) were regressed against the centered predicted values, and the intercept and the slope were used to assess the mean and linear bias, respectively (St-Pierre, 2003).

The DCAD was calculated for each ration taking into account the proportion and mineral composition of feed ingredients. The following equations were used for its calculation: $(Na + K) - (Cl + S)$ (Ender et al., 1971; NRC, 2001), $(Na + K) - (Cl + 0.6 S)$ (Goff et al., 2004) and $(Na + K - Cl)$ (Mongin, 1981), and were tested in the model.

3.5 Results and discussion

3.5.1 Descriptive statistics

Average (\pm SD) milk yield and MFC in the final database were 30.3 ± 8.4 kg/d and $3.84 \pm 0.64\%$, respectively. This production performance is similar to data reported by the Canadian Dairy Information Centre (2015) for milk yield and MFC of Holstein cows in Québec during the period comprised between 2009 to 2011 (i.e. 32.4 ± 0.3 kg milk/day and $3.85 \pm 0.01\%$ fat, respectively). Levels of milk yield were similar between seasons, and were at their highest at the peak of lactation (Table 3.1). Moreover, average MFC was lower in summer (Table 3.1) at each stage of lactation, which agrees with the information reported in the literature for seasonal variation in milk composition (West, 2003).

Diet composition was similar during winter and summer (Table 3.2). Average contents of crude protein (16.8%), NDF (35.7%), acid detergent fiber (21.9%), non fiber carbohydrate (37.5%) and ether extract (3.3%) over the two seasons were in accordance with dietary recommendations (NRC, 2001) to meet the nutritional requirements of cows at the level of production reported in Table 3.1.

Descriptive statistics of variables included in the model are reported in Table 3.3. Through all the lactation stages, average DCAD levels were similar between diets (20 mEq/100 g DM), and some diets had negative values (Figure 3.1). As expected, the level of CONC in diets decreased with the progress of lactation. In winter, 26.2% of the herds were fed a TMR, and 6.4% used PALM80 while in summer, 28.8% of the herds were fed a TMR, 6.8% used PALM80, and 23.7% grazed.

3.5.2 Prediction models

3.5.2.1 General description

There was no difference between fit statistics of models for any of the three DCAD equations tested based on the Bayesian information criteria, Akaike information criterion, root mean square error, and coefficient of determination (data not shown). Thus, the DCAD equation $(Na + K) - (Cl + S)$ proposed by Ender et al. (1971) and NRC (2001) was used in the final analysis and is reported in the current paper. As well, no difference between fit statistics of the model was found when the variable year was included in the model; therefore, it was not included in the final analysis.

The analysis of prediction bias using simple regression of residuals by the centralised predicted values of MFC for all models (Table 3.4), indicated an absence of mean bias ($P > 0.99$), as the intercepts of these plots were not different from 0 (St-Pierre, 2003). However there was a significant linear bias for all the models ($P < 0.001$; Table 3.4). The bias at minimum and maximum prediction is judged relative to the size of the standard error (St-Pierre, 2003). Therefore, the magnitude of these linear biases, in winter and summer models, translates respectively to values less than 0.25 and 0.27% at minimum (2.50 and 2.32% fat), and less than 0.24 and 0.27% at maximum (5.31 and 5.11% fat) predicted values for MFC. These biases are lower than the standard errors of 0.39 and 0.36% on average for MFC of winter and summer models, respectively. The absence of mean bias, and the relatively low

linear biases, with the concordance of predicted and residual values suggest the usefulness and validity of these models to predict MFC.

The models were not able to accurately predict MFC in early lactation during winter or summer ($R^2 = 0.08$ and 0.06 , respectively). Data for early lactation were then removed from the rest of the analysis. The predictive capacities of the models (Table 3.5) for peak ($R^2 = 0.38$ and 0.32), mid ($R^2 = 0.55$ and 0.42), and late lactation ($R^2 = 0.66$ and 0.46) during winter and summer, respectively, were greater and allowed for the interpretation of results (Table 3.5).

In early lactation, other factors, different from genetic merit, feed management or diet composition, may have had more impact on milk constituents. Firstly, MFC decreases after calving reaching its nadir when cows are around 50 DIM and its increase thereafter (Schutz et al., 1990; Walker et al., 2004). This phenomenon is due in part to a dilution effect by the increase in milk volume. Among other factors also identified, it is known that MFC in early lactation can be affected by the management of the transition period, or by metabolic disorders during the periparturient phase (Toni et al., 2011; van Knegsel et al., 2014). On the contrary, milk composition of cows in mid to late lactation is more sensitive to changes in the diet composition than cows in early lactation (NRC, 2001), which may explain why the models were better at predicting MFC in cows over 50 DIM in the current study.

Additionally, variables retained in the summer models were different from those in winter. This observation is in agreement with the suggestion that nutrient requirements of lactating dairy cows should be modified according to seasons (West, 2003).

3.5.2.2 Effect of EBV MFC

The EBV MFC had a linear effect on MFC. This relationship was significant ($P < 0.001$) at all lactation stages studied, and during both seasons (Table 3.5). More specifically,

an increase of 0.2% in EBV MFC resulted in an average rise of 0.29 and 0.24 percentage units of MFC during winter and summer, respectively. Genetic selection for an increase in MFC is known to be effective, although it is recognized to be a long process as it requires multiple generations (Shook, 2006).

3.5.2.3 *Effect of DCAD*

Dietary cation-anion difference was the only dietary variable retained in the model throughout the three stages of lactation studied in winter, and most stages in summer (Table 3.5). As an example, if the prediction equations are used in cows receiving separate feed components without PALM80, a DCAD increase of 10 mEq/100 g DM would lead to increase MFC by 0.02 percentage units in peak lactation, and by 0.01 percentage units in mid lactation during winter and summer.

In peak lactation during summer, the effect of increasing DCAD was not the same for cows fed a TMR than for those receiving separate feed components (interaction between DCAD and TMR; $P = 0.01$). As shown in Figure 2, the positive effect of increasing DCAD on MFC was not observed when diets were fed as TMR.

In addition, there was an interaction between DCAD and grazing in peak lactation (Figure 3.3). Increasing DCAD had a positive impact on MFC for cows without grazing, while the opposite was observed for cows having access to grazing (DCAD \times grazing; $P < 0.01$). On the contrary, Roche et al. (2005) reported a linear increase in MFC by increasing DCAD from 23 to 88 mEq/100 g DM under grazing conditions during early lactation (48 DIM). The negative impact of increasing DCAD on MFC for grazing cows in the current database was unexpected, but could partly come from a confounding effect between DCAD and the estimated proportion of grazed forage in the diet. More specifically, a concomitant increase was observed in DCAD and the intake of grazed grass, which is rich in K (averaging 3.15% of DM in the database). However, the proportion of pasture intake relies on

estimations. It is therefore difficult to isolate the impact of DCAD and grazing in the current study.

Previous studies have also reported increases of MFC with higher DCAD in early (Hu et al., 2007b, Wildman et al., 2007b), peak (Apper-Bossard et al., 2010) and mid lactation (Apper-Bossard et al., 2006). However, Hu and Murphy (2004), in a meta-analysis, found no effect of DCAD on MFC. These authors speculated that the reason why they found no difference was because 90% of treatment means for MFC was $\geq 3.3\%$. Similarly, in our database more than 90% of recorded MFC were higher than this threshold value. It is also worth mentioning that most cows (89% during winter and 83% during summer) in our database received a lower DCAD (i.e. 20.6 ± 7.8 and 22.5 ± 8.0 mEq/100 g DM during winter and summer, respectively) than what is recommended in the literature (> 30 mEq/100 g DM; Shire and Beede, 2013), and as mentioned previously, some diets had negative DCAD (Table 3.3; Figure 3.1). The extent of DCAD variations in our database may help explain the capacity of the models to detect the impact of DCAD on MFC during all stages of lactation studied.

3.5.2.4 *Effect of concentrate*

Milk production can be stimulated by increasing dietary CONC, but it is also known that providing high amount of these ingredients can reduce MFC (Jenkins and McGuire, 2006). Results from our models support this theory during both seasons, and for most lactation stages (Table 3.5). However, the negative impact of the level of CONC on MFC can be attenuated by the feeding method, as seen by the interaction of CONC by TMR in mid and late lactation during winter ($P < 0.01$), as well as in peak ($P < 0.01$) and mid lactation ($P < 0.001$) during summer (Figure 3.4).

During the summer season in mid lactation, the effect of the CONC on MFC was different between cows with or without access to grazing (CONC \times grazing, $P < 0.01$; Figure

3.5). In both systems, MFC decreased with the increase of CONC in the diet, but the negative effect was of a lower magnitude when cows had access to grazing; i.e. a 10% increase in the level of CONC resulted in MFC decreasing of 0.02 and 0.04 percentage units, with and without grazing, respectively. These results are in accordance with the review by Bargo et al. (2003), who reported that MFC decreased when the amount of CONC increased under grazing conditions. However, the decrease in MFC was lower (by 0.24 percentage units) in the current study than that observed by Bargo et al. (2003).

3.5.2.5 *Effect of TMR*

Our results show that feeding TMR resulted in an increase of MFC ranging from 0.01 to 0.12 percentage units of MFC depending on seasons, levels of CONC, and DCAD. Many interactions were noted for the impact of TMR on MFC at the different stages of lactation studied. Generally, TMR had a positive effect on MFC, the interaction having mostly an impact on the amplitude of the variation. Previous studies have also reported an increase in MFC with this mode of distribution of feed ingredients (Caccamo et al., 2010). The positive effect of TMR may be explained by the fact that when mixing all feed ingredients, forage and CONC are consumed at the same time, increasing salivation, chewing and rumen buffering (NRC, 2001).

3.5.2.6 *Effect of PALM80*

Feeding PALM80 had a positive effect on MFC in peak lactation during summer ($P < 0.05$). In the course of the warm season, DMI is reduced due to heat stress. Increasing energy density of the diet with fat supplementation is then recommended (Renaudeau et al., 2012). This practice not only improves energy intake, but also reduces diet heat increment (Renaudeau et al., 2012). Such phenomenon may partly explain the positive effect of PALM80 observed during summer. More specifically related to PALM80, some studies reported positive responses in milk yield and MFC (Piantoni et al., 2013; Rico et al., 2014b),

whereas others reported no effect (Rico et al., 2014a; Warntjes et al., 2008). The effect of PALM80 on MFC may be due in part to an efficient dietary transfer of their constituent palmitic acid from diet to milk (up to 50%, Loften et al., 2014). Moreover, an interaction between DCAD and PALM80 was observed in peak ($P < 0.01$) and mid ($P < 0.01$) lactation during winter (Figure 3.6). This observation suggests that the efficiency of PALM80 is affected by DCAD level. To our knowledge there are not studies that have reported a similar effect.

3.5.2.7 Effect of grazing in summer models

Cows with access to grazing had lower MFC at the three stages of lactation studied (Table 3.5). As discussed above, the amplitude of the variation was affected by DCAD level ($P < 0.01$, Figure 3.3) in peak lactation, and by the CONC ($P < 0.01$, Figure 3.5) in mid lactation. Lower MFC for cows on pasture is often reported, and can be attributed to a higher intake of linolenic acid which leads to the formation of *trans* isomers that are associated with milk fat depression (Boken et al., 2005; Ferlay et al., 2008). This phenomenon could be amplified by the fact that fresh forages (less mature) have lower NDF content, than harvested forages, leading to less mastication (Eastridge, 2006).

In our model, an interaction between grazing and PALM80 ($P = 0.01$) was found in peak lactation (Figure 3.7). Studies had shown an increase of MFC for cows on pasture with a saturated fat supplement as compared with cows without supplementation or supplemented with unsaturated fats (Bargo et al., 2003; Schroeder et al., 2004). Under grazing conditions, energy intake is the most limiting nutrient for milk production, and supplementation is needed to obtain higher milk production (Schroeder et al., 2004). Cereal grains are the most common dietary energy sources for grazing dairy cows, but as mentioned above, higher intakes of these feed ingredients can reduce MFC (Bargo et al., 2003). In these conditions, dietary addition of PALM80 has the potential to contribute to a greater increase in both the

energy density of the diet and MFC in grazing cows, which could explain the interaction observed in our model (Figure 3.7).

3.6 Conclusion

Milk fat concentration is an important component of milk payment scheme. The objective of the current study was to develop simple models to predict MFC using the information available in the local dairy herd improvement database. Although numerous factors affect milk fat synthesis in dairy cattle, the prediction of MFC from different variables related to genetic potential, feeding system, and diet composition was feasible for cows in peak, mid and late lactation, and during winter and summer seasons. Variables retained in the diverse models were different between stages of lactation, and seasons of the year. Moreover, several interactions were observed between variables within lactation stages and seasons. For example, the level of DCAD can affect the response to PALM80 supplementation. Likewise, the negative impact of increasing the CONC in the diet may be attenuated by feeding a TMR. Results confirm that grazing has a negative impact on MFC, but some strategies, such as feeding PALM80, can reduce this impact. This study confirms the importance of feed management and diet composition on MFC. The numerous significant interactions observed foreground the importance to have a multifactorial approach when formulating diets allowing for maximal MFC in dairy cows. Finally, DCAD should be included in this multifactor analysis since results demonstrated its positive impact on MFC for cows in peak, mid and late lactation during winter, as well as in peak and mid lactation during summer.

3.7 Acknowledgements

This study was funded through Industrial Research Chair program of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (Ottawa, ON, Canada), with industry contributions from the Dairy Farmers of Canada (Ottawa, ON, Canada), Novalait Inc.

(Québec, QC, Canada), Les Producteurs de Lait du Québec (Longueuil, QC, Canada), and the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (Québec, QC, Canada). The authors thank Valacta (Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada) for access to its database and data extraction.

Table 3.1 Milk yield and composition during winter and summer at different stages of lactation

Item	Winter				Summer			
	Mean	SD	Minimum	Maximum	Mean	SD	Minimum	Maximum
Early lactation								
Milk yield (kg/d)	34.9	8.6	9.0	56.9	33.6	8.6	7.8	56.9
Fat (%)	3.98	0.74	1.78	6.19	3.79	0.74	1.75	6.05
Crude protein (%)	3.07	0.32	2.18	4.10	3.01	0.32	2.16	4.05
Lactose (%)	4.60	0.19	4.00	5.19	4.60	0.19	3.97	5.21
Peak lactation								
Milk yield (kg/d)	35.4	8.0	11.2	56.9	35.2	8.1	10.7	56.9
Fat (%)	3.67	0.57	1.91	5.45	3.47	0.57	1.75	5.27
Crude protein (%)	3.02	0.24	2.28	3.76	2.92	0.22	2.24	3.62
Lactose (%)	4.65	0.17	4.12	5.17	4.65	0.17	4.11	5.17
Mid lactation								
Milk yield (kg/d)	30.4	7.1	8.7	52.2	31.2	7.3	8.9	53.5
Fat (%)	3.88	0.58	2.08	5.69	3.67	0.57	1.89	5.47
Crude protein (%)	3.27	0.26	2.47	4.08	3.14	0.25	2.39	3.91
Lactose (%)	4.58	0.18	4.00	5.15	4.59	0.17	4.04	5.14
Late lactation								
Milk yield (kg/d)	24.5	6.5	4.6	44.6	25.5	6.5	5.5	45.7
Fat (%)	4.12	0.61	2.26	5.97	3.91	0.59	2.09	5.75
Crude protein (%)	3.50	0.28	2.64	4.36	3.37	0.27	2.55	4.20
Lactose (%)	4.48	0.22	3.74	5.21	4.52	0.21	3.83	5.18

Table 3.2 Statistical description of diet composition during winter and summer at different stages of lactation

Item (%, DM basis)	Winter				Summer			
	Mean	SD	Minimum	Maximum	Mean	SD	Minimum	Maximum
Early lactation								
OM	92.9	1.17	96.9	88.9	92.7	1.17	96.9	88.9
CP	17.0	1.19	13.0	21.1	17.2	1.18	13.0	21.0
NDF	34.9	4.30	22.4	48.7	34.9	4.06	23.8	48.8
ADF	21.3	2.53	13.7	29.8	21.2	2.36	14.0	29.8
NFC	38.2	4.71	3.7	67.5	37.8	4.57	18.0	59.4
Ether extract	4.0	0.74	1.8	6.2	3.4	0.63	1.9	6.9
Peak lactation								
OM	92.9	1.16	96.9	89.0	92.7	1.18	96.9	89.1
CP	16.9	1.20	12.1	21.0	17.1	1.18	12.9	21.0
NDF	34.8	4.21	23.0	48.9	34.9	4.01	22.7	48.9
ADF	21.2	2.47	13.7	29.9	21.2	2.32	13.8	29.8
NFC	38.4	4.65	3.1	54.3	37.9	4.57	12.4	63.6
Ether extract	3.4	0.63	1.8	7.1	3.4	0.62	1.9	6.9
Mid lactation								
OM	92.9	1.17	96.9	88.8	92.7	1.19	96.9	88.9
CP	16.7	1.24	12.1	21.0	17.0	1.21	12.2	21.0
NDF	35.6	4.42	22.1	52.2	35.6	4.20	21.8	52.1
ADF	21.9	2.67	14.1	32.6	21.7	2.49	13.9	32.7
NFC	37.8	4.75	3.2	54.6	37.3	4.67	12.4	59.5
Ether extract	3.3	0.59	1.7	7.2	3.3	0.59	1.8	6.9
Late lactation								
OM	92.8	1.19	96.8	88.8	92.6	1.19	96.8	88.8
CP	16.4	1.31	12.1	20.8	16.7	1.27	12.1	20.9
NDF	36.9	4.73	22.8	52.2	36.6	4.39	21.9	52.2
ADF	22.8	2.94	13.7	32.7	22.5	2.70	14.2	32.7
NFC	36.9	4.95	4.2	56.4	36.6	4.76	15.1	61.9
Ether extract	3.1	0.53	1.7	6.7	3.2	0.53	1.8	6.8

Table 3.3 Statistical description of the variables included in models for winter and summer at different stages of lactation

Item	Winter				Summer			
	Mean	SD	Minimum	Maximum	Mean	SD	Minimum	Maximum
Early lactation								
EBV MFC ¹	0.01	0.24	-0.72	0.74	0.01	0.24	-0.72	0.73
DCAD ²	20.5	7.70	-3.0	43.5	22.4	7.76	-1.3	46.1
CONC ³	48.1	8.41	20.4	75.8	46.0	9.08	16.3	75.6
Peak lactation								
EBV MFC	0.01	0.24	-0.72	0.75	0.01	0.24	-0.71	0.73
DCAD	20.4	7.67	-2.9	43.8	22.3	7.7	-1.3	45.8
CONC	48.5	8.09	21.5	75.4	46.3	8.7	17.6	74.9
Mid lactation								
EBV MFC	0.01	0.24	-0.73	0.75	0.01	0.24	-0.71	0.74
DCAD	20.6	7.7	-2.8	44.0	22.5	7.9	-1.6	46.6
CONC	46.4	8.8	18.0	74.9	44.5	9.3	14.4	74.6
Late lactation								
EBV MFC	0.003	0.24	-0.73	0.74	0.01	0.25	-0.73	0.75
DCAD	20.7	7.71	-2.8	44.3	22.8	7.95	-1.6	47.1
CONC	43.3	9.67	12.6	74.1	41.9	9.89	10.5	73.6

¹EBV MFC = Estimated breeding value for milk fat concentration.

²Dietary cation-anion difference; calculated as (Na + K) - (Cl + S), and expressed in milliequivalents per 100 g of DM.

³CONC = Proportion of concentrate in the diet (% DM).

Table 3.4 Regression parameters between the residuals and the predicted MFC (centered around the mean) in models for winter and summer at different stages of lactation

Models	Winter				Summer			
	Regression estimates				Regression estimates			
	Estimate	SE	<i>P</i> -value	R ²	Estimate	SE	<i>P</i> -value	R ²
Peak lactation								
Intercept ^a	9.90E-13	0.002	1.00	0.02	-1.07E-12	0.002	1.00	0.02
Predicted MFC ^b , %	0.19	0.005	<0.001		0.20	0.007	<0.001	
Mid lactation								
Intercept	-9.64E-13	0.001	1.00	0.03	-1.85E-12	0.001	1.00	0.02
Predicted MFC, %	0.14	0.003	<0.001		0.13	0.004	<0.001	
Late								
Intercept	-1.68E-12	0.001	1.00	0.04	-7.40E-13	0.001	1.00	0.03
Predicted MFC, %	0.14	0.002	<0.001		0.14	0.003	<0.001	

^aMean prediction bias.

^bLinear prediction bias.

Table 3.5 Relationship between milk fat concentration and explicative variables at different stages of lactation during winter and summer seasons

Variable	Winter			Summer		
	Estimate	SE	P-value	Estimate	SE	P-value
Peak lactation	(n = 58,275; R ² = 0.38; RMSE ¹ = 0.42)			(n = 38,219; R ² = 0.32; RMSE = 0.44)		
Intercept	3.591	0.009	<0.001	3.574	0.030	<0.001
EBV MFC ²	1.160	0.008	<0.001	1.044	0.011	<0.001
DCAD ³	0.002	0.001	<0.001	0.002	0.001	<0.01
CONC ⁴	- ⁵	-	-	-0.003	0.001	<0.001
TMR ⁶	0.052	0.009	<0.001	-0.032	0.049	0.52
PALM80 ⁷	-0.048	0.037	0.19	0.035	0.018	0.05
Grazing ⁸	-	-	-	-0.040	0.030	0.19
DCAD × PALM80	0.004	0.002	<0.01	-	-	-
DCAD × TMR	-	-	-	-0.003	0.001	0.01
DCAD × Grazing	-	-	-	-0.004	0.001	<0.01
CONC × TMR	-	-	-	0.003	0.001	<0.01
PALM80 × Grazing	-	-	-	0.135	0.052	0.01
Mid lactation	(n = 111,479; R ² = 0.55; RMSE = 0.38)			(n = 80,675; R ² = 0.42; RMSE = 0.41)		
Intercept	3.984	0.014	<0.001	3.827	0.018	<0.001
EBV MFC	1.462	0.006	<0.001	1.336	0.007	<0.001
DCAD	0.001	0.001	<0.01	0.001	0.001	0.01
CONC	-0.003	0.001	<0.001	-0.004	0.001	<0.001
TMR	-0.013	0.020	0.53	-0.057	0.025	0.02
PALM80	-0.078	0.029	<0.01	-	-	-
Grazing	-	-	-	-0.222	0.028	<0.001
DCAD × PALM80	0.004	0.001	<0.01	-	-	-
CONC × TMR	0.001	0.001	<0.01	0.002	0.001	<0.001
CONC × Grazing	-	-	-	0.002	0.001	<0.01
Late lactation	(n = 91,180; R ² = 0.66; RMSE = 0.36)			(n = 87,573; R ² = 0.46; RMSE = 0.39)		
Intercept	4.081	0.013	<0.001	3.977	0.010	<0.001
EBV MFC	1.655	0.007	<0.001	1.488	0.007	<0.001
DCAD	0.001	0.001	<0.01	-	-	-
CONC	-0.001	0.001	0.07	-0.002	0.001	<0.001
TMR	0.106	0.019	<0.001	0.034	0.009	<0.01
Grazing	-	-	-	-0.101	0.008	<0.001
CONC × TMR	-0.001	0.001	<0.01	-	-	-

¹Root mean square error.

²EBV MFC= Estimated breeding value for milk fat concentration.

³Calculated as (Na + K) - (Cl + S), and expressed in milliequivalents per 100 g of DM.

⁴CONC = Proportion of concentrate in the diet (% of DM).

⁵The variable was not included in the model.

⁶TMR = Total mixed ration (binary variable)

⁷PALM80 = Addition of fat supplements having more than 80% of palmitic acid (binary variable).

⁸Grazing in the diet (binary variable).

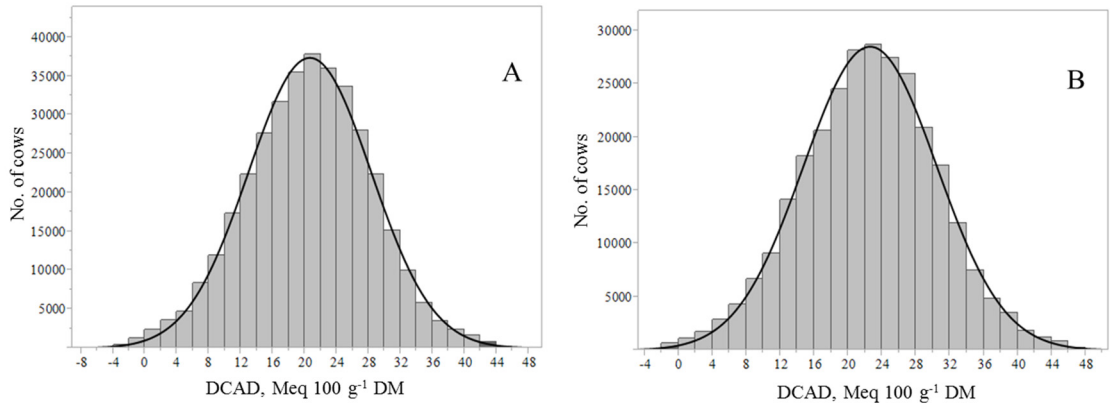


Figure 3.1 Dietary cation-anion distribution during winter (A) and summer (B) seasons.

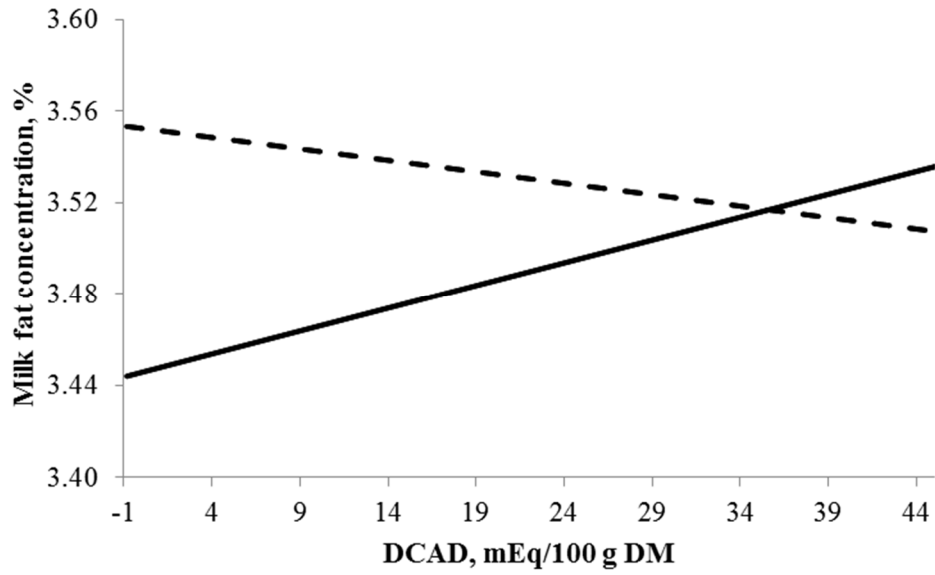


Figure 3.2 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak lactation when feedstuffs were fed as TMR (dashed line) or separately (solid line) for diets varying DCAD during summer season ($P = 0.01$).

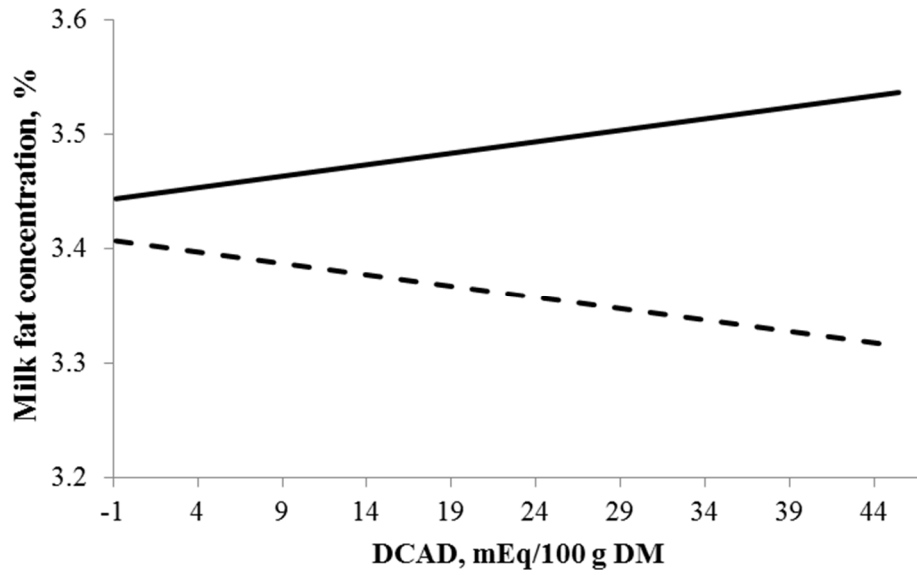


Figure 3.3 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak lactation during summer when grazing (dashed line) or without grazing (solid line) for diets varying DCAD ($P < 0.01$).

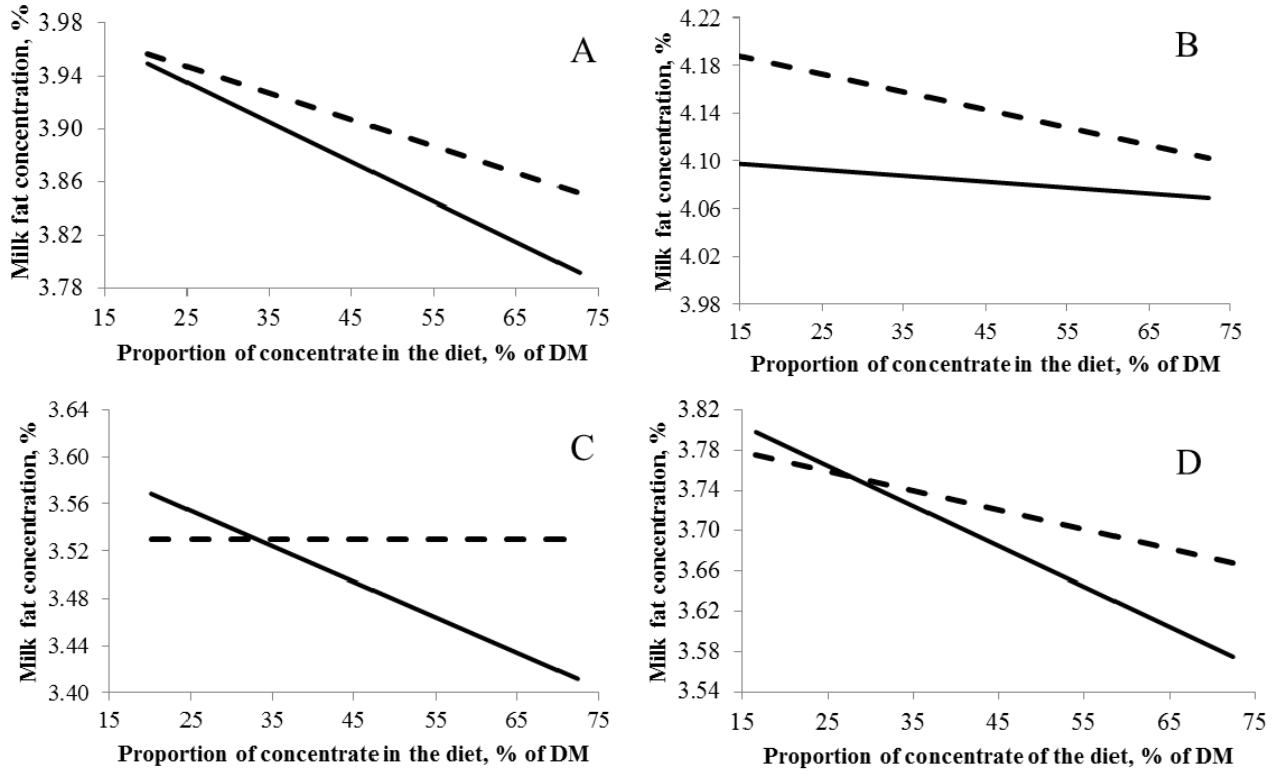


Figure 3.4 Interaction between results for milk fat concentration of cows when feedstuffs were fed as TMR (dashed line) or separately (solid line) for diets varying in the proportion of concentrate in mid (A) and late (B) lactation during winter ($P < 0.01$) and in peak (C) ($P < 0.01$) and mid (D) ($P < 0.001$) lactation during summer.

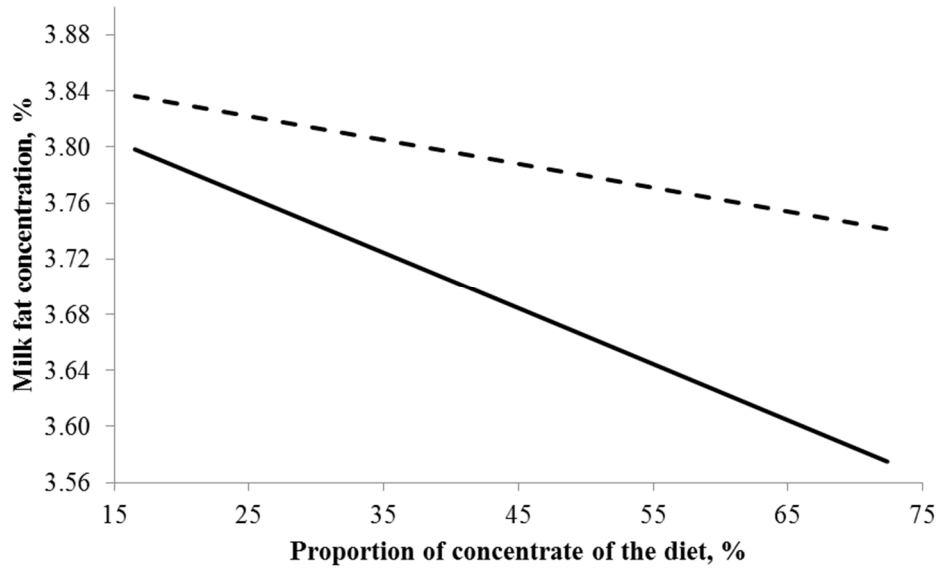


Figure 3.5 Interaction between results for milk fat concentration of cows in mid lactation during summer when grazing (dashed line) or without grazing (solid line) for diets varying in the proportion of concentrate in the diet ($P < 0.01$).

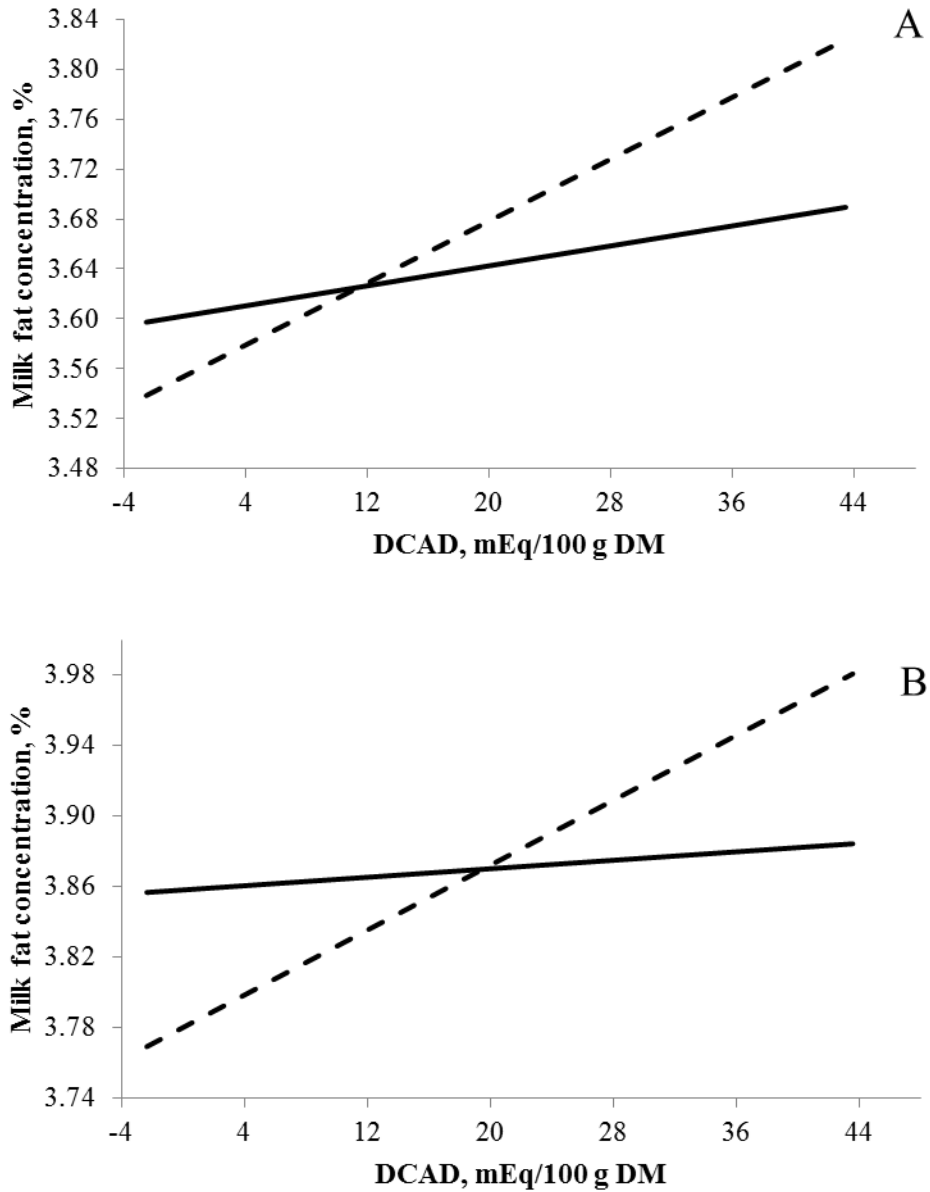


Figure 3.6 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak (A) and mid (B) lactation during winter with (dashed line) and without (solid line) the addition of supplements having more than 80% of palmitic acid in the diet when varying DCAD ($P < 0.01$).

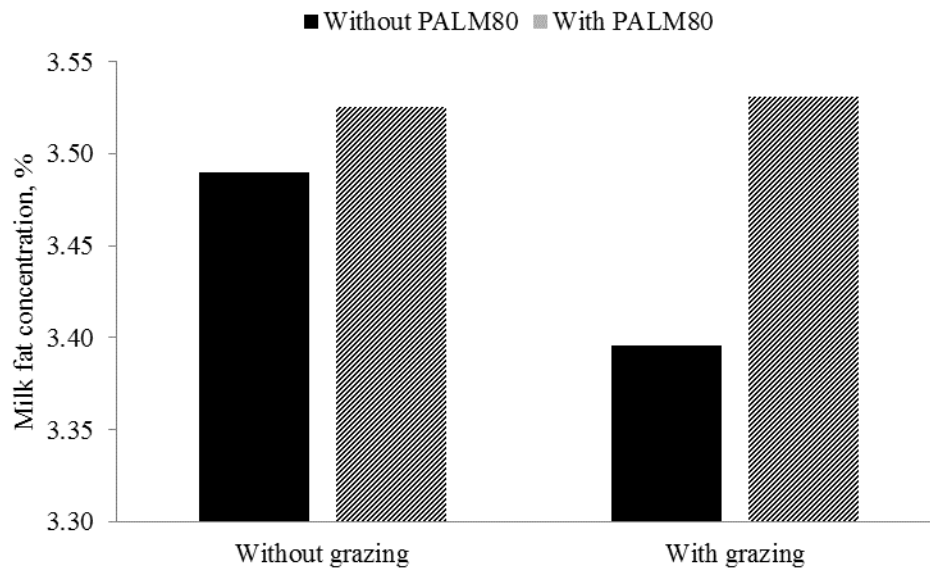


Figure 3.7 Interaction between results for milk fat concentration of cows in peak lactation during summer with grazing or without grazing for diets with or without the addition of supplements having more than 80% of palmitic acid (PALM80) in the diet (P = 0.01).

3.8 References

- Apper-Bossard, E., Faverdin, P., Meschy, F., Peyraud, J.L., 2010. Effects of dietary cation-anion difference on ruminal metabolism and blood acid-base regulation in dairy cows receiving 2 contrasting levels of concentrate in diets. *J. Dairy Sci.* 93, 4196-4210.
- Apper-Bossard, E., Peyraud, J.L., Faverdin, P., Meschy, F., 2006. Changing dietary cation-anion difference for dairy cows fed with two contrasting levels of concentrate in diets. *J. Dairy Sci.* 89, 749-760.
- Bargo, F., Muller, L.D., Delahoy, J.E., Cassidy, T.W., 2002. Performance of high producing dairy cows with three different feeding systems combining pasture and total mixed rations. *J. Dairy Sci.* 85, 2948-2963.
- Bargo, F., Muller, L.D., Kolver, E.S., Delahoy J.E., 2003. Invited review: Production and digestion of supplemented dairy cows on pasture. *J. Dairy Sci.* 86, 1-42.
- Bauman, D.E., Mather, I.H., Wall, R.J., Lock, A.L., 2006. Major advances associated with the biosynthesis of milk. *J. Dairy Sci.* 89, 1235-1243.
- Bauman, D.E., Griinari, J.M., 2003. Nutritional regulation of milk fat synthesis. *Annu. Rev. Nutr.* 23, 203-227.
- Boken, S.L., Staples, C.R., Sollenberger, L.E., Jenkins, T.C., Thatcher, W.W., 2005. Effect of grazing and fat supplementation on production and reproduction of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 88, 4258-4272.
- Caccamo, M., Veerkamp, R.F., Ferguson, J.D., Petriglieri, R., La Terra, F., Licitra, G., 2010. Associations of breed and feeding management with milk production curves at herd level using a random regression test-day model. *J. Dairy Sci.* 93, 4986-4995.
- Caccamo, M., Veerkamp, R.F., Licitra, G., Petriglieri, R., La Terra, F., Pozzebbon, A., Ferguson, J.D., 2012. Association of total-mixed-ration chemical composition with milk, fat, and protein yield lactation curves at the individual level. *J. Dairy Sci.* 95, 6171-6183.
- Chan, P.S., West, J.W., Bernard, J.K., Fernandez, J.M., 2005. Effects of dietary cation-anion difference on intake, milk yield, and blood components of the early lactation cow. *J. Dairy Sci.* 88, 4384-4392.
- Canadian Dairy Information Center. 2015. Average Production by Province. Accessed Jun. 16, 2015. <http://aimis-simia-cdic-ccil.agr.gc.ca/rp/index-eng.cfm?action=pR&r=215&pdctc>
- de Vries, M.J., and Veerkamp, R.F., 2000. Energy balance of dairy cattle in relation to milk production variables and fertility. *J. Dairy Sci.* 83, 62-69.
- Delaquis, A.M., Block, E., 1995. Dietary cation-anion difference, acid-base status, mineral metabolism, renal function, and milk production of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 78, 2259-2284.

- Eastridge, M.L., 2006. Major advances in applied dairy cattle nutrition. *J. Dairy Sci.* 89, 1311-1323.
- Ender, F., Dishington, I.W., Helgebostad, A., 1971. Calcium balance studies in dairy cows under experimental induction and prevention of hypocalcaemic paresis puerperalis. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 28, 233-256.
- Ferlay, A., Agabriel, C., Sibra, C., Journal, C., Martin, B., Chilliard, Y., 2008. Tanker milk variability in fatty acids according to farm feeding and husbandry practices in a French semi-mountain area. *Dairy Sci. Technol.* 88, 193-215.
- Goddard, M.E., and Hayes, B.J., 2009. Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programs. *Nat. Rev. Genet.* 10, 381-391.
- Goff, J.P., Ruiz, R., Horst, R.L., 2004. Relative acidifying activity of anionic salts commonly used to prevent milk fever. *J. Dairy Sci.* 87, 1245-1255.
- Hamann, J., and Krömker, V., 1997. Potential of specific milk composition variables for cow health management. *Livest. Prod. Sci.* 48, 201-208.
- Hu, W., and Murphy, M.R., 2004. Dietary cation-anion difference effects on performance and acid-base status of lactating dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 87, 2222-2229.
- Hu, W., Murphy, M.R., Constable, P.D., Block, E., 2007. Dietary cation-anion difference and dietary protein effects on performance and acid-base status of dairy cows in early lactation. *J. Dairy Sci.* 90, 3355-3366.
- Jenkins, T.C., and McGuire, M.A., 2006. Major advances in nutrition: Impact on milk composition. *J. Dairy Sci.* 89, 1302-1310.
- Loften, J.R., Linn, J.G., Drackley, J.K., Jenkins, T.C., Soderholm, C.G., Kertz, A.F., 2014. Invited review: Palmitic and stearic acid metabolism in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97, 4661-4674.
- Mongin, P., 1981. Recent advances in dietary anion-cation balance: applications in poultry. *Proc. Nutr. Soc.* 40, 285-294.
- NRC (National Research Council). 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: 7th Rev. Ed.*, 2001. Nat. Acad. Press, Washington, DC.
- Nocek, J.E., Steele, R.L., Braund, D.G., 1986. Performance of dairy cows fed forage and grain separately versus a total mixed ration. *J. Dairy Sci.*, 69, 2140-2147.
- Piantoni, P., Lock, A.L., Allen, M.S., 2013. Palmitic acid increased yields of milk and milk fat and nutrient digestibility across production level of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 96, 7143-7154.
- Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., de Basilio, V., Gourdine, J.L., Collier, R.J., 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *animal* 6, 707-728.

- Rico, J.E., Allen, M.S., Lock, A.L., 2014a. Compared with stearic acid, palmitic acid increased the yield of milk fat and improved feed efficiency across production level of cows. *J. Dairy Sci.* 97,1057-1066.
- Rico, D.E., Ying, Y., Harvatine, K.J., 2014b. Effect of a high-palmitic acid fat supplement on milk production and apparent total-tract digestibility in high- and low-milk yield dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97, 3739-3751.
- Roche, J.R., Petch, S., Kay, J.K., 2005. Manipulating the dietary cation-anion difference via drenching to early-lactation dairy cows grazing pasture. *J. Dairy Sci.* 88, 264-276.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/StatR 9.3 User's Guide. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- Schroeder, G.F., Gagliostro, G.A., Bargo, F., Delahoy, J.E., Muller, L.D., 2004. Effects of fat supplementation on milk production and composition by dairy cows on pasture: A review. *Livest. Prod. Sci.* 86, 1-18.
- Schutz, M.M., Hansen, L.B., Steuernagel, G.R., Kuck, A.L., 1990. Variation of milk, fat, protein, and somatic cells for dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 73, 484-493.
- Shire, J. A., and D. K. Beede. 2013. Influence of DCAD on lactational performance: A review of some practical considerations. Pages 91-98 in Proc. Penn State Dairy Cattle Nutrition Workshop. Grantville, PA.
- Shook, G.E., 2006. Major advances in determining appropriate selection goals. *J. Dairy Sci.* 89, 1349-1361
- Sutton, J.D., 1989. Altering milk composition by feeding. *J. Dairy Sci.* 72, 2801-2814.
- St-Pierre, N.R., 2003. Reassessment of biases in predicted nitrogen flows to the duodenum by NRC 2001. *J. Dairy Sci.* 86, 344-350.
- Toni, F., Vincenti, L., Grigoletto, L., Ricci, A., Schukken, Y.H., 2011. Early lactation ratio of fat and protein percentage in milk is associated with health, milk production, and survival. *J. Dairy Sci.* 94, 1772-1783.
- van Knegsel, A.T.M., Rummelink, G.J., Jorjongs, S., Fievez, V., Kemp, B., 2014. Effect of dry period length and dietary energy source on energy balance, milk yield, and milk composition of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97, 1499-1512.
- Walker, G.P., Dunshea, F.R., Doyle, P.T., 2004. Effects of nutrition and management on the production and composition of milk fat and protein: A review. *Aust. J. Agric. Res.* 55, 1009-1028.
- Warntjes, J.L., Robinson, P.H., Galo, E., DePeters, E.J., Howes, D., 2008. Effects of feeding supplemental palmitic acid (C16:0) on performance and milk fatty acid profile of lactating dairy cows under summer heat. *Anim. Feed Sci. Technol.* 140, 241-257.
- West, J.W., 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86, 2131-2144.

- Wildman, C.D., West, J.W., Bernard, J.K., 2007. Effect of dietary cation-anion difference and dietary crude protein on milk yield, acid-base chemistry, and rumen fermentation. *J. Dairy Sci.* 90, 4693-4700.
- Yrjänen, S., Kaustell, K., Kangasniemi, R., Sariola, J., Khalili, H., 2003. Effects of concentrate feeding strategy on the performance of dairy cows housed in a free-stall barn. *Livest. Prod. Sci.* 81, 173-181.
- Zebeli, Q., Mansmann, D., Steingass, H., Ametaj, B.N., 2010. Balancing diets for physically effective fibre and ruminally degradable starch: A key to lower the risk of sub-acute rumen acidosis and improve productivity of dairy cattle. *Livest. Sci.* 127, 1-1

Chapitre IV

4 Relationship between milk urea nitrogen or urea nitrogen to protein ratio and dietary crude protein in commercial dairy herds

Ce chapitre sera soumis pour publication comme communication courte dans la revue

Journal of Dairy Science

4.1 Résumé

Les teneurs en azoté uréique du lait (AUL) sont couramment utilisées comme indicateur de la gestion de la nutrition protéique de la vache laitière. Il a aussi été suggéré que le rapport AUL: protéine du lait (AUL: PROT) puisse être un indicateur plus précis que l'AUL seule à cette fin. Ainsi, les objectifs de cette étude étaient de : i) vérifier la relation entre l'urée, ainsi que le rapport AUL : PROT du lait et la protéine brute de la ration en utilisant une base de données de troupeaux commerciaux et de ii) mieux comprendre comment les facteurs, autres que la protéine brute de la ration, peuvent affecter cette relation. Les résultats de cette étude ont montré que certaines fermes obtenaient des corrélations positives alors que d'autres présentaient des corrélations négatives entre l'AUL ainsi que le rapport AUL : PROT et la protéine brute de la ration. De plus, les résultats ne permettent pas d'identifier dans quel contexte un suivi des teneurs en AUL et du rapport AUL: PROT est pertinente. Le manque de précision dans les données relatives aux analyses de fourrages et à la prise alimentaire pourrait avoir été problématique dans cette étude. Cet aspect soulève des questions sur la validité de l'utilisation de ce type de données pour l'évaluation de la gestion nutritionnelle des troupeaux, de même que pour des études épidémiologiques dans ce domaine.

Mots clés : vaches en lactation, urée du lait, rapport urée : protéine du lait

4.2 Abstract

Monitoring milk urea nitrogen (**MUN**) is currently used as a tool to manage protein nutrition of cows on dairy farms. Using MUN to milk protein ratio (**MUN:PROT**) was suggested as a better indicator of the protein metabolism than MUN. Thus, the aims of this study were i) to verify the relationships between MUN with dietary CP concentration (**MUN-DCP**) and MUN:PROT and DCP (**MUN:PROT-DCP**) from DHI records of commercial dairy farms, and ii) to better understand how other factors than CP concentration of the diet can affect this relationship. Data of Holstein cows recorded by Valacta (Dairy Production Center of Expertise Québec-Atlantic) for the years 2009 to 2011 were used. Data were averaged by herd, sampling type and feed management group (FMG) assigned within the herd (for most herds 1 = first portion of the lactation or single grouping, and 2 = second portion of the lactation). Feed ingredients were grouped into 13 categories. Correlations for MUN-DCP and MUN:PROT-DCP were performed by herd. Categories (100 herds/category) were established according to their correlation between MUN-DCP or MUN:PROT-DCP: herds with the high negative (**NEG**) correlations ($r < -0.44$ and $r < -0.34$, respectively), and herds with the high positive (**POS**) correlations ($r > 0.69$ and $r > 0.74$, respectively). Statistical difference between categories were evaluated using GLIMMIX procedure of SAS. Results for MUN-DCP and MUN:PROT-DCP categories were similar for milk parameters in both FMG, but differed in some diet parameters. Milk fat concentration tended and was lower in POS herds compared to NEG herds in the MUN-DCP and MUN:PROT-DCP categories in FMG 1, respectively. For both MUN-DCP and MUN:PROT-DCP categories, MUN and MUN:PROT in FMG 1 were higher for POS than NEG herds (11.0 vs 10.1 mg/dL and 3.52 vs 3.20 mg urea-N/g milk CP, respectively), but there were no differences in the FMG 2. In MUN-DCP categories no differences were observed for CP concentration of the diets in neither of the FMG. However, for the MUN:PROT-DCP categories, dietary CP concentration was higher for the POS herds than the NEG herds (16.9 vs 16.5 and 16.0 vs 16.4% of DM in FMG 1 and FMG 2, respectively). Besides, herds within the POS category also used more supplements with > 50% of rumen degradable protein in both FMG. Amount of high moisture shelled corn offered in POS herds

in MUN–DCP category was higher than in NEG herds in FMG 1, whereas in the FMG 2, the amount of cracked corn offered was higher in NEG than in the POS herds in MUN–DCP and MUN:PROT–DCP categories. Finally, the wide variation in the correlation coefficients between MUN–DCP and MUN:PROT–DCP confirms that under commercial conditions many factors can affect these indicators. Results from this study did not allow to pinpoint a better context of utilization for MUN, but suggest that MUN:PROT ratio is a better indicator of protein utilization when protein sources higher in rumen degradable protein are used. The lack of precision in the dataset concerning forage analysis and intake, which was not validated on farm, could have been problematic in this study and raise questions on the validity of this type of dataset for specific nutritional evaluation.

Key words: Lactating dairy cows, milk urea nitrogen, milk urea nitrogen:protein ratio.

4.3 Short Communication

Monitoring milk urea nitrogen (**MUN**) can be used as a tool for nutritional and environmental management as an estimate of the efficiency of protein metabolism. Although, it is reported CP concentration explains most of the variation in MUN (Broderick and Clayton, 1997; Nousiainen et al., 2004), there are other dietary (Godden et al., 2001b; Aguilar et al., 2012) and non-dietary (Wattiaux et al., 2005; Spek et al., 2013) factors that can also affect MUN. For example, the sampling time have been reported to have an impact. Samples from a.m. milking are lower in MUN compared with the p.m. milking (Broderick et Clayton, 1997; Godden et al., 2001b). Because of these numerous sources of variation, Aguilar et al. (2012) reported that under commercial conditions, MUN data should mostly be used for within farm management. Therefore, it is difficult to establish a target value and an optimal range of variation which could be applied for all herds. Moreover, in order to consider the need to produce milk protein under commercial condition, Wattiaux and Crump (2014) suggested that monitoring MUN to milk protein ratio (**MUN:PROT**) might provide more accurate and relevant information than using MUN. However, more research is needed before this ratio could be proposed as an alternative to MUN. Thus, the objectives of this study were i) to verify the relationships between MUN and dietary CP concentration (**MUN-DCP**), and MUN:PROT and DCP (**MUN:PROT-DCP**) of diets from a database of commercial farm records, and ii) to better understand how other dietary factors can affect such relationships between MUN-DCP or MUN:PROT-DCP. Our hypothesis was that results under commercial condition would confirm the relationships between MUN-DCP and MUN:PROT-DCP observed under experimental conditions.

The database from Valacta (Dairy Production Centre of Expertise, Québec and Atlantic Provinces, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada) for the years 2009 to 2011 was used. Feed ingredients were grouped into 13 categories: legume silage, grass silage, pasture, corn silage, cracked corn, ground and flacked corn, high moisture shelled corn, cereals, other energy supplements, protein sources with more than 50% of RDP, protein sources with less

than 50% of RDP, fat supplements and others (i.e. minerals, vitamins and additives). To avoid breed effect, records were limited to Holstein cows. Weighed means for milk parameters were calculated for each herd and by feed management group (**FMG**) assigned within the herd (for most herds 1 = first portion of the lactation or single grouping, and 2 = second portion of the lactation). Amounts of offered feed ingredients were also average by FMG for each herd. Coefficients of correlations were calculated within herds over the 36-month period between MUN or MUN:PROT and dietary variables using the CORR procedure of SAS (SAS Institute, 2011). The highest correlation between MUN or MUN:PROT and dietary variables was with CP percentage ($r = 0.17$ and 0.25 ; $P < 0.001$, respectively). However, the wide range of responses for the correlations between MUN-DCP or MUN:PROT-DCP (-0.99 to 0.99 ; Figure 4.1) was unexpected. Strong positive relation are usually reported in the literature for MUN-DCP (Nousiainen et al., 2004; Spek et al., 2013). As the results were different than reported in the literature, groups of 100 herds/category were selected from the database according to their correlations results: herds with the high negative (NEG) correlations ($r < -0.43$ and $r < -0.34$ for MUN-DCP and MUN:PROT-DCP, respectively), and herds with the high positive (POS) correlations ($r > 0.69$ and $r > 0.74$ for MUN-DCP and MUN:PROT-DCP). Data were analyzed with the GLIMMIX procedure of SAS (SAS Institute, 2011) with sample type (a.m., p.m. and pooled sample) as a covariate. Differences between categories were declared significant when P values were ≤ 0.05 , and tendencies were noted when $0.05 < P < 0.10$.

In the current study, MUN was on average 0.72 mg/dL higher in the p.m. sampling than in the a.m. sampling. A similar difference was reported by Godden et al. (2001a), whereas a greater difference (1.0 mg/dL) was observed by Wattiaux et al. (2005). It has been suggested that differences between sampling times are explained by higher MUN from 3 to 5 hours after a meal which can be related to the sampling time in relation to feeding and milking time (Spek et al., 2013).

The investigation to better understand differences between herds with the high positive correlations and the high negative correlations resulted in few differences for milk composition (Table 4.1), and dietary variables (Table 4.2). There was no differences in milk yield. However, in FMG 1, milk fat concentration tended to be lower ($P = 0.07$) and was lower ($P < 0.01$) in POS herds compared with NEG herds for MUN-DCP and MUN:PROT-DCP categories, respectively (Table 4.1). No difference was found in milk protein concentration for MUN-DCP category, but a tendency ($P = 0.09$) for lower protein concentration in the MUN:PROT-DCP category for POS herds as compared with NEG herds. Still in FMG 1, MUN and MUN:PROT were higher for herds in the POS group than herds in the NEG group for both MUN-DCP and MUN:PROT-DCP categories (Table 4.1). For FMG 2, no differences were found in milk composition.

Studies have reported that MUN is positively related to CP, RDP and RUP and that it is negatively related with NFC (Godden et al., 2001b; Aguilar et al., 2012). These nutritive parameters were not different between POS and NEG groups for MUN-DCP categories (Table 4.2). For MUN:PROT-DCP categories, CP concentration of the diets were greater for POS than NEG in FMG 1, but lower in FMG 2. Rumen degradable protein and RUP followed similar trends as CP.

In FMG 2, the quantity offered of cracked corn was lower for POS than for NEG group of herds for both MUN-DCP and MUN:PROT-DCP categories (Table 4.2). Similarly, the amount of high moisture shelled corn offered for the POS was higher than for the NEG group in FMG 1 for the MUN-DCP categories.

More differences in diet compositions were observed for MUN:PROT-DCP categories (Table 4.2). For the FMG 1 and 2, respectively, the quantity offered of legume silage was or tended to be lower in the POS group than in the NEG group. More grass silage was offered in the POS group than in the NEG group in FMG 1. In both FMG, cows from herds in the POS group received more protein sources $> 50\%$ RDP than those from herds in

the NEG group. As well, in FMG 2, less protein sources < 50% RDP was offered in the diet of POS group compared to NEG group. These results suggest that MUN:PROT ratio has a stronger positive relation with dietary CP when protein are supplied as concentrates protein sources instead of forages. However, knowing that intakes are more difficult to evaluate under commercial conditions (Vallimont et al., 2010) and that the changes in forage composition are greater than those of concentrates, these results could also point to a lack of precision for the data concerning forages intake and composition in the dataset.

In conclusion, the results from this study did not confirmed the previously observed positive correlations between MUN-DCP or MUN:PROT-DCP within dairy herds. No variation in diet parameters can clearly explain why some herds showed a strong positive correlation, while others had a strong negative correlation between MUN-DCP. For MUN:PROT ratio, results of this study point to a stronger positive relationship between this ratio and CP concentration of diet for farms relying more on the addition of protein concentrate sources instead of legume forages. However, these results could also suggest that our database may not have been as reliable for variation in forage composition and intake as it was for variation in concentrate feeds. Thus, more studies are needed to evaluate the reliability of datasets build from DHI or survey when they are used to better understand specific nutritional relationship.

4.4 Acknowledgments

This study was funded through Industrial Research Chair program of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (Ottawa, ON, Canada), with industry contributions from the Dairy Farmers of Canada (Ottawa, ON, Canada), Novalait Inc. (Québec, QC, Canada), Les Producteurs de Lait du Québec (Longueuil, QC, Canada), and the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (Québec, QC, Canada). The authors thank Valacta (Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada) for access to its database and data extraction.

4.5 References

- Aguilar, M., M. D. Hanigan, H. A. Tucker, B. L. Jones, S. K. Garbade, M. L. McGilliard, C. C. Stallings, K. F. Knowlton, and R. E. James. 2012. Cow and herd variation in milk urea nitrogen concentrations in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:7261-7268. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5582>.
- Broderick, G. A., and M. K. Clayton. 1997. A statistical evaluation of animal and nutritional factors influencing concentrations of milk urea nitrogen. *J. Dairy Sci.* 80:2964-2971. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76262-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76262-3).
- Godden, S. M., K. D. Lissemore, D. F. Kelton, K. E. Leslie, J. S. Walton, and J. H. Lumsden. 2001a. Factors associated with milk urea concentrations in Ontario dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84:107-114. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74458-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74458-X).
- Godden, S. M., K. D. Lissemore, D. F. Kelton, K. E. Leslie, J. S. Walton, and J. H. Lumsden. 2001b. Relationships between milk urea concentrations and nutritional management, production, and economic variables in Ontario dairy herds. *J. Dairy Sci.* 84:1128-1139. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74573-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74573-0).
- Huhtanen, P., E. H. Cabezas-Garcia, S. J. Krizsan, and K. J. Shingfield. 2015. Evaluation of between-cow variation in milk urea and rumen ammonia nitrogen concentrations and the association with nitrogen utilization and diet digestibility in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 98:3182-3196. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8215>.
- Nousiainen, J., K. J. Shingfield, and P. Huhtanen. 2004. Evaluation of milk urea nitrogen as a diagnostic of protein feeding. *J. Dairy Sci.* 87:386-398. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73178-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73178-1).
- Patton, R. A., A. N. Hristov, and H. Lapierre. 2014. Protein feeding and balancing for amino acids in lactating dairy cattle. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 30:599-621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cvfa.2014.07.005>.
- Rajala-Schultz, P. J., W. J. A. Saville, G. S. Frazer, and T. E. Wittum. 2001. Association between milk urea nitrogen and fertility in Ohio dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84:482-489. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)74498-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74498-0).
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/StatR 9.3 User's Guide. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- Spek, J. W., J. Dijkstra, G. Van Duinkerken, and A. Bannink. 2013. A review of factors influencing milk urea concentration and its relationship with urinary urea excretion in lactating dairy cattle. *J. Agr. Sci.* 151:407-423. <http://doi:10.1017/S0021859612000561>.
- Wattiaux, M. A., and P. M. Crump. 2014. Exploring milk urea-N excretion as a nutritional and environmental management tool for the dairy industry. *J. Anim. Sci.* 92, E-Suppl. 2/*J. Dairy Sci.* 97, E-Suppl. 1:350. (Abstr.)

- Wattiaux, M. A., E. V. Nordheim, and P. M. Crump. 2005. Statistical evaluation of factors and interactions affecting dairy herd improvement milk urea nitrogen in commercial Midwest dairy herds. *J. Dairy Sci.* 88:3020-3035. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72982-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72982-9).
- Wood, G. M., P. J. Boettcher, J. Jamrozik, G. B. Jansen, and D. F. Kelton. 2003. Estimation of genetic parameters for concentrations of milk urea nitrogen. *J. Dairy Sci.* 86:2462-2469. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73840-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73840-5).

Table 4.1 Milk yield and composition by feeding management groups for 100 herds with a positive correlation in comparison to 100 herds with a negative correlation between MUN or MUN:PROT ratio and dietary crude protein (DCP)

Item	MUN-DCP ¹				MUN:PROT-DCP ²			
	POS	NEG	SE	P- value	POS	NEG	SE	P -value
<i>Feed management group 1³</i>								
Milk production, kg/d	32.0	31.8	0.46	0.80	32.4	31.9	0.45	0.36
Milk fat, %	3.81	3.88	0.03	0.07	3.79	3.89	0.03	0.01
Milk protein, %	3.20	3.19	0.02	0.88	3.18	3.22	0.02	0.09
MUN, mg/dL	10.9	10.1	0.21	0.01	11.0	10.1	0.20	<0.001
MUN:PROT ⁴	3.47	3.23	0.07	0.01	3.52	3.20	0.07	<0.001
<i>Feed management group 2³</i>								
Milk production, kg/d	21.8	22.2	0.41	0.51	22.4	22.6	0.38	0.69
Milk fat, %	4.10	4.13	0.03	0.54	4.08	4.14	0.04	0.29
Milk protein, %	3.53	3.55	0.02	0.95	3.53	3.54	0.02	0.59
MUN, mg/dL	9.93	10.0	0.25	0.79	10.1	9.84	0.23	0.49
MUN:PROT	2.87	2.85	0.07	0.11	2.90	2.82	0.07	0.42

¹Positive (POS) and negative (NEG) correlations between MUN and dietary crude protein.

²Positive (POS) and negative (NEG) correlations between MUN:PROT and dietary crude protein.

³Feed management group: 1 = first portion of the lactation or single grouping, and 2 = second portion of the lactation.

⁴Calculated as mg urea-N/g milk protein.

Table 4.2 Diet chemical composition and feedstuff categories by feeding management groups for 100 herds with a positive correlation in comparison to 100 herds with a negative correlation between MUN or MUN:PROT ratio and dietary crude protein (DCP)

Variable	MUN-DCP ¹				MUN:PROT-DCP ²			
	POS	NEG	SE	<i>P</i> value	POS	NEG	SE	<i>P</i> value
<i>Feed management group 1³</i>								
CP, % of DM	16.9	16.8	0.09	0.29	16.9	16.5	0.08	0.01
RDP, % of DM	11.1	11.1	0.09	0.58	11.1	10.9	0.08	0.10
RUP, % of DM	5.72	5.68	0.06	0.53	5.76	5.66	0.06	0.19
NFC, % of DM	37.8	37.5	0.36	0.54	37.6	37.7	0.39	0.86
<i>Feed ingredients categories, kg DM/d</i>								
Legume silage	2.85	2.99	0.36	0.78	2.26	3.32	0.33	0.02
Grass silage	7.36	7.05	0.41	0.59	7.53	6.46	0.39	0.05
Corn silage	2.41	2.45	0.24	0.91	2.71	2.83	0.25	0.74
Cracked corn	1.34	1.94	0.23	0.06	1.21	1.59	0.22	0.21
Ground and flaked corn	0.71	0.70	0.16	0.95	0.67	0.89	0.17	0.35
High moisture shelled corn	2.0	1.3	0.26	0.05	1.61	1.44	0.26	0.66
Cereals	0.56	0.79	0.13	0.20	0.68	0.75	0.15	0.74
Other energy supplements	0.13	0.05	0.06	0.29	0.13	0.03	0.06	0.21
Protein sources >50% RDP	4.70	4.22	0.31	0.27	5.18	3.70	0.30	<0.001
Protein sources < 50% RDP	0.64	0.75	0.09	0.38	0.60	0.79	0.08	0.12
Fat supplements	0.038	0.044	0.01	0.65	0.037	0.052	0.01	0.24
Pasture	0.50	0.61	0.15	0.56	0.36	0.49	0.13	0.46
Others	0.62	0.77	0.24	0.65	0.64	1.30	0.29	0.11
<i>Feed management group 2³</i>								
CP, % of DM	16.4	16.2	0.12	0.22	16.0	16.4	0.01	0.01
RDP, % of DM	11.1	11.2	0.11	0.52	10.9	11.2	0.11	0.08
RUP, % of DM	5.17	5.26	0.06	0.25	5.09	5.28	0.06	0.04

NFC, % of DM	35.4	35.4	0.42	0.93	35.5	35.1	0.43	0.56
Feed ingredients categories, kg DM/d								
Legume silage	2.88	2.72	0.40	0.77	2.23	3.15	0.38	0.08
Grass silage	7.70	7.60	0.44	0.86	7.78	6.95	0.41	0.16
Corn silage	1.81	1.68	0.23	0.68	2.27	2.01	0.26	0.48
Cracked corn	1.00	1.68	0.21	0.02	0.86	1.39	0.19	0.05
Ground and flaked corn	0.39	0.28	0.10	0.45	0.39	0.38	0.11	0.93
High moisture shelled corn	1.33	0.95	0.24	0.27	1.10	0.99	0.24	0.73
Cereals	0.64	1.00	0.15	0.09	0.78	0.99	0.16	0.36
Other energy supplements	0.13	0.01	0.05	0.12	0.12	0.01	0.06	0.16
Protein sources >50% RDP	3.35	2.91	0.26	0.22	3.81	2.74	0.26	<0.01
Protein sources < 50% RDP	0.37	0.48	0.07	0.26	0.28	0.50	0.06	0.01
Fat supplements	0.0057	0.0059	0.003	0.97	0.011	0.008	0.004	0.57
Pasture	0.55	0.58	0.16	0.88	0.47	0.56	0.15	0.68
Others	0.51	0.73	0.24	0.52	0.36	1.06	0.26	0.07

¹Positive (POS) and negative (NEG) correlations between MUN and dietary CP.

²Positive (POS) and negative (NEG) correlations between MUN:PROT and dietary CP.

³Feed management group: 1 = first portion of the lactation or single grouping, and 2 = second portion of the lactation.

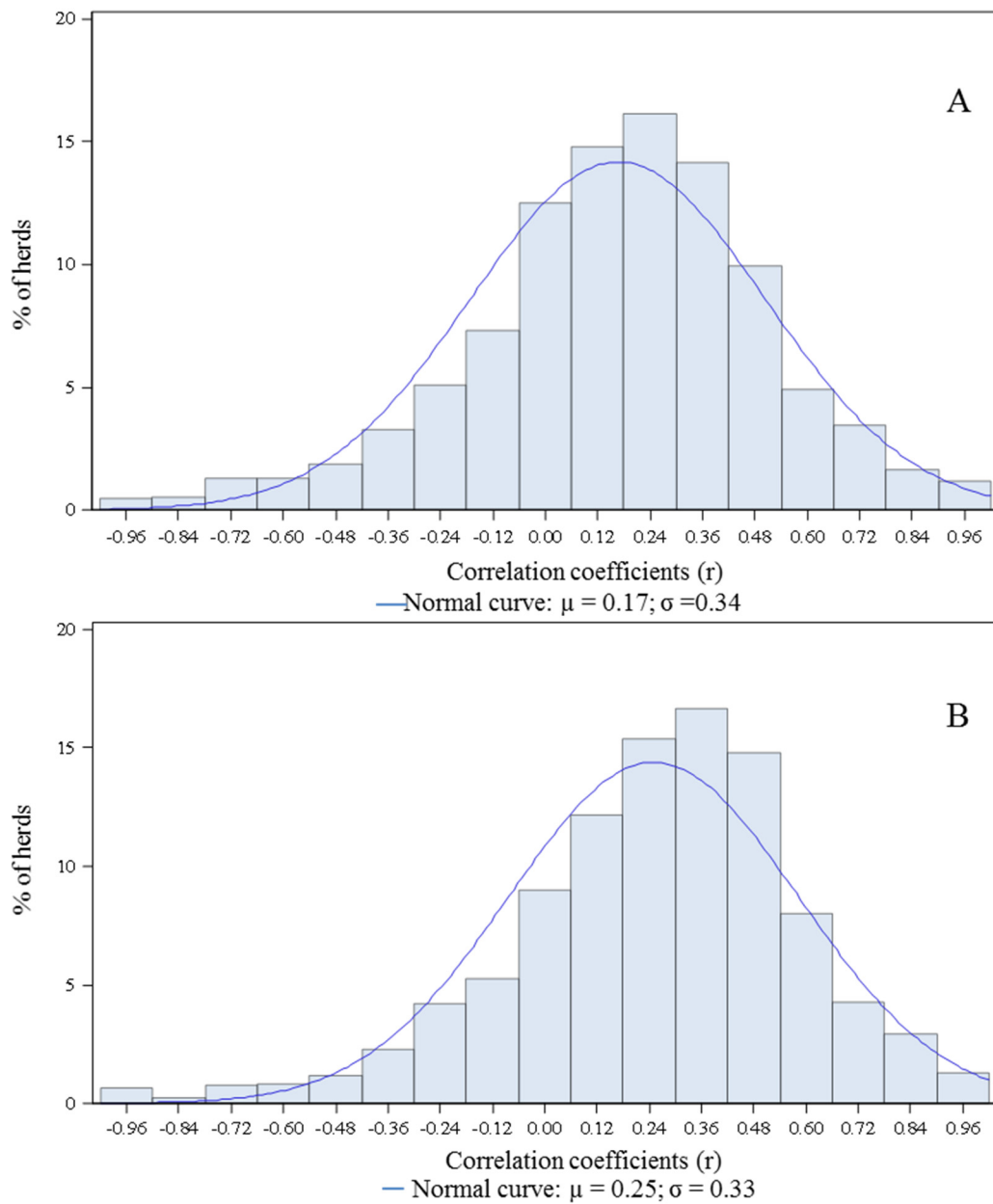


Figure 4.1 Distribution of the correlation within herds between MUN (A) or MUN: milk protein (B) and dietary CP over 36 months (n = 1,903 herds).

Chapitre V

5 Nitrogen efficiency of commercial dairy herds: impact on production performance and farm profitability

Ce chapitre à été soumis pour publication dans la revue Journal of Dairy Science

5.1 Résumé

Après avoir collecté des données sur cent fermes et avoir regroupé ces dernières en fonction de l'efficacité d'utilisation de l'azote des vaches de leur troupeau, l'objectif de cette étude était de caractériser les facteurs qui étaient différents entre les groupes de fermes. Les résultats de cette analyse montrent que les groupes avec les plus hautes efficacités d'utilisation de l'azote ont des concentrations moindres de protéine brute dans leurs rations ainsi qu'une prise alimentaire moyenne plus basse et une production laitière moyenne plus élevée par vache. En plus de leur impact positif sur l'environnement, ces troupeaux avaient en moyenne une plus grande marge sur coûts d'alimentation par vache, démontrant aussi un intérêt économique à une plus grande efficacité d'utilisation de l'azote.

Mots clés : Efficacité d'utilisation d'azote, troupeaux laitiers, analyse en grappes

5.2 Abstract

Nitrogen efficiency (milk N/dietary N; **NE**) can be used as a tool for the nutritional, economic and environmental management of dairy farms. The aim of this study was to identify the characteristics of herds with varying NE and assess the impact on farm profitability. One hundred dairy herds comprising on average 42 ± 18 cows in lactation, and located in Québec, Canada, were visited from October 2014 to June 2015. Feed intake was measured over 24 h. Samples of each feedstuff were taken and sent to a commercial laboratory for analysis of chemical composition. Feeding management and feed prices were recorded. Milk yield was recorded and milk samples were collected over two consecutive milkings. Fat, protein, and milk urea nitrogen were analyzed. Balances of metabolizable protein (MP supply - MP requirements) and rumen degradable protein (RDP supply - RDP requirement) were calculated according to NRC (2001). A hierarchical cluster analysis was conducted and allowed grouping the farms by their NE. Four clusters were identified with an average NE of 22.1 (**NE22**), 26.9 (**NE27**), 30.0 (**NE30**) and 35.8% (**NE36**). Herds in clusters NE30 and NE36 were fed diets with greater concentrations of starch, net energy for lactation and nonfiber carbohydrates than those in the other two clusters. Moreover, the average proportion of corn silage was lower for herds in cluster NE22 compared with NE30 and NE36 (8.23 vs. 31.8 and 31.3% of total forages, respectively). In addition, crude protein of the diets declined from an average of 16.0 to 14.9% with increasing NE among clusters. Average dry matter intake declined from 26.1 to 22.5 kg/d as NE of clusters increased. Herds in cluster NE22 had reduced yields of milk (28.7 vs. 31.8 kg/d), fat (1.15 vs. 1.29 kg/d), and protein (0.94 vs. 1.05 kg/d) than the other clusters. Also, milk urea nitrogen was greater for farms in cluster NE22 (13.2 mg/dL) than in the other clusters (11.4 mg/dL). Furthermore, MP and RDP balances decreased from 263.2 to -153.7 g/d and from 594.7 to 486.9 g/d, respectively, with increasing NE among clusters. Income over feed cost increased from \$14.3 to \$17.3/cow per day (Can\$) as NE among clusters augmented. Results from this study showed that some farms were able to achieve high NE by using lower levels of dietary N and having cows with

lower DMI, while maintaining milk performance. These farms had a potentially lower environmental impact, and they were also more profitable.

Key words: nitrogen efficiency, commercial dairy farms, cluster analysis, income over feed cost

Rapport-Gratuit.com

5.3 Introduction

Nitrogen excretion is directly related to N intake (Rotz, 2004). Studies have shown that diets with different concentrations of CP had similar excretions of fecal N but differ in urea N excretion (Olmos Colmenero and Broderick, 2006a; Edouard et al., 2016). Urea is the main N component in urine (i.e. 50 to 90%) and has the highest potential for N volatilization (Bussink and Oenema, 1998). Therefore, reducing N intake is the major strategy to reduce N excretion and counteract N pollution (Dijkstra et al., 2011; Hristov et al., 2011). Thus, N management is an important challenge to reduce environmental pollution without impairing animal performances. Nitrogen efficiency (milk N secretion/dietary N intake; **NE**) can be used as a tool for environmental and feeding managements in dairy herds. In addition, it was suggested that improving NE may also enhance farm profits (Powell et al., 2010), which is advantageous for the producers.

Under commercial conditions NE has been shown to be lower and more variable than under experimental conditions (Powell et al., 2010), suggesting that improvement in feeding practices can be achieved. In commercial settings, NE was around 28%, and ranged between 18 to 35% (Jonker et al., 2002a; Powell et al., 2006; Gourley et al., 2012), whereas under experimentally controlled conditions mean NE was 27% and ranged between 23 to 36% (Chase, 2003; Olmos Colmenero and Broderick, 2006b). The principal dietary factor affecting NE is dietary CP concentration (Huhtanen and Hristov, 2009), where an increase in CP will negatively affect NE. Olmos Colmenero and Broderick (2006b) reported a reduction of 5.4 percentage units in NE by increasing CP in the diet from 16.5 to 19.4%. Another study also reported a reduction of NE from 27 to 24% by increasing CP in the diet from 16.7 to 18.4% (Broderick, 2003). In these studies the modifications in dietary CP concentration did not affect milk production or the yields of milk fat and protein.

Another strategy to improve NE is to enhance animal performance by increasing dietary energy (Broderick, 2003; Rotz, 2004). In this regard, a major challenge of feeding

protein is to provide the right amount with the proper degradation characteristics, and supply enough available energy to maximize animal performance while reducing N excretion at minimum cost (Rotz, 2004). Therefore, we hypothesized that dairy herds could be characterized by their NE and that differences in animal performance and feeding strategies would exist among groups. Thus, the objective of this study was to identify the characteristics of commercial lactating herds with varying NE and assess its impact on farm profitability under commercial conditions.

5.4 Materials and methods

5.4.1 Data collection

All experimental procedures of this study were approved by the Animal Care Committee from Université Laval, QC, Canada following the guidelines of the Canadian Council on Animal Care (2009). One hundred dairy farms located in the province of Québec, Canada, were recruited. To be eligible for participation, farms had to be enrolled with the milking recording system of Valacta (Dairy Production Centre of Expertise, Québec and Atlantic Provinces, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, Canada). Herds were composed of Holstein cows. Producers were contacted by phone and their participation was voluntary. Herd size ranged from 16 to 113 cows in lactation. Among them, 98 herds were housed in tie-stall barns whereas the remaining 2 herds were kept in free stalls. All cows were milked twice a day. Farms were visited at the times of feeding and milking to cover a production period of 24 h, from October 2014 to June 2015. Visits were scheduled to coincide with the regular monthly DHI test.

In the first morning, orts were discarded and feeds offered were weighed for individual cows or group of cows in lactation depending on the farm feeding system (manual component feeding (MCF), component feeding with automatic feeding system (AFS), and TMR). When forages were fed as bales of silage or hay, bales were weighed with an

electronic scale (OCSB3 Compact Crane Scale, Anyload Transducer Co. Ltd., Burnaby, BC, Canada). For concentrate feeds, if they were fed manually, the quantities were weighed before they were offered to the cows. When an AFS was used on the farm, the quantities of feeds offered were recorded as programmed in the system. To ensure the accuracy of AFS measurements, a validation was performed by weighing once the amount of available feeds served at the farm and were compared with the programmed quantity. When feeds were fed as TMR, the quantities offered were recorded from the scale of the mixing system. The amount of TMR offered to at least 10 cows was weighed for validation. Orts were weighed and sampled before or after the a.m. milking of the second day, according to individual feeding management practices.

Samples of all individual feedstuffs and TMR were taken and frozen at -20°C. Additional silage samples were taken and sent to Valacta laboratory for determination of pH, NH₃-N and organic acid profile by near-infrared spectroscopy.

The feedstuff samples were oven-dried at 55°C for 48 h to determine DM, ground through a 1-mm sieve, and analyzed for nutrient composition by wet chemistry in a commercial laboratory (SGS Agrifood Laboratories, Guelph, ON, Canada). The NDF of Orts were analyzed using the Ankom filter bag technique (ANKOM Technology method 6: NDF in feeds-filter bag technique for A200; solutions as in Van Soest et al. 1991).

During p.m. and next a.m. milkings, milk yield from each cow was recorded and milk was sampled using in-line milk meters. Samples were stored at 4°C with a preservative (2-bromo-2-nitropan-1,3-diol), and sent to Valacta laboratory for analyses of fat, protein, lactose, MUN, SCC, and BHB. Analyses were performed using a Foss MilkoScan FT 6000 for infrared evaluation of milk component, combined with a Fossomatic FC for SCC analysis (Foss Electric A/S, Hillerød, Denmark). The calibrations for BHB infrared analyses were developed with a continuous flow analyzer (San⁺⁺ Automated Wet Chemistry Analyzer,

Skalar, Breda, the Netherlands) as described by Denis-Robichaud et al. (2014) and de Roos et al. (2007).

Body weight of all lactating cows was estimated from heart girth circumference according to Yan et al. (2009) in the morning of the first day. Data for DIM, parity, and genetic parameters were obtained from Valacta. A data logger (HOBO U23 Pro v2, Onset Computer Corporation Bourne, MA) was installed in the barn to measure the ambient temperature and the relative humidity continuously during the visit (i.e. every 10 min). Feeding system, numbers and frequency of feeding, milking intervals, health problems, and price of feedstuffs were noted when applicable.

5.4.2 Calculations

Dry mater intake of lactating cows was calculated from the quantities of feeds offered minus the refusals. Diet composition for each cow ($n = 4,226$) was then calculated using the results of chemical analyzes and the amount eaten per cow for each feed using the SQL procedure of SAS (SAS Institute, 2011). To consider sorting, the amount of concentrates and forages in refusals were calculated using their average NDF concentration. Expected DMI was calculated as $[(0.372 \times \text{FCM} + 0.0968 \times \text{body weight}^{0.75} \times (1 - e^{(-0.192 \times (\text{week of lactation} + 3.67))})]$ for cows in early lactation (i.e. $\text{DIM} < 99$) and $[(0.372 \times \text{FCM} + 0.0968 \times \text{body weight}^{0.75}]$ for the remaining of the lactation (NRC, 2001). Dry matter intake, diet composition and milk yield were averaged by herd. Milk composition was also averaged by herd, proportionally to cow milk production.

Nitrogen efficiency was defined as the percentage of intake N that is converted in N in milk and it was calculated as $[100 \times \text{milk N secretion} / \text{dietary N intake}]$, assuming that milk protein contains 6.38% N (DePeters et al., 1992; NRC, 2001). Milk energy concentration (Mcal/kg) was calculated as $[(0.0929 \times \text{fat} (\%)) + (0.0547 \times \text{protein} (\%) / 0.93) + (0.0395 \times \text{lactose} (\%))]$ according to the NRC (2001). Energy efficiency was calculated as

[$100 \times \text{milk energy concentration (Mcal/kg)} \times \text{milk yield (kg/d)} / \text{NEL intake (Mcal/d)}$]. Fat corrected milk (4%) was calculated as [$0.4 \times \text{milk yield (kg/d)} + 15 \times \text{fat yield (kg/d)}$] (Gaines, 1928; NRC, 2001). The MUN:protein ratio was calculated as [$\text{MUN yield (mg/d)} / \text{milk protein yield (g/d)}$] (Wattiaux and Crump, 2014). In addition, MP and RDP balances (supply - requirements) were calculated according to NRC (2001). Ambient barn temperature and relative humidity were averaged by herd and were used to calculate the temperature-humidity index according to Kendall et al. (2008).

Total feed cost per farm for lactating cows was calculated by adding the cost of purchased ingredients to the cost of production of homegrown cereals, pulses, oilseeds and forages. The actual price paid by each farmer for purchased feeds were recorded. For the homegrown feeds, the average provincial production cost for the year 2015 was used (Les producteurs de grain du Québec, 2016; Valacta, 2015). An average of milk component prices for 2015 was used to calculate milk price by farm according to its composition (Les producteurs de lait du Québec, 2016). Milk price was then discounted for the 2015 average deductions for hauling and marketing. Also, bonuses for low bacterial count and SCC, and a bonus or a penalty for non-fat solids to fat ratio, according to their average for the year 2015, were calculated per farm. Income over feed cost (**IOFC**, Can\$/cow/d) was calculated for each herd as [$\text{milk price (\$/kg)} \times \text{milk yield (kg/d)} - \text{feed cost (\$/kg)} \times \text{feed intake (kg/d)}$].

5.4.3 Data Analysis

Herds were grouped according to their NE using the CLUSTER procedure of SAS (SAS Institute, 2011). The Wards method was used, which minimize the within-group sum of squares (Borcard et al., 2011). Based on pseudo T-squared, pseudo F, cubic clustering criterion and R-square statistics, 4 clusters were identified as the optimal number to describe the distribution of NE calculated for the 100 herds of this study. The 4 groups formed accounted for 88% of the variation. This clustering was in accordance with the tree plot (Figure 5.1).

To identify differential characteristics between clusters, the following variables were tested: (1) Diet and feed related variables including CP, soluble CP, RDP, RUP, MP balance, RDP balance, ADF, NDF, lignin, neutral detergent insoluble CP, acid detergent insoluble CP, NFC, TDN, starch, fat, NEL, silage fermentation profile (ammonia, lactic acid, acetic acid, butyric acid, and total VFA), IOFC, percentage of each forage type within the forage portion of the diet (i.e. baled silage, chopped silage, and corn silage), daily feeding frequency, and farm feeding systems (i.e. MCF, AFS, and TMR); (2) Animal performance including BW, DMI, yields of milk, FCM, fat, protein and lactose, concentrations of milk fat, protein, lactose, urea-N, BHB and energy, MUN:protein, energy efficiency, and difference between expected and actual DMI; (3) Animal dependent variables including DIM, and EBV for milk yield as well as milk protein concentration and yield. Percentages of forage type within the forage portion of the diet were transformed (arc sine square root) to meet homogeneity of variance criteria. The difference among clusters for these variables were analyzed using the GLIMMIX procedure of SAS (SAS Institute, 2011) with the Tukey-Kramer adjustment for multiple comparisons. Differences between clusters were declared significant when P values were ≤ 0.05 , and tendencies were noted when $0.05 < P < 0.10$.

5.5 Results and discussion

The number of cows in lactation per herd was (average \pm SD) 42.3 ± 18.0 , ranging from 16 to 113 cows. The provincial average for herd size followed by the DHI agency was 60.7, among which 87.4% of cows are in lactation (Valacta, 2016). The cluster analysis classified the 100 herds in 4 distinct groups according to their NE. The less efficient group had a NE of 22.1 ± 1.88 % (**NE22**). The 20 farms in this cluster had, on average, 32 cows in lactation. Among them 11 farms used AFS, 7 farms used MCF, and 2 farms used TMR. The next cluster had a NE of 26.9 ± 0.99 % (**NE27**), and comprised 31 farms with an average of 41 cows in lactation. Among them, 19 farms used AFS, 7 farms used TMR, and 5 farms used MCF. The third cluster had a NE of 30.0 ± 0.96 % (**NE30**). This cluster comprised 31 farms with an average herd size of 49 cows in lactation. Their feeding system was predominantly

TMR and AFS (15 and 13, respectively), whereas the remaining 3 farms used MCF. The highest NE was $35.8 \pm 2.76\%$ (NE36); this cluster comprised 18 farms, with an average of 47 cows in lactation. The type of feeding system was evenly distributed with 5 farms using MCF, 6 farms using AFS, and 7 farms using TMR. The NE was significantly different between each cluster ($P < 0.001$). There was a tendency for a difference in the occurrence of different feeding systems among clusters ($P = 0.06$; data not shown), and there was no difference in the feeding frequency (3.7 ± 1.4 daily feed distributions, $P = 0.14$; data not shown).

In this study, the average NE was of 29%, ranging from 19 to 40% among farms. Other studies under commercial conditions, representing a broad range of management practices in different countries, reported NE between 15 and 35% (Arriaga et al., 2009; Gourley et al., 2012). This great variability in NE among commercial herds observed in the current study was also reported by Powell et al. (2010). It confirmed the potential for improving the NE of several commercial dairy herds.

The yields of milk, FCM, fat, protein and lactose were lower ($P < 0.01$) for the NE22 cluster than in the other clusters (Table 5.1). There was a tendency for greater protein concentration in the milk produced by herds in NE30 than in NE27 cluster, whereas intermediate values were observed for clusters NE22 and NE36. However, fat, lactose and BHB concentrations in milk did not differ among clusters.

Milk urea nitrogen was the greatest in NE22, intermediate in NE30, and the lowest in NE27 and NE36 clusters (Table 5.2). The same pattern was seen for the MUN:protein ratio. Although differences in MUN and in MUN:protein ratio were observed among clusters, these indicators did not reflect perfectly NE nor dietary CP (Table 5.2). Arriaga et al. (2009) reported that bulk tank MUN was not an accurate estimator for NE in commercial settings. Under experimental conditions, MUN has been highly associated with NE and dietary CP level (Broderick and Clayton, 1997; Nousiainen et al., 2004), although it can be influenced

also by NFC concentration (Hristov and Ropp, 2003). Using MUN as a monitoring tool was proven successful when attempting to reduce excess dietary CP in commercial farms (Jonker et al., 2002b). However due to variations in MUN related to cow-related characteristics (Huhtanen et al., 2015), management factors (Wattiaux et al., 2005) and possibly genetics (Aguilar et al., 2012), industry standard are likely to be replaced with farm-specific target MUN values in the future. In our study the lack of a perfect concordance between MUN and NE (Table 5.1) and between MUN and dietary CP (Table 5.2) may have been due in part to the small difference in NE between the two intermediate groups (NE27 and NE30). Further studies are needed to fine-tune MUN or related variables such as MUN:protein ratio as indicators of NE under commercial situations.

The NE36 cluster had the lowest average DMI with 20.6 kg/d (Table 5.2). There was a difference of 5.4 kg/d in average DMI between NE22 and NE36 clusters, whereas NE27 and NE30 clusters had intermediary values (24.2 and 22.7 kg/d, respectively). The average of DMI for the 100 herds was of 23.5 ± 3.05 kg/d, which was similar to the average calculated using the NRC (2001) formula (23.4 ± 1.45 kg/d; Table 5.2). However, there was a greater variation in observed as compared with calculated DMI. This variability could be explained by the composition and physical characteristics of diets that are not taken into account in the NRC (2001) formula, which only consider animal parameters. The NRC (2001) indicated that 73% of the predicted intake were within $\pm 10\%$ of the observed intake. In our feed ingestion data, 57% of the predicted intake from the NRC were within $\pm 10\%$ of the observed intake. In another study conducted on commercial farms, only 3 of the 11 herds studied had an observed voluntary feed ingestion within a range of $\pm 15\%$ from the calculated DMI according to the NRC (2001) formula (Vallimont et al., 2010). As mentioned by Vallimont et al. (2010), measures of DMI under commercial conditions may not be as accurate as in research station on an individual cow basis, but they remain accurate when evaluated on a group basis. These results point to a high accuracy, but low precision of the NRC (2001) formula to predict DMI under the conditions of the current study. This analysis confirmed the importance of on-farm validation of DMI in order to correctly formulate diets under commercial conditions.

Dietary CP concentrations were different among groups. Farms in the NE36 cluster had the lowest level with 14.2% CP (Table 5.2), followed by the NE30 and NE27 clusters (15.1 and 15.3%, respectively). Finally, the NE22 cluster had the highest dietary CP concentration, with an average of 16.0%. Gourley et al. (2012) evaluated the NE in two types of commercial production systems (grazing and confinement-based), in the United States and Australia, and reported that NE had a negative relationship with N intake. Other studies have also reported that the highest NE is generally obtained at the lowest N intake (Rotz, 2004; Powell et al., 2010). Our results agree with these findings. There was no difference in the RUP between clusters in our study ($5.0 \pm 0.60\%$ of DM), but RDP and soluble CP were lower for the NE36 cluster as compared with NE22 and NE27 clusters (Table 5.2). Results of this study are therefore reinforcing the suggestion by Dijkstra et al. (2011) that a reduction of RDP can be a strategy to increase NE.

Dietary ADF and lignin concentrations were lower for the NE30 and NE36 clusters than for the NE22 cluster (Table 5.2), which may be related to the main source and quality of forages used by the farms in each cluster. There was no significant difference in the percentage of chopped silage, although large numerical variations in the proportion of baled silage was seen (46.4 vs. 18.7% of total forages for NE22 and NE36, respectively; Table 5.2). Corn silage, as a proportion of total forages, was greater in the NE30 and NE36 clusters than in the NE22 cluster (31.8 and 31.3 vs. 8.2 %, respectively). Previous studies had also reported an improvement of NE when corn silage was the main forage of the diet (Hristov et al., 2004) and when corn silage was substituted for alfalfa silage (Brito and Broderick, 2006; Arndt et al., 2015).

Dietary concentrations of NFC were greater in NE30 and NE36 clusters compared with NE22 and NE27 clusters (Table 5.2). Calsamiglia et al. (2010) reported that diets containing less CP and more NFC resulted in greater NE, which agrees with our results. Also, as carbohydrates are the main source of energy for bacteria, they can increase ruminal microbial protein synthesis (Bach et al., 2005) which can improve NE, as seen in this study.

There were also differences in dietary starch concentration between clusters. Herds with the highest NE (i.e. NE30 and NE36) were fed diets containing more starch than the 2 clusters with the lowest NE. No differences were found in the percentage of concentrate in the diet among clusters ($P = 0.96$). Therefore, variation in dietary starch concentrations could come from differences in the proportion of corn silage between clusters. Interestingly, the highest dietary starch concentration (20.3% DM) was in cluster NE36. This level of starch is usually considered as a low (i.e. 20% of DM; Chase, 2007) or a medium (21% of DM; Dann et al., 2014) value in dairy diets.

No differences were found in the fermentation profile of forages ($P \geq 0.43$; data not shown). Similarly, there were no differences in estimated BW of cows ($P = 0.42$) nor in average EBV for milk yield, protein yield or protein concentration ($P \geq 0.26$; data not shown). Finally, there were no differences in the temperature-humidity index among clusters ($P = 0.30$).

The RDP balance declined from 594.8 to 301.8 g/d with increasing NE among clusters (Table 5.2). This result may suggest that there was an excess of RDP in the diets for all groups. Moreover, herds in the top two clusters for NE (NE30 and NE36) were probably better at utilizing RDP in part because of higher amounts of NFC and starch in the diet. The MP balance was negative for NE27, NE30 and NE36 clusters (Table 5.2), which could indicate that the NRC (2001) model may have overestimated the MP requirements for herds in these clusters. In addition, the MP recommendations were met only in the cluster with the lowest NE (NE22), which indicate that the predictive power of the NRC model was limited under the husbandry conditions of dairy herds in the current study.

Dietary concentration of NE_L was greater in NE30 and NE36 clusters as compared with NE22 and NE27 clusters (Table 5.2). Moreover, energy efficiency was different for all clusters and varied in the same direction as NE (Table 5.2). Results indicated that energy efficiency and NE of dairy herds were highly correlated ($r = 0.82$; Figure 5.2). This

relationship was expected, given that the farms in clusters with superior NE had greater average milk yield with lower average DMI (Table 5.1 and 5.2). In addition, differences between expected and actual intake were greater as NE increased ($P < 0.001$; Table 5.2). The clusters with lower NE (NE22 and NE27) had negative differences (-3.44 and -0.89 kg/d, respectively), which mean that the actual intake of cows in these clusters was greater than expected using the NRC (2001) formula. On the contrary, the actual intake of cows in the other two clusters (NE30 and NE36) was lower than expected (1.01 and 3.34 kg/d, respectively). Cows with low DMI may have slower rate of passage of digesta, which would contribute to increasing DM digestibility (Colucci et al., 1982) and enhance nutrient utilization.

Genetic sources of variation in cow DMI have been investigated (Veerkamp and Brotherstone, 1997; Li et al., 2014). Dairy cattle may also differ genetically for their feed efficiency which can be assessed by the concept of residual feed intake (**RFI**). Divergence between lactating animals was previously established by Connor et al. (2013) who found that cows with low RFI (high efficiency; > 0.5 SD below the mean RFI) consumed on average 3.7 kg/d less DM compared with cows with high RFI (low efficiency; > 0.5 SD above the mean RFI) without affecting their milk yield. Similar results were reported by Macdonald et al. (2014) where first parity cows selected at a young age for low RFI ate on average 0.46 kg/d less than cows selected for high RFI without affecting animal production. However, the genetic variability between herds related to DMI or RFI could not be assessed in the current study.

Finally, our results show that IOFC increased from 14.3 to 18.2\$/cow/d as the NE of clusters increased (Table 5.2). Phuong et al. (2013) mentioned that the cost coming from milk lost due to feeding low dietary crude protein is much greater than the cost of feeding high dietary protein. Our results showed the contrary. In the current study, it was shown that increasing NE reduced the risk of N pollution and enhanced economic benefits, which confirmed the observations reported by Powell et al. (2010).

5.6 Conclusions

By grouping the 100 Québec dairy herds based on their NE, we have been able to identify significant differences in cow performance and feeding strategies which could be potentially implicated in the potency of transfer of dietary N to milk secretion. Among parameters related to animal performance, herds in clusters with the highest NE had lower DMI, but greater milk yield than those in the less efficient clusters. It seems therefore that DMI has a major impact on NE, adding to the interest of studying the concept of RFI in dairy cows. Among dietary factors, lower CP concentrations, and greater dietary NFC and starch mainly from corn silage, were observed in more efficient clusters in comparison to clusters with lower NE. Although MUN did not reflect small differences in NE and dietary CP, it captured the difference between the herds with the lowest NE and highest dietary CP from the herds with the highest NE and the lowest dietary CP. Decreasing RDP and MP balances relative to predicted requirements was also associated with greater NE. These observations suggest that it is possible to achieve greater NE by avoiding excess RDP, in combination with increased supply of rumen available energy sources in the diet. Finally, this study conducted on commercial setting in the province of Québec, Canada, shows the potential to reduce N pollution from lactating herds by improving NE of cows, while providing economic benefits for dairy operations.

5.7 Acknowledgments

This study was funded through the Programme de recherche en partenariat sur la préservation et l'amélioration de la valeur nutritive des aliments en lien avec la santé Fondation des maladies du cœur et de l'AVC et Visez santé (FMC), Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS), Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) et le Fonds de recherche du Québec – Santé (FRQS). And through Industrial Research Chair program of the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (Ottawa, ON,

Canada), with industry contributions from the Dairy Farmers of Canada (Ottawa, ON, Canada), Novalait Inc. (Québec, QC, Canada), Les Producteurs de Lait du Québec (Longueuil, QC, Canada), and the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (Québec, QC, Canada). The authors thank Christiane Girard at Agriculture and Agri-Food Canada (Sherbrooke, QC, Canada) for her participation in this project and Roxane Robichaud, Valérie Audet, and Isabelle Duval, Université Laval (Québec, QC, Canada) for help in data collection and sample analysis. The authors would also like to thank the farmers who participated in this study by allowing us access to their farms and all the required information and samples.

5.8 References

- Aguilar, M., M. D. Hanigan, H. A. Tucker, B. L. Jones, S. K. Garbade, M. L. McGilliard, C. C. Stallings, K. F. Knowlton, and R. E. James. 2012. Cow and herd variation in milk urea nitrogen concentrations in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:7261-7268. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5582>.
- Arndt, C., J. M. Powell, M. J. Aguerre, and M. A. Wattiaux. 2015. Performance, digestion, nitrogen balance, and emission of manure ammonia, enteric methane, and carbon dioxide in lactating cows fed diets with varying alfalfa silage-to-corn silage ratios. *J. Dairy Sci.* 98:418-430. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8298>.
- Arriaga, H., M. Pinto, S. Calsamiglia, and P. Merino. 2009. Nutritional and management strategies on nitrogen and phosphorus use efficiency of lactating dairy cattle on commercial farms: An environmental perspective. *J. Dairy Sci.* 92:204-215. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1304>.
- Bach, A., S. Calsamiglia, and M. D. Stern. 2005. Nitrogen metabolism in the rumen. *J. Dairy Sci.* 88(E Suppl.):E9-E21. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73133-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73133-7).
- Borcard, D., G. Francois, and P. Legendre. 2011. *Numerical ecology with R*. Springer, New York, NY.
- Brito, A. F., and G. A. Broderick. 2006. Effect of varying dietary ratios of alfalfa silage to corn silage on production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:3924-3938. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72435-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72435-3).
- Broderick, G. A., and M. K. Clayton. 1997. A statistical evaluation of animal and nutritional factors influencing concentrations of milk urea nitrogen. *J. Dairy Sci.* 80: 2964-2971. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76262-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76262-3).
- Broderick, G. A. 2003. Effects of varying dietary protein and energy levels on the production of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:1370-1381. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73721-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73721-7).
- Bussink, D. W., and O. Oenema. 1998. Ammonia volatilization from dairy farming systems in temperate areas: A review. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 51:19-33. <http://dx.doi.org:10.1023/a:1009747109538>.
- Calsamiglia, S., A. Ferret, C. K. Reynolds, N. B. Kristensen, and A. M. van Vuuren. 2010. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. *Animal* 4:1184-1196. <http://dx.doi.org:10.1017/S1751731110000911>.
- Canadian Council on Animal Care. 1993. *Guide to the care and use of experimental animals*. 2nd ed. Vol. 1. E. D. Rolfert, B. M. Cross, and A. A. McWilliam ed. Can. Council. Anim. Care, Ottawa, Ontario, Canada.
- Chase, L. E. 2003. Nitrogen utilization in dairy cows - what are the limits of efficiency? Pages 233-244 in *Proc. Cornell Nutr. Conf. for Feed Manuf.*, Syracuse, NY. Cornell University, Ithaca, NY.

- Chase, L. E. 2007. Can we feed less starch to our cows? Pages 213-220 in Proc. Cornell Nutr. Conf. for Feed Manuf., Syracuse, NY. Cornell University, Ithaca, NY.
- Colucci, P. E., L. E. Chase, and P. J. Van Soest. 1982. Feed intake, apparent diet digestibility, and rate of particulate passage in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 65:1445-1456. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(82\)82367-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82367-9).
- Connor, E. E., J. L. Hutchison, H. D. Norman, K. M. Olson, C. P. Van Tassell, J. M. Leith, and R. L. Baldwin. 2013. Use of residual feed intake in Holsteins during early lactation shows potential to improve feed efficiency through genetic selection. *J. Anim. Sci.* 91:3978-3988. <http://dx.doi.org/10.2527/jas.2012-5977>.
- Dann, H. M., H. A. Tucker, K. W. Cotanch, P. D. Krawczel, C. S. Mooney, R. J. Grant, and T. Eguchi. 2014. Evaluation of lower-starch diets for lactating Holstein dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:7151-7161. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8341>.
- de Roos, A. P. W., H. van den Bijgaart, J. Hørlyk, and G. de Jong. 2007. Screening for subclinical ketosis in dairy cattle by fourier transform infrared spectrometry. *J. Dairy Sci.* 90:1761-1766. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-203>.
- Denis-Robichaud, J., J. Dubuc, D. Lefebvre, and L. DesCôteaux. 2014. Accuracy of milk ketone bodies from flow-injection analysis for the diagnosis of hyperketonemia in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97:3364-3370. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6744>.
- DePeters, E. J., and J. D. Ferguson. 1992. Nonprotein nitrogen and protein distribution in the milk of cows. *J. Dairy Sci.* 75:3192-3209. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(92\)78085-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)78085-0).
- Dijkstra, J., O. Oenema, and A. Bannink. 2011. Dietary strategies to reducing N excretion from cattle: Implications for methane emissions. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 3:414-422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2011.07.008>.
- Edouard, N., M. Hassouna, P. Robin, and P. Faverdin. 2016. Low degradable protein supply to increase nitrogen efficiency in lactating dairy cows and reduce environmental impacts at barn level. *Animal* 10:212-220. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731115002050>.
- Gaines, W. L. 1928. The energy basis of measuring milk yield in dairy cows. *Tech. Bull. No. 308.* Agric. Exp. Sta., Champaign, IL.
- Gourley, C. J. P., S. R. Aarons, and J. M. Powell. 2012. Nitrogen use efficiency and manure management practices in contrasting dairy production systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147:73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.011>.
- Hristov, A. N., M. Hanigan, A. Cole, R. Todd, T. A. McAllister, P. M. Ndegwa, and A. Rotz. 2011. Review: Ammonia emissions from dairy farms and beef feedlots *Can. J. Anim. Sci.* 91:1-35. <http://dx.doi.org/10.4141/CJAS10034>.
- Hristov, A. N., W. J. Price, and B. Shafii. 2004. A meta-analysis examining the relationship among dietary factors, dry matter intake, and milk and milk protein yield in dairy

- cows. *J. Dairy Sci.* 87:2184-2196. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)70039-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)70039-9).
- Hristov, A. N., and J. K. Ropp. 2003. Effect of dietary carbohydrate composition and availability on utilization of ruminal ammonia nitrogen for milk protein synthesis in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86:2416-2427. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73836-3](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73836-3).
- Huhtanen, P., E. H. Cabezas-Garcia, S. J. Krizsan, and K. J. Shingfield. 2015. Evaluation of between-cow variation in milk urea and rumen ammonia nitrogen concentrations and the association with nitrogen utilization and diet digestibility in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 98:3182-3196. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8215>.
- Huhtanen, P., and A. N. Hristov. 2009. A meta-analysis of the effects of dietary protein concentration and degradability on milk protein yield and milk N efficiency in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 92:3222-3232. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1352>.
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, and J. High. 2002a. Dairy herd management practices that impact nitrogen utilization efficiency. *J. Dairy Sci.* 85:1218-1226. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74185-4](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74185-4).
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, and J. High. 2002b. Use of milk urea nitrogen to improve dairy cow diets. *J. Dairy Sci.* 85:939-946. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74152-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74152-0).
- Kendall, P. E., C. B. Tucker, D. E. Dalley, D. A. Clark, and J. R. Webster. 2008. Milking frequency affects the circadian body temperature rhythm in dairy cows. *Livest. Sci.* 117:130-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2007.12.009>.
- Les producteurs de grains du Québec. 2016. *Marché local*. Accessed Feb. 8, 2016. <http://www.pgq.ca/mise-en-marche/marche-local/>.
- Les producteurs de lait du Québec. 2016. *Some figures*. Accessed Feb. 12, 2016. <http://lait.org/en/the-milk-economy/some-figures/>.
- Li, B., W. F. Fikse, J. Lassen, M. H. Lidauer, P. Løvendahl, P. Mäntysaari, and B. Berglund. 2016. Genetic parameters for dry matter intake in primiparous Holstein, Nordic Red, and Jersey cows in the first half of lactation. *J. Dairy Sci.* 99:7232-7239. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10669>.
- Nousiainen, J., K. J. Shingfield, and P. Huhtanen. 2004. Evaluation of milk urea nitrogen as a diagnostic of protein feeding. *J. Dairy Sci.* 87:386-398. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73178-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73178-1).
- NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Olmos Colmenero, J. J., and G. A. Broderick. 2006a. Effect of amount and ruminal degradability of soybean meal protein on performance of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:1635-1643. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72230-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72230-5).

- Olmos Colmenero, J. J., and G. A. Broderick. 2006b. Effect of dietary crude protein concentration on milk production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:1704-1712. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72238-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72238-X).
- Phuong, H. N., N. C. Friggens, I. J. M. de Boer, and P. Schmidely. 2013. Factors affecting energy and nitrogen efficiency of dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 96:7245-7259. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-6977>.
- Powell, J. M., C. J. P. Gourley, C. A. Rotz, and D. M. Weaver. 2010. Nitrogen use efficiency: A potential performance indicator and policy tool for dairy farms. *Environ. Sci. Policy* 13:217-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2010.03.007>.
- Powell, J. M., D. B. Jackson-Smith, D. F. McCrory, H. Saam, and M. Mariola. 2006. Validation of feed and manure data collected on Wisconsin dairy farms. *J. Dairy Sci.* 89:2268-2278. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72298-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72298-6).
- Rotz, C. A. 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *J. Anim. Sci.* 82:E119-E137. http://doi:/2004.8213_supplE119x.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/Stat 9.3 User's Guide. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- Valacta. 2015. L'évolution de la production laitière québécoise 2014. Accessed June 14, 2016. http://www.valacta.com/FR/Nos-publications/Documents/ÉVOLUTION%20LAITIÈRE/Évolution%202014_FINAL.pdf.
- Valacta. 2016. L'évolution de la production laitière québécoise 2015. Accessed June 14, 2016. http://www.valacta.com/FR/Nos-publications/Documents/EL2015_FINAL2.pdf.
- Vallimont, J. E., C. D. Dechow, J. M. Daubert, M. W. Dekleva, J. W. Blum, C. M. Barlieb, W. Liu, G. A. Varga, A. J. Heinrichs, and C. R. Baumrucker. 2010. Genetic parameters of feed intake, production, body weight, body condition score, and selected type traits of Holstein cows in commercial tie-stall barns. *J. Dairy Sci.* 93:4892-4901. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3189>.
- Van Soest, P. J., J. B. Robertson, and B. A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74:3583-3597. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2).
- Veerkamp, R. F., and S. Brotherstone. 1997. Genetic correlations between linear type traits, food intake, live weight and condition score in Holstein-Friesian dairy cattle. *Anim. Sci.* 64:385-392. <http://dx.doi.org/10.1017/S1357729800015976>.
- Wattiaux, M. A., E. V. Nordheim and P. Crump. 2005. Statistical evaluation of factors and interactions affecting dairy herd improvement milk urea nitrogen in commercial Midwest dairy herds. *J. Dairy Sci.* 88: 3020-3035. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72982-9](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72982-9).

- Wattiaux, M. A., and P. M. Crump. 2014. Exploring milk urea-N excretion as a nutritional and environmental management tool for the dairy industry. *J. Anim. Sci.* 92, E-Suppl. 2/*J. Dairy Sci.* 97, E-Suppl. 1:350. (Abstr.)
- Yan, T., C. S. Mayne, D. C. Patterson, and R. E. Agnew. 2009. Prediction of body weight and empty body composition using body size measurements in lactating dairy cows. *Livest. Sci.* 124:233-241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2009.02.003>.

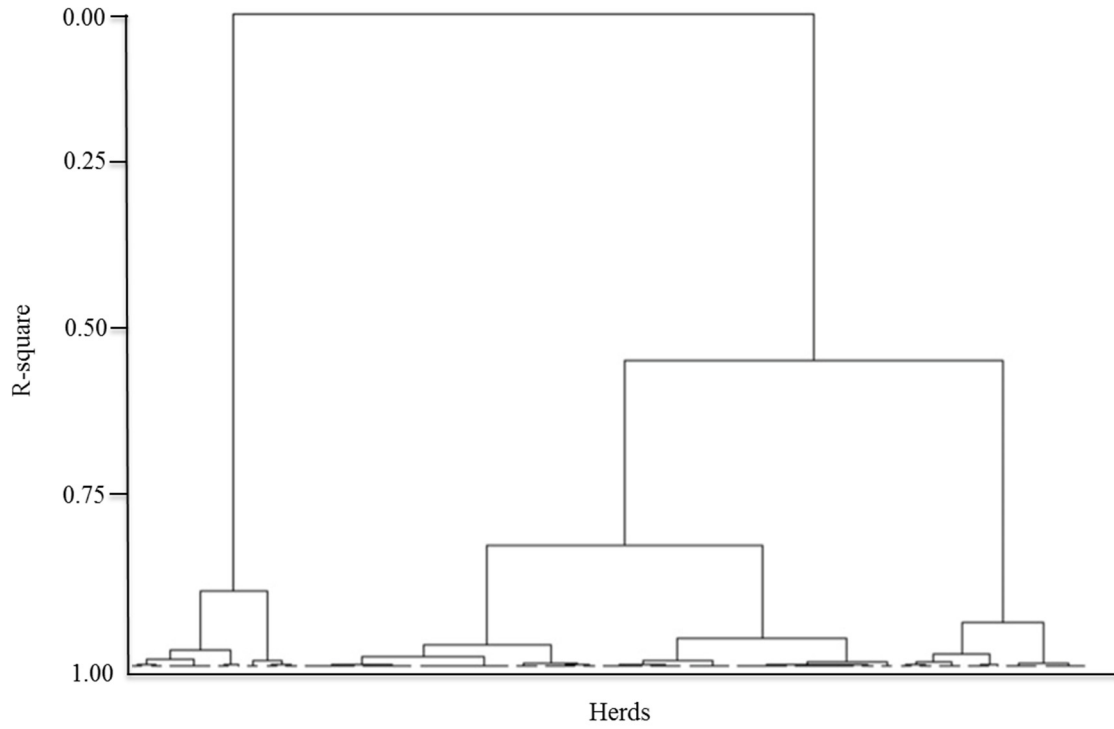


Figure 5.1 Tree plot from cluster analysis.

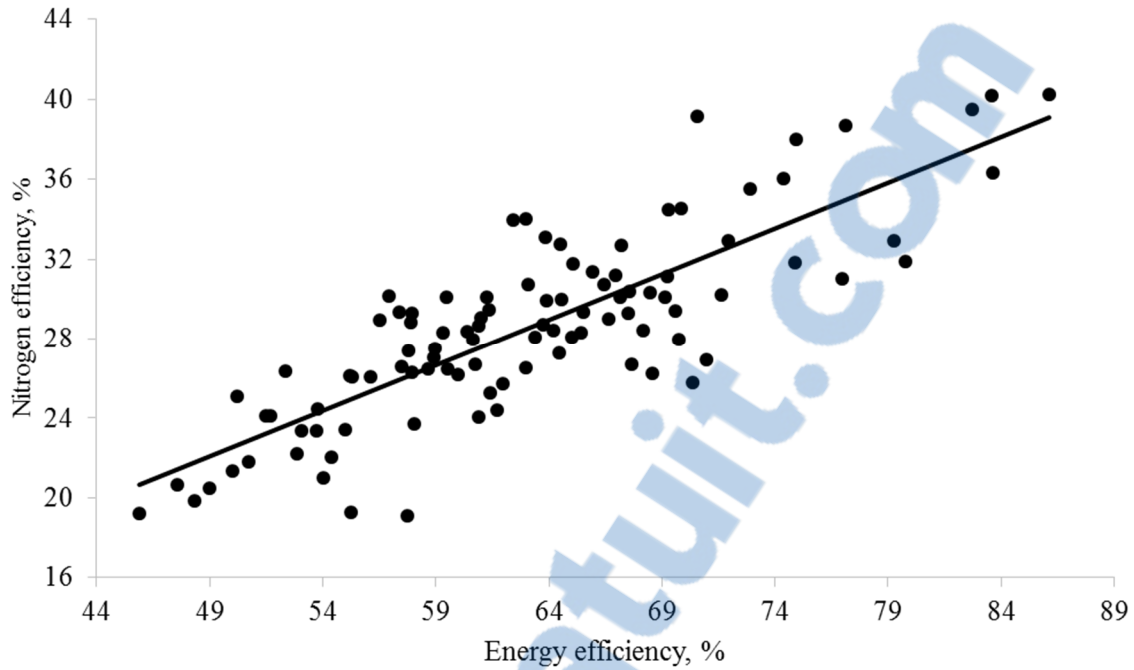


Figure 5.2 Relationship between nitrogen efficiency and energy efficiency of commercial dairy herds ($n = 100$; $r = 0.82$). Nitrogen efficiency was calculated as $[100 \times \text{milk N secretion} / \text{dietary N intake}]$. Energy efficiency was calculated as $[100 \times \text{milk energy concentration (Mcal/kg)} \times \text{milk yield (kg/d)} / \text{NE}_L \text{ intake (Mcal/d)}]$.

Table 5.1 Average milk and component yields, FCM, and milk composition for 100 dairy herds of the province of Québec divided into 4 clusters according their nitrogen efficiency

Item	Cluster ¹				SEM	P - value
	NE22	NE27	NE30	NE36		
Yield, kg/d						
Milk	28.7 ^b	31.1 ^a	31.9 ^a	32.5 ^a	0.8	<0.01
Fat	1.15 ^b	1.25 ^a	1.28 ^a	1.32 ^a	0.03	<0.01
Protein	0.94 ^b	1.02 ^a	1.05 ^a	1.07 ^a	0.03	<0.01
Lactose	1.31 ^b	1.44 ^a	1.46 ^a	1.49 ^a	0.04	<0.01
FCM ²	28.8 ^b	31.3 ^{ab}	32.0 ^a	32.9 ^a	0.81	<0.01
Milk composition						
Fat, %	4.02	3.98	4.03	4.07	0.05	0.49
Protein, %	3.27 ^{yz}	3.24 ^y	3.31 ^z	3.28 ^{yz}	0.02	0.06
Lactose, %	4.57	4.58	4.58	4.58	0.01	0.85
BHB, mmol/L	0.07	0.07	0.07	0.08	0.01	0.54
Energy ³ , Mcal NE _L /kg	0.71	0.73	0.71	0.72	0.01	0.31
MUN, mg/dL	13.2 ^a	11.4 ^b	11.8 ^{ab}	11.1 ^b	0.52	0.02
MUN:protein ⁴	4.03 ^a	3.52 ^b	3.57 ^{ab}	3.38 ^b	0.16	0.02

^{a-b}Means within a row with different superscripts differ ($P \leq 0.05$).

^{y-z}Means within a row with different superscripts tend to differ ($0.05 < P < 0.10$).

¹Herds were divided into clusters according to their nitrogen efficiency (NE) calculated as $[100 \times \text{milk N secretion} / \text{dietary N intake}]$: NE22 = 22.1% (n = 20); NE27 = 26.9% (n = 31); NE30 = 30.1% (n = 31); NE36 = 35.8% (n = 18).

²Calculated as $[0.4 \times \text{milk yield (kg/d)} + 15 \times \text{fat yield (kg/d)}]$ (Gaines, 1928).

³Calculated as $[(0.0929 \times \text{fat (\%)} + (0.0547 \times \text{protein (\%)} / 0.93) + (0.0395 \times \text{lactose (\%)))]$ (NRC, 2001).

⁴Calculated as $[\text{MUN yield (mg/d)} / \text{milk protein yield (g/d)}]$ (Wattiaux and Crump, 2014).

Table 5.2 Average intake, diet parameters, type of forage, RDP and MP balances, energy efficiency, and IOFC for 100 dairy herds of the province of Québec divided into 4 clusters according to their nitrogen efficiency

Item	Cluster ¹				SE	P - value
	NE22	NE27	NE30	NE36		
DMI, kg/d						
Expected	22.6 ^b	23.3 ^{ab}	23.8 ^a	24.0 ^a	0.30	0.01
Actual	26.1 ^a	24.2 ^{bc}	22.7 ^b	20.6 ^c	0.59	<0.001
Difference	-3.44 ^d	-0.89 ^c	1.00 ^b	3.34 ^a	0.46	<0.001
Diet parameters, % of DM (unless otherwise noted)						
CP	16.0 ^a	15.3 ^a	15.1 ^{ab}	14.2 ^b	0.31	<0.01
Soluble CP	5.52 ^a	5.42 ^a	4.98 ^{ab}	4.38 ^b	0.27	<0.01
RDP	10.8 ^a	10.4 ^a	10.1 ^{ab}	9.31 ^b	0.25	<0.001
RUP	5.26	4.94	5.07	4.93	0.14	0.23
NE _L , Mcal/kg	1.46 ^b	1.48 ^b	1.53 ^a	1.54 ^a	0.01	<0.001
ADF	23.8 ^a	22.8 ^{ba}	20.9 ^c	21.3 ^{bc}	0.62	<0.01
NDF	39.4 ^y	39.1 ^y	36.4 ^z	36.8 ^{yz}	1.05	0.03
Lignin	4.16 ^a	3.67 ^a	2.96 ^b	2.83 ^b	0.25	<0.001
ADICP ²	1.97	1.82	1.82	1.75	0.12	0.57
NDICP ³	4.15	4.23	3.93	4.00	0.19	0.54
NFC ⁴	37.3 ^b	38.9 ^b	41.9 ^a	42.4 ^a	0.90	<0.001
TDN	70.9 ^b	71.7 ^b	74.4 ^a	73.5 ^{ab}	0.83	<0.01
Starch	14.1 ^b	14.6 ^b	19.6 ^a	20.3 ^a	1.09	<0.001
Fat	3.17	3.25	3.17	3.14	0.16	0.94
Type of forage, % of total forages						
Baled silage	46.4	42.9	27.3	18.7	9.76	0.10
Chopped silage	25.8	34.8	31.1	38.4	7.64	0.65
Corn silage	8.2 ^c	15.1 ^{bc}	31.8 ^a	31.3 ^{ab}	5.51	<0.01
RDP balance ⁵ , g/d	594.8 ^a	470.6 ^b	395.5 ^{bc}	301.8 ^c	42.8	<0.001
MP balance ⁶ , g/d	263.3 ^a	-16.2 ^b	-133.2 ^c	-306.9 ^d	29.1	<0.001
Energy efficiency ⁷	0.53 ^d	0.61 ^c	0.65 ^b	0.73 ^a	0.13	<0.001
IOFC ⁸ , \$/cow/d	14.3 ^c	16.4 ^{bc}	17.2 ^{ab}	18.2 ^a	0.55	<0.001

^{a-d}Means within a row with different superscripts differ ($P \leq 0.05$).

^{y-z}Means within a row with different superscripts tend to differ ($0.05 < P < 0.10$).

¹Herds were divided into clusters according to their nitrogen efficiency (NE) calculated as $[100 \times \text{milk N secretion} / \text{dietary N intake}]$: NE22 = 22.1% (n = 20); NE27 = 26.9% (n = 31); NE30 = 30.1% (n = 31); NE36 = 35.8% (n = 18).

²Acid detergent insoluble CP.

³Neutral detergent insoluble CP.

⁴Calculated as $[100 - (\text{CP} (\%) + (\text{NDF} (\%) - \text{NDICP} (\%)) + \text{fat} (\%) + \text{ash} (\%))]$.

⁵RDP supply – RDP requirements.

⁶Metabolizable protein supply – metabolizable protein requirements.

⁷Calculated as $[100 \times \text{milk energy concentration (Mcal/kg)} \times \text{milk yield (kg/d)} / \text{NE}_L \text{ intake (Mcal/d)}]$.

⁸Milk income over feed cost calculated as $[\text{milk price (\$/kg)} \times \text{milk yield (kg/d)} - \text{feed cost (\$/kg)} \times \text{feed intake (kg/d)}]$.

Chapitre VI

6 Discussion et conclusions

6.1 Discussion générale

La composition du lait des fermes au Canada est un déterminant important de leur revenu. En effet, le prix du lait à la ferme est déterminé par sa composition. Ainsi, la modification des rations des vaches reste la façon la plus rapide pour moduler la composition du lait de manière à répondre aux changements du marché. Pour l'instant, le composant le mieux rémunéré du lait est la MG. C'est également celui dont la teneur est la plus facile à altérer par l'alimentation. En plus de l'effet direct sur le paiement du lait, il a été suggéré que des composants comme l'urée du lait peuvent être des indicateurs de l'utilisation de la protéine par l'animal (Jonker et al., 2002) et de l'efficacité d'utilisation de l'azote (Olmos Colmenero et Broderick, 2006). Ces deux paramètres ont également un impact économique direct sur la ferme.

Plusieurs concepts liés à l'impact des modifications de l'alimentation des vaches ont été démontrés lors d'expérimentations contrôlées. Néanmoins, les recherches en conditions commerciales sont rares. Il est donc important de valider les résultats de conditions expérimentales dans le cadre d'étude à plus grande échelle avec des données provenant de plusieurs fermes. La base de données de Valacta est un outil unique en ce sens puisqu'elle contient l'information sur l'alimentation des animaux en plus de contenir celle sur leurs performances laitières. Cette base de données comporte aussi certaines faiblesses qui ont été mises à jour dans le cadre de cette thèse et qui seront développées un peu plus loin dans l'argumentaire.

Le premier article de la thèse utilisait l'information de cette base de données dans le but de valider l'effet de la DACA sur la TMG du lait. L'effet de la DACA sur la TMG a été exploré dans plusieurs études (Apper-Bossard et al., 2006; Wildman et al., 2007; Iwaniuk et al., 2015), cependant, aucune étude n'avait été réalisée en conditions commerciales. Donc, la base de données de Valacta a été utilisée pour mieux comprendre cet effet. Tout d'abord, il est surprenant de constater que la majorité des troupeaux du Québec ont obtenu une valeur

sous la recommandation pour la DACA, et que certains ont même obtenu des valeurs négatives. Ensuite, des régressions multiples ont été réalisées pour évaluer la relation entre la DACA et d'autres composants de la ration sur la TMG du lait. Les résultats ont montré que la DACA a eu un effet positif sur la TMG du lait pour tous les stades de lactation pendant l'hiver et presque tous les stades de lactation pendant l'été. Deux interactions intéressantes entre la DACA et d'autres composants de la ration ont aussi été notées dans cette étude. La première est en lien avec le système d'alimentation et démontre qu'une augmentation de DACA a un effet plus marqué sur la TMG lorsque les aliments ne sont pas servis en RTM. Ces résultats montrent que l'augmentation de la DACA est plus efficace lorsque les conditions dans le rumen sont moins stables. En effet, les RTM sont réputées pour améliorer la stabilité de la fermentation dans le rumen (Coppock, 1977; NRC, 2001). La seconde est en lien avec l'acide palmitique et suggère que la supplémentation de cet AG est plus efficace lorsque la DACA est plus élevée. Les relations trouvées auraient cependant été plus convaincantes avec des coefficients de détermination plus élevés. En effet, même si les valeurs de *P* étaient significatives, les coefficients de détermination variaient entre 0,32 et 0,56. Néanmoins, le maintien du choix de la DACA dans les différents modèles de régression pour expliquer la TMG démontre l'importance du concept. Considérant qu'il est généralement admis que la DACA est plus importante pendant la période de transition afin de réduire l'incidence de la fièvre vitulaire (Oetzel, 1991; Charbonneau et al., 2006), les résultats de notre étude sont intéressants sur un plan global, puisqu'ils démontrent l'importance de la nutrition minérale tout au long de la lactation pour son effet sur la TMG du lait. De plus, la nutrition minérale est souvent focalisée sur les suppléments minéraux seulement, tandis que le bilan minéral de la ration devrait plutôt prendre l'ensemble de la ration en compte, afin d'éviter des valeurs faibles et négatives de la DACA pendant la lactation.

En ce qui concerne l'urée du lait, une approche similaire à celle du projet précédent sur la DACA a été utilisée. L'objectif original de l'étude était de mieux comprendre la relation entre les composants de la ration et l'urée du lait. Toutefois, dans l'exploration initiale des données, les résultats étaient très différents de ceux qui sont rapportés dans la

littérature. En effet, la plupart des études suggèrent que le facteur nutritionnel qui fait le plus varier les concentrations d'urée du lait est la teneur en protéine brute de la ration (Nousiainen et al., 2004; Patton et al., 2014). Selon Spek et al. (2013), le niveau de protéines de la ration expliquerait respectivement 47 et 75 % de la variation de l'urée du lait, aux États-Unis et en Europe. En contrepartie, les résultats des analyses de la base de données de Valacta révélèrent une corrélation assez faible entre la protéine brute de la ration et la teneur en urée du lait ($r = 0,17$). De plus, les modèles de régressions simples ou multiples, par vache ou par troupeaux, ne parvenaient pas à prédire l'urée du lait de manière satisfaisante.

Considérant que de plus en plus d'études semblaient montrer que la teneur en urée du lait est un meilleur indicateur intra-troupeau qu'inter-troupeau (Aguilar et al., 2012; Huhtanen et al., 2015), nous avons décidé d'évaluer la capacité de prédire des fluctuations de teneurs en urée dans le lait par des variations dans les rations à l'intérieur des troupeaux. Une fois de plus, les résultats obtenus étaient surprenants. En effet, de grandes variations dans la relation entre la protéine brute de la ration et l'urée du lait ont été observées sur une période de 36 mois entre les troupeaux ($r = -0,99$ à $0,99$).

Pour mieux comprendre les données, de groupes de 100 fermes ont été créés. Ils regroupaient chacun les fermes avec les relations les plus fortes : i) entre la protéine brute de la ration et la teneur en urée du lait ($r > 0,69$) et ii) entre la protéine brute de la ration et le rapport urée : protéine ($r > 0,74$), soit un groupe positivement corrélé et un groupe négativement corrélé ($r < -0,43$ et $r < -0,34$) pour la teneur en urée et le rapport, respectivement. Le nouvel objectif de l'étude était donc de mieux comprendre ce qui affecte la relation entre la protéine brute de la ration et l'urée du lait. Néanmoins, aucun facteur nutritionnel pouvant expliquer ces divergences dans la relation entre la protéine brute et l'urée du lait n'a pas clairement été identifié. Par contre, lorsque le rapport urée : protéine du lait était étudié, des corrélations positives étaient associées à la plus grande utilisation de suppléments protéiques contenant le plus de protéines dégradables. Il semble donc, qu'en

situation de production commerciale, cet indicateur fonctionne mieux lorsque ce sont les suppléments protéiques qui varient.

Ce résultat nous oriente toutefois également vers une autre réflexion, soit la validité des données dans notre analyse. En effet, dans le cadre de ce doctorat, beaucoup de temps a été consacré au nettoyage et à la validation des données de la base de Valacta. Malgré tout, la nature des résultats obtenus suggère que les données portant sur la consommation des fourrages ne sont peut-être pas aussi fiables que celles sur les aliments concentrés. Il est connu que les fourrages sont plus variables dans leurs compositions que les aliments concentrés (Weiss et al., 2012; St-Pierre et Weiss, 2015). Il est donc probable que les analyses des fourrages dans la base de données ne soient pas toujours le reflet exact de ce qui est offert aux animaux. Ainsi, certaines lacunes dans nos données originales pourraient expliquer les résultats obtenus. Lors d'analyse avec des bases de données, on considère souvent que le nombre important de données compense pour le manque de fiabilité de certaines d'entre elles. Toutefois, pour un projet touchant le métabolisme de l'azote, les fourrages ont une importance trop grande dans le résultat obtenu et les lacunes des données d'origine de ce genre de banque sont probablement trop importantes pour être compensées par le nombre. Des moyens devront donc être développés pour mieux identifier et corriger les données douteuses.

Il faut alors se questionner sur les points faibles du système de collecte actuel de l'information de la base de données pour permettre des améliorations dans le futur. La validation des données est toujours une tâche complexe. Les résultats obtenus dans cette thèse semblent montrer que la collecte des informations sur les fourrages serait la première à améliorer. La première étape serait une validation de ce qui est réellement offert par rapport à ce qui est saisi dans la base de données. En effet, nous avons vu lors du troisième projet, présenté au Chapitre 5, de cette thèse que, bien que la moyenne de la prise alimentaire réelle était comparable à celle estimée par l'équation du NRC (2001), de grandes variations pouvaient exister en fonction des troupeaux visités. Il est donc important de faire des tests de

consommation pour valider ce qui est vraiment consommé par les vaches. Une façon de faire ce test serait de mesurer de la prise alimentaire au niveau des groupes, afin que le calcul reste adéquat (Vallimont et al., 2010). Cette évaluation devrait avoir un plus grand effet sur la consommation de fourrages que sur celui des aliments concentrés puisque c'est souvent la portion des rations qui est offerte à volonté sur les fermes. Il est certain que dans un contexte de ferme, l'utilisation de l'équation du NRC (2001) est simple, mais une validation de la consommation des vaches quelques fois par année permettrait non seulement d'améliorer l'information contenue dans la base de données, mais permettrait également une formulation de rations mieux adaptées aux besoins réels des vaches. Aussi, un nouvel outil, comme l'évaluation génétique de la prise alimentaire résiduelle (Connor et al., 2012) pourrait aider à l'ajustement de l'évaluation de la prise alimentaire par des équations purement fondées sur les caractéristiques des animaux, comme celle du NRC (2001).

Pour les analyses de composition des fourrages et des autres aliments, l'idéal serait que les conseillers sur les fermes effectuent une validation régulière des données. Dans le cas où cette validation ne serait pas possible, il pourrait être intéressant d'indiquer lorsque des interrogations existent par rapport aux données transmises. Ainsi, une sélection pourrait être effectuée lors des analyses en fonction du niveau de précision nécessaire. Même si le nombre de troupeaux retenus dans la base de données serait moindre, les données seraient plus fiables. Ce serait une amélioration qui servirait pour de futurs projets liés à l'alimentation, ainsi que pour les évaluations génétiques qui incluent de l'information sur la prise alimentaire des vaches (Veerkamp, 1998; Berry et al., 2014).

Le troisième projet de la thèse a été développé pour pallier aux lacunes observées dans les données du deuxième projet, Chapitre 4, en mettant en place une prise de données plus contrôlée et plus précise par rapport à l'information retrouvée dans la base de Valacta. Nous avons l'espoir d'être en mesure de compléter l'objectif initial du deuxième projet dans le cadre de cette étude. De façon surprenante, la corrélation entre l'urée du lait et la protéine brute de la ration était aussi plutôt faible ($r = 0,36$) lors de cette analyse. De plus, comme il

y avait seulement un échantillon par troupeau, il n'était pas possible de valider l'utilisation de l'urée du lait comme indicateur de l'utilisation de la protéine brute de la ration ou de l'efficacité à l'intérieur de chaque troupeau. Par contre, il n'en demeure pas moins que l'urée du lait est étroitement associée à l'efficacité de l'utilisation de l'azote en conditions expérimentales (Olmos Colmenero et Broderick, 2006) et en conditions commerciales (Jonker et al., 2002).

Ainsi, l'objectif finalement ciblé par ce projet était d'identifier les caractéristiques des fermes ayant des efficacités différentes pour l'utilisation de l'azote. Cette étude a montré que les fermes les plus performantes pour l'efficacité d'utilisation de l'azote avaient moins de protéines brutes dans la ration et plus d'énergie que les fermes moins efficaces. Ces résultats confirment ce qui a été mentionné dans la littérature (Calsamiglia et al., 2010; Gourley et al., 2012). De plus, les troupeaux avec la plus haute efficacité d'utilisation de l'azote avaient la plus faible prise alimentaire et la production laitière la plus élevée. Les résultats de ce projet ont aussi mis en évidence plusieurs relations importantes entre l'efficacité d'utilisation de l'azote et l'efficacité d'utilisation de la ration pour la production laitière ou l'efficacité de l'utilisation de l'énergie. Ces relations étaient encore peu explorées dans la littérature avant cette étude. Aussi, cette analyse a confirmé l'intérêt d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les vaches pour réduire l'impact environnemental, mais aussi d'améliorer la marge monétaire dégagée par vache.

Finalement, bien qu'une variation ait été observée entre l'urée du lait du groupe avec des efficacités élevées de l'utilisation de l'azote et celui du groupe avec des efficacités faibles, la teneur en urée du lait ne reflétait pas l'efficacité d'utilisation de l'azote et la protéine brute de la ration. Ce résultat est contraire à ce qui est mentionné lors d'essais contrôlés (Nousiainen et al., 2004; Olmos Colmenero et Broderick, 2006), mais confirme ce qui a été suggéré par Arriaga et al. (2009) lors d'une étude sur des fermes. Cependant, le manque de concordance entre la teneur en urée du lait et l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans notre étude peut-être expliquer, en partie, par la faible ampleur dans les différences en

urée et en protéine brute entre les deux groupes avec l'efficacité intermédiaire (c.-à-d. 27 et 30 % et 15,3 et 15,1 % pour l'efficacité d'utilisation d'azote et la protéine brute de la ration, respectivement). Jonker et al. (2002) et Aguilar et al. (2012) ont d'ailleurs suggéré d'utiliser l'urée comme outil de gestion à l'intérieur d'une même ferme plutôt qu'un moyen de comparaison de plusieurs fermes. Il serait intéressant de pousser plus loin la présente analyse et de regarder la relation entre l'urée du lait et les rations des fermes pendant plusieurs mois pour valider l'utilité de cet indicateur comme outil pour ajuster les apports en protéine de la ration en conditions commerciales.

Rapport-Gratuit.com

6.2 Conclusion

Plusieurs facteurs ont un effet sur la synthèse des composantes du lait et doivent être considérés lors de l'évaluation de la relation entre l'alimentation et la composition du lait. Parmi ces facteurs, une relation positive entre la TMG du lait et la DACA a été observée lors de la première étude de cette thèse. Il n'en demeure pas moins que lors de l'utilisation de ce concept pour la formulation de rations, il serait important de considérer les différentes interactions observées dans cette étude pour maximiser son effet.

Les études effectuées pour mieux comprendre les effets de l'alimentation sur l'urée du lait n'ont pas été aussi concluantes. Un questionnement persiste toutefois par rapport à la source de données utilisée. Bien que les études de cette thèse n'ont pas été en mesure de confirmer l'hypothèse que l'urée devrait servir comme un outil de gestion à l'intérieur d'un même troupeau plutôt que d'être utilisé comme un indicateur d'efficacité d'utilisation de l'azote entre les troupeaux. Il serait intéressant de faire d'autres expériences pour mieux comprendre les variations de la teneur en urée du lait et de cette façon dissocier le possible effet des données utilisées.

Le dernier article de la thèse portait exclusivement sur le concept d'efficacité d'utilisation de l'azote. Cette étude a permis de confirmer des connaissances dans un contexte commercial. En plus de mettre en évidence des relations encore peu connues entre ce concept et d'autres connaissances comme la prise alimentaire ou l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

Finalement, une conclusion importante de cette thèse démontre que l'analyse de base de données est un outil important pour étudier les troupeaux en conditions commerciales et valider des concepts testés sous des conditions expérimentales. Par contre, des améliorations dans la collecte des données et la validation de l'information seraient nécessaires pour les données touchant l'alimentation des vaches de manière à augmenter leur fiabilité. Il est

possible d'envisager des processus automatiques de validation dès la réception des données, par exemple le lien entre la variation de composition du lait (urée) et la protéine brute de la ration. Il serait ainsi possible de mieux tirer profit de cette source importante d'information.

6.3 Bibliographie

- Aguilar, M., M. D. Hanigan, H. A. Tucker, B. L. Jones, S. K. Garbade, M. L. McGilliard, C. C. Stallings, K. F. Knowlton, et R. E. James. 2012. Cow and herd variation in milk urea nitrogen concentrations in lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 95:7261-7268. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-5582>.
- Apper-Bossard, E., J. L. Peyraud, P. Faverdin, et F. Meschy. 2006. Changing dietary cation-anion difference for dairy cows fed with two contrasting levels of concentrate in diets. *J. Dairy Sci.* 89:749-760. [http://dx.doi:10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72136-1](http://dx.doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72136-1).
- Arriaga, H., M. Pinto, S. Calsamiglia, et P. Merino. 2009. Nutritional and management strategies on nitrogen and phosphorus use efficiency of lactating dairy cattle on commercial farms: An environmental perspective. *J. Dairy Sci.* 92:204-215. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2008-1304>.
- Berry, D. P., M. P. Coffey, J. E. Pryce, Y. de Haas, P. Løvendahl, N. Krattenmacher, J. J. Crowley, Z. Wang, D. Spurlock, K. Weigel, K. Macdonald, et R. F. Veerkamp. 2014. International genetic evaluations for feed intake in dairy cattle through the collation of data from multiple sources. *J. Dairy Sci.* 97:3894-3905. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2013-7548>.
- Calsamiglia, S., A. Ferret, C. K. Reynolds, N. B. Kristensen, et A. M. van Vuuren. 2010. Strategies for optimizing nitrogen use by ruminants. *Animal* 4:1184-1196. <http://dx.doi:10.1017/S1751731110000911>.
- Charbonneau, E., D. Pellerin, et G. R. Oetzel. 2006. Impact of lowering dietary cation-anion difference in nonlactating dairy cows: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 89:537-548. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72116-6](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72116-6).
- Connor, E. E., J. L. Hutchison, et H. D. Norman. 2012. Estimating feed efficiency of lactating dairy cattle using residual feed intake. Pages 159-173 in *Feed efficiency in the beef industry*. 1st ed. R.A. Hill. Ed. John Wiley & Sons. New York, NY.
- Coppock, C. E. 1977. Feeding methods and grouping systems. *J. Dairy Sci.* 60:1327-1336. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(77\)84030-7](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(77)84030-7).
- Gourley, C. J. P., S. R. Aarons, et J. M. Powell. 2012. Nitrogen use efficiency and manure management practices in contrasting dairy production systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147:73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.05.011>.
- Huhtanen, P., E. H. Cabezas-Garcia, S. J. Krizsan, et K. J. Shingfield. 2015. Evaluation of between-cow variation in milk urea and rumen ammonia nitrogen concentrations and the association with nitrogen utilization and diet digestibility in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 98:3182-3196. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8215>.
- Iwaniuk, M. E., A. E. Weidman, et R. A. Erdman. 2015. The effect of dietary cation-anion difference concentration and cation source on milk production and feed efficiency in

- lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:1950-1960. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2014-8704>.
- Jonker, J. S., R. A. Kohn, et J. High. 2002. Use of milk urea nitrogen to improve dairy cow diets. *J. Dairy Sci.* 85:939-946. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74152-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74152-0).
- Nousiainen, J., K. J. Shingfield, et P. Huhtanen. 2004. Evaluation of milk urea nitrogen as a diagnostic of protein feeding. *J. Dairy Sci.* 87:386-398. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73178-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73178-1).
- NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Oetzel, G. R. 1991. Meta-analysis of nutritional risk factors for milk fever in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 74:3900-3912.
- Olmos Colmenero, J. J., et G. A. Broderick. 2006. Effect of dietary crude protein concentration on milk production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:1704-1712. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72238-X](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72238-X).
- Patton, R. A., A. N. Hristov, et H. Lapierre. 2014. Protein feeding and balancing for amino acids in lactating dairy cattle. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 30:599-621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cvfa.2014.07.005>.
- Spek, J. W., J. Dijkstra, G. van Duinkerken, W. H. Hendriks, et A. Bannink. 2013. Prediction of urinary nitrogen and urinary urea nitrogen excretion by lactating dairy cattle in Northwestern Europe and North America: A meta-analysis. *J. Dairy Sci.* 96:4310-4322. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2012-6265>.
- St-Pierre, N. R., et W. P. Weiss. 2015. Partitioning variation in nutrient composition data of common feeds and mixed diets on commercial dairy farms. *J. Dairy Sci.* 98:5004-5015. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-9431>.
- Vallimont, J. E., C. D. Dechow, J. M. Daubert, M. W. Dekleva, J. W. Blum, C. M. Barlieb, W. Liu, G. A. Varga, A. J. Heinrichs, et C. R. Baumrucker. 2010. Genetic parameters of feed intake, production, body weight, body condition score, and selected type traits of Holstein cows in commercial tie-stall barns. *J. Dairy Sci.* 93:4892-4901. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3189>.
- Veerkamp, R. F. 1998. Selection for economic efficiency of dairy cattle using information on live weight and feed intake: A review. *J. Dairy Sci.* 81:1109-1119. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(98\)75673-5](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(98)75673-5).
- Weiss, W. P., D. Shoemaker, L. McBeth, P. Yoder, et N. St-Pierre. 2012. Within farm variation in nutrient composition of feeds. Pages 103-140 in *Proc. Tri-State Dairy Nutr. Conf.* Fort Wayne, IN. The Ohio State Univ., Columbus.
- Wildman, C. D., J. W. West, et J. K. Bernard. 2007. Effect of dietary cation-anion difference and dietary crude protein on milk yield, acid-base chemistry, and rumen fermentation. *J. Dairy Sci.* 90:4693-4700. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2006-497>.