



## **Symposium sur les bovins laitiers** **Choix d'aujourd'hui pour les défis de demain**

Le mercredi 5 novembre 2014  
Centre BMO, Saint-Hyacinthe

# ***Comment maximiser l'utilisation de l'azote des vaches laitières : répercussions environnementales et monétaires***

**Hélène Lapierre**, agronome, Ph.D., Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier  
et le porc, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, Québec

**Daniel Ouellet**, Ph.D., Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc,  
Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, Québec

**Alain Fournier**, agronome, M.Sc., Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation  
du Québec, Nicolet, Québec

**Doris Pellerin**, agronome, Ph.D., Département des sciences animales, FSAA, Université Laval,  
Québec



**CRAAQ**  
CULTIVER L'EXPERTISE  
DIFFUSER LE SAVOIR

Comité bovins laitiers

# Comment maximiser l'utilisation de l'azote des vaches laitières : répercussions environnementales et monétaires

## Faits saillants :

### **Comment équilibrer les rations :**

- Nous travaillons à mieux déterminer :
  - les apports, exemple : sécrétions endogènes au duodénum,
  - les besoins, exemple : pertes fécales, efficacité d'utilisation des acides aminés (AA)
- Équilibrer sur une base de protéines métabolisables (PM) plutôt que sur une base de protéines brutes (PB);
- Équilibrer pour la protéine dégradable et non-dégradable dans le rumen;
- Maximiser la protéine microbienne représentant plus de la moitié de l'apport protéique;
- Équilibrer pour les AA : même si les modèles sont en pleine effervescence, des principes de base tiennent toujours:
  - Complémentarité des sources de protéines non-dégradables,
  - Vérifier les apports en histidine quand les apports en PM sont plus faibles;
- La concentration en urée du lait est un précieux indicateur de l'équilibre protéique des rations : cette valeur est à considérer pour chaque troupeau, mais un objectif entre 8 et 14 mg d'urée-N par dL de lait est actuellement recommandé par Valacta;
- En appliquant ces principes, il est possible d'apporter suffisamment de PM et d'AA avec un % de PB de la ration autour de 16%, et ce pour des niveaux élevés de production.

### **Pourquoi équilibrer les rations :**

- Diminuer l'excrétion d'azote dans l'environnement sans diminuer la productivité;
- Rapidement, en ajustant les rations au Québec, on pourrait réduire l'excrétion d'azote de 2 000 tonnes par année, soit 15% des déjections actuelles;
- Pour une ferme moyenne de 87 vaches, cette diminution de l'apport protéique représenterait une augmentation du bénéfice annuel entre 1700\$ et 4000\$.

### **Liste des abréviations :**

AA: acide aminé; AC: AminoCow AC; AMTS: Agricultural Modeling Training Systems; CNCPS: Cornell Net Carbohydrate and Protein System; CPM: Cornell-Penn-Miner; Lys: lysine; Met: méthionine; MSI: matière sèche ingérée; N: azote; NRC: National Research Council; PDR: protéine dégradable dans le rumen; PMF: pertes métaboliques fécales; PB: protéine brute; PM: protéines métabolisables; RTM: ration totale mélangée; Thr: thréonine.

## INTRODUCTION

Depuis plus d'une décennie, la préoccupation grandissante de l'impact environnemental des systèmes de productions animales ainsi que l'augmentation du coût des protéines alimentaires ont directement contribué à motiver producteurs, conseillers et chercheurs à trouver des façons de diminuer le taux de protéine brute (PB) des rations de vaches laitières, évidemment sans diminuer la production de lait et de protéines laitières.

Pourquoi parle-t-on d'impact environnemental important? Au Québec, l'an passé pour les 297 000 vaches inscrites chez Valacta, 26,5% de l'azote (N) ingéré était retourné dans le lait (Valacta, 2013), i.e. que 73,5% de l'N ingéré était excrété dans l'urine et dans les fèces, soit un peu plus de 12 000 tonnes de N par année. Cette importante quantité d'N excrétée est fortement liée à la teneur en PB des rations (le % de PB d'une ration étant obtenu en multipliant le % d'N par la constante 6,25 (i.e. 1/0,16) puisque les protéines contiennent 16% d'N). Pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'N dans les rations, il est essentiel d'en savoir plus sur la qualité de la protéine contenue dans la ration. Car, ultimement, ce que la vache utilisera pour fabriquer toutes ses propres protéines seront les acides aminés (AA) provenant des protéines digérées dans le petit intestin. C'est donc en fournissant une quantité et un profil adéquat d'AA que l'on pourra réduire l'N consommé tout en maintenant la productivité des vaches. Pourquoi parle-t-on de l'importance de la protéine dans le coût de l'alimentation? Selon St-Pierre (2014), la fraction protéique de la ration représente 42% du coût de la ration, et qui plus est, le coût de cette fraction a plus que doublé depuis 2008 alors que le prix de l'énergie est à peu près au même niveau qu'en 2008.

Dans cette présentation, nous aborderons dans un premier temps comment maximiser l'utilisation de l'N en mentionnant certains travaux de recherche menés à Sherbrooke permettant d'atteindre cet objectif. Puis, nous terminerons avec des exemples concrets de l'impact que peut avoir une réduction des apports en PB sur l'environnement et sur la rentabilité d'une entreprise laitière.

## COMMENT MAXIMISER L'UTILISATION DE L'AZOTE

Le principe de base pour équilibrer les rations et optimiser l'utilisation de l'N consiste « simplement » à planifier une ration qui fournira exactement les nutriments nécessaires pour supporter les fonctions métaboliques de l'animal, i.e. préparer une ration qui aura un apport égal aux besoins. Ce qui peut sembler relativement simple sur papier s'avère un défi de taille en réalité chez le ruminant, car les protéines apparaissant à l'entrée de l'intestin pour être digérées sont complètement différentes, en quantité et en composition, des protéines ingérées. En effet, à cause de la dégradation et de la synthèse microbienne ayant cours dans le rumen, cet immense fermenteur de plus de 100 litres, la PB ingérée est complètement remodelée avant d'être livrée à l'intestin pour être digérée. Plus de 50% de la protéine arrivant au petit intestin provient de la biomasse microbienne produite dans le rumen (Clark et al., 1992). Les protéines sont digérées dans l'intestin et absorbées sous forme d'AA pour fournir à l'animal hôte les AA qui seront utilisés par tous les tissus, incluant la glande mammaire, pour fabriquer les protéines. Ce remodelage de la protéine alimentaire par les microorganismes est certes la principale raison expliquant les écarts actuels entre les modèles utilisés pour équilibrer les rations chez les monogastriques et les ruminants. Il faut cependant reconnaître que c'est cette même microflore qui permet aux ruminants de transformer des aliments fibreux, non-utilisables par les monogastriques, ainsi que de multiples sous-produits de l'industrie de la transformation, en un produit de haute qualité nutritionnelle, le lait.

***- La protéine digérée par la vache provient à plus de 50% de la protéine fabriquée par les microorganismes du rumen, d'où le défi d'identifier les apports réels.***

## Unités pour exprimer les apports et les besoins

Dès lors que l'on veut équilibrer les apports avec les besoins, des unités doivent être utilisées pour exprimer chacune de ces entités. Il n'y a pas si longtemps les besoins en protéines des vaches laitières étaient exprimés en PB (NRC, 1978). Puis, le concept de dégradabilité ruminale des protéines et de l'énergie s'est développé (NRC, 1985) et est encore utilisé avec succès pour équilibrer les rations. Le système a continué à se peaufiner et le concept de protéines absorbables (NRC, 1989) puis métabolisables (PM; NRC, 2001) a été mis en place afin de mieux décrire la qualité nutritionnelle protéique d'une ration. Les PM ne sont pas mesurées directement mais représentent une estimation de la quantité totale de protéines digérées et disponibles à la vache. Les PM définissent mieux les apports

réels, car elles représentent les protéines présentes dans le système digestif, suite au rumen, qui seront digérées. Elles sont composées des protéines produites par les microbes du rumen, de la fraction protéique alimentaire non dégradée dans le rumen et des protéines endogènes (sécrétions du tractus digestif). Les PM seront digérées dans l'intestin en AA individuels et ce sont ces AA (composantes des protéines) qui seront utilisés par les différents tissus de l'animal pour la fabrication de protéines spécifiques utilisées pour la croissance, la reproduction, le système immunitaire, la lactation et autres fonctions. Ainsi, les unités de base transportées du système digestif à chacun des tissus qui seront utilisées pour fabriquer les protéines seront les AA. Dans l'organisme, 20 AA sont utilisés pour fabriquer toutes les protéines que le corps nécessite. Ces AA se divisent en deux catégories: les essentiels et les non-essentiels. Bien que les deux catégories soient « essentielles » à la fabrication de protéines, ces qualificatifs ont été attribués selon la capacité physiologique de l'animal à les fabriquer. Brièvement, l'animal est incapable de fabriquer les AA essentiels (histidine (His), isoleucine (Ile), leucine, lysine (Lys), méthionine (Met), phénylalanine, thréonine (Thr), tryptophane et valine). Ces AA doivent donc provenir de la digestion des protéines alimentaires ou bactériennes dans l'intestin. Par contre, l'animal possède les voies métaboliques de synthèse pour les AA non-essentiels (alanine, asparagine, aspartate, cystéine, glutamate, glutamine, glycine, proline, sérine et tyrosine). On a aussi ajouté le qualificatif de semi-essentiel pour les AA pouvant être synthétisés mais en quantité insuffisante pour couvrir les besoins d'animaux en forte production, comme l'arginine (Arg) ou la glutamine, dans certaines circonstances.

**- Ce sont les AA qui sont utilisés par la vache pour fabriquer toute ses protéines : les AA essentiels doivent provenir de la digestion des protéines dans l'intestin tandis que la vache peut fabriquer les AA non-essentiels.**

### **Améliorer la définition des apports**

La plupart des modèles utilisés pour équilibrer les rations laitières ont développé des sous-modèles informatisés du rumen assez performants pour permettre une évaluation relativement précise des apports en protéines et en AA essentiels selon les caractéristiques des ingrédients de la ration. Dans une étude récente, nous avons comparé différents modèles nord-américains couramment utilisés. Les prédictions des flux duodénaux (à l'entrée du petit intestin) des protéines et AA essentiels obtenues avec ces modèles sont en général relativement précises, juste rétribution des efforts de recherche concentrés sur l'amélioration des sous-modèles du rumen. Dans cette étude (Pacheco et al., 2012), nous avons comparé les mesures des flux duodénaux de protéines et d'AA essentiels de 40 expériences (154 rations) avec les prédictions obtenues par les modèles suivants : AminoCow (AC), Agricultural Modeling Training Systems (AMTS), Cornell-Penn-Miner (CPM), et National Research Council (NRC, 2001). Le tableau 1 résume, de façon générale, que les modèles prédisent les flux de protéines au duodénum à l'intérieur d'une marge de 5% comparativement aux flux de protéines et d'AA essentiels effectivement mesurés. Plus de 90% de la variation observée de ce 5% était reliée à des facteurs non-contrôlés. Les modèles prédisent aussi à l'intérieur d'une marge de 5% le flux de protéines microbiennes, sauf le CPM qui présente une surestimation de +27%. Cependant, seulement le NRC prédit le flux de protéines alimentaires non-dégradées à l'intérieur de cette marge, tandis que les modèles AC and AMTS sous-prédisent cette fraction de -8 à -9% et le CPM de -24%. Pour les flux duodénaux des AA essentiels, le programme CPM prédit un flux plus élevé (>10%) pour l'Arg, l'His, l'Ile, la Met et la Lys; AMTS prédit un flux plus élevé pour l'Arg et la Met, tandis que les estimations des modèles AC et NRC sont, en moyenne, à l'intérieur d'une marge de 10%.

Un point commun à tous ces modèles (sauf le NRC) demande cependant une correction de concept importante. Dans la plupart des expériences où les flux duodénaux ont été mesurés, il est implicitement convenu que le flux de protéines alimentaires non-dégradées dans le rumen s'obtient par différence entre le flux duodéal total et le flux bactérien. Ce calcul ignore une réalité : la contribution au flux duodéal des sécrétions endogènes, i.e. des protéines qui arrivent au duodénum et qui ne proviennent pas des protéines alimentaires ou microbiennes, mais plutôt des sécrétions de l'animal lui-même dans le système digestif. Ces protéines comprennent principalement la salive, les sécrétions gastriques et pancréatiques, la bile et les cellules desquamées du système digestif, c'est-à-dire des cellules des muqueuses entraînées par l'abrasion du digesta (Tamminga et al., 1995). Leur contribution au flux duodéal n'est pas un nouvel apport à la vache puisque c'est elle-même qui a fabriqué ces protéines à partir d'AA qu'elle avait au préalable absorbés. À ce titre, cette contribution n'est pas un apport net de protéines et devrait être soustraite du flux digestif pour correctement apprécier les apports réels en protéines et en AA. Un

seul modèle, celui du NRC, reconnaît actuellement cette contribution au flux duodéal, contribution estimée selon un article de revue de Swanson (1977) à 1,9 g d'N/kg de matière sèche ingérée (MSI).

Au Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc de Agriculture et Agroalimentaire Canada à Sherbrooke, nous avons adapté chez la vache une nouvelle approche afin de réévaluer la contribution de ces sécrétions et les facteurs pouvant l'influencer (Ouellet et al., 2002, 2007 et 2010). En combinant l'utilisation de canules intestinales et d'AA marqué avec un isotope stable, nous avons développé un nouveau modèle (Figure 1). Ce modèle nous permet d'exclure des sécrétions endogènes la contribution de l'urée recyclée dans le rumen, qui ne représente pas un besoin en AA, et d'inclure les sécrétions endogènes utilisées par les bactéries pour fabriquer des protéines. Un modèle plus complet est actuellement en construction et sera incorporé dans la prochaine version du CNCPS (Cornell Net Carbohydrate and Protein System, version 7.0, Van Amburgh et Higgs, communication personnelle). Globalement, le flux endogène peut contribuer à hauteur de 15 à 20 % du flux duodéal total, ce qui est non négligeable. L'omettre des modèles de formulation entraîne donc une surestimation des apports nets et peut aussi amener une distorsion dans le profil d'AA disponibles car les sécrétions endogènes sont très riches en certains AA, notamment la Thr. Compte tenu de leurs compositions spécifiques en AA et de la digestibilité réelle associée à chaque source, des études sont en cours afin de mieux définir les facteurs affectant les sécrétions endogènes et les AA les plus affectés par cette prise en compte.

Ainsi, l'inclusion des protéines endogènes dans le flux non-bactérien, considéré comme la portion non-dégradé des protéines ingérées, entraînerait une surestimation de 24, 17 et 14% de celui-ci avec un apport faible, modéré ou élevé en PM, respectivement (Ouellet et al., 2007). De même, l'inclusion de protéines endogènes dans les protéines bactériennes passant au duodénum surestime l'apport net provenant de la protéine microbienne de 17, 15 et 15% avec un apport faible, modéré ou élevé en PM, respectivement (Ouellet et al., 2007). Ainsi, la prise en compte des sécrétions endogènes au duodénum et à l'iléon (fin de l'intestin) modifie substantiellement et de façon différente pour chaque AA l'estimation des AA disponibles pour l'animal (Tableau 2). Par exemple, l'apport net au duodénum est réduit de 11% ( $6/55 \times 100$ ) pour la Met et de 26% ( $27/109 \times 100$ ) pour la Thr.

- ***Les efforts de recherche ont été concentrés pour améliorer l'estimation des flux duodénaux en PM et en AA, et la plupart des modèles actuels sont relativement précis.***
- ***Il faut cependant soustraire de ces flux la contribution des protéines endogènes, i.e. les protéines sécrétées par la vache dans le système digestif, qui peuvent constituer de 15 à 20% du flux protéique à l'entrée de l'intestin.***

### **Améliorer la définition des besoins**

#### *Protéines exportées et leur composition en acides aminés*

L'estimation des besoins en PM et AA repose sur 2 facettes. D'une part, dans un contexte simplifié pour une vache non gestante sans gain ni perte de poids, nous devons quantifier la protéine « exportée » en dehors de l'animal, c'est-à-dire, le lait, les pertes endogènes urinaires, les pertes métaboliques fécales (PMF) et les téguments. Pour une vache gestante ou gagnant du poids, l'accumulation de protéines corporelles et de celles du fœtus doit aussi être considérée. D'autre part, l'efficacité avec laquelle la protéine digérée (ou les AA absorbés) est utilisée pour remplir ces fonctions doit aussi être déterminée. On peut définir les besoins en termes plus globaux de PM ou en termes d'AA individuels, auquel cas, il faudra attribuer une composition en AA à chaque type de protéine exportée.

Pour les protéines « exportées », l'exportation principale est facilement mesurable par la quantité de protéines laitières sécrétées par jour. Par ailleurs, il serait probablement plus approprié de ne pas amalgamer ensemble sous la terminologie « entretien » les besoins pour les téguments, les sécrétions endogènes urinaires et les PMF. Il est à noter qu'actuellement les PMF sont calculées à partir de la MSI selon Swanson (1977), sans tenir en compte d'un facteur d'efficacité, tel que recommandé par l'auteur lui-même. Les pertes pour les sécrétions endogènes urinaires et pour les téguments sont relativement faibles comparativement aux besoins liés aux PMF et au lait (Tableau 3). Nous avons donc concentré nos efforts sur ces 2 derniers points. En continuant à utiliser le modèle développé par Ouellet et al. (2002), nous avons estimé les besoins en PMF à 19 g PM/kg MSI, en utilisant un facteur d'efficacité de 67% (Lapierre et al., 2007). Cette estimation est légèrement plus faible que celle utilisée actuellement dans le modèle du

NRC (en g PM/jour =  $[MSI \text{ (kg/jour)} \times 30] - 0,50 \times [(PM_{\text{bactérien}}/0,80) - PM_{\text{bactérien}}]$ ) et beaucoup plus faible que l'estimation du CNCPS (en g PM/jour  $\approx MSI \text{ (kg/jour)} \times 30$ ; Tableau 3). Cette estimation plus faible des besoins coïncide avec la réduction de l'apport net en PM en excluant les sécrétions endogènes du flux duodénal.

L'estimation exacte des besoins en AA est encore dans la section « travaux en cours », mais il est déjà possible de mieux équilibrer les rations pour certains AA individuels en respectant quelques grandes lignes. Actuellement, les besoins de la vache en AA sont exprimés selon deux écoles de pensée, soit selon la méthode proportionnelle en % des PM, soit selon la méthode factorielle en g/jour. Les besoins exprimés en % des PM sont estimés en établissant une relation empirique entre le % de l'AA étudié dans l'apport en PM avec soit le % de protéines ou le rendement en protéines du lait. Les 2 AA les plus étudiés sous cet aspect sont la Lys et la Met, et des études récentes soulignent qu'il faut utiliser les recommandations émanant du même modèle que celui qui a servi pour équilibrer les rations (Tableau 4). Un intérêt grandissant est aussi apporté à l'His, surtout avec des rations plus faibles en protéines. En effet, les protéines microbiennes, constituant une proportion grandissant des PM à mesure que les apports de PM diminuent, sont relativement pauvres en His. Les besoins en His seraient semblables à ceux de la Met. La 2<sup>e</sup> approche, estimant les besoins en AA en g/jour, consiste à attribuer à chaque protéine exportée une composition en AA et ensuite une efficacité d'utilisation propre à chaque AA. Pour la composition en AA du lait, nous proposons une composition basée sur la composition moyenne des différentes fractions protéiques du lait, alors que pour la composition en AA des PMF, nous proposons une moyenne des rares valeurs obtenues chez la vache au duodénum combinée avec les valeurs iléales obtenues chez le porc (Lapierre et al., 2014; Tableau 5). L'efficacité d'utilisation sera discutée dans la section suivante.

- **Le besoin pour les pertes métaboliques fécales a été ré-évalué à 19 g PM/kg MSI en utilisant un nouveau modèle qui tient compte de la biologie.**
- **La composition en AA des PMF et du lait est ré-évaluée.**
- **Si la méthode proportionnelle est utilisée pour estimer les besoins d'un AA en % des PM, le même modèle doit être utilisé pour estimer les apports.**
- **Avec l'amélioration des connaissances, nous utiliserons de plus en plus la méthode factorielle, additionnant les besoins en AA en g/jour pour chaque fonction.**

#### *Efficacité d'utilisation de la protéine métabolisable et des acides aminés*

Les modèles nord-américains estiment les besoins en PM en utilisant une efficacité d'utilisation fixe des protéines digérées ou des AA absorbés vers les fonctions métaboliques. Pour les PM, cette efficacité est de 65 à 67 % (CNCPS : Fox et al., 2004; NRC, 2001), tandis que pour les AA, elle est fixe pour chaque AA mais varie d'un AA à l'autre (CNCPS : Fox et al., 2004; Tableau 6). Ainsi pour sécréter 1 kg/jour de protéines dans le lait, les besoins en PM seront de 1.5 kg/jour (1/0,67) et ainsi de suite pour les AA. Deux points attirent ici notre attention. Premièrement, pour certains AA, l'efficacité d'utilisation pour la lactation est de 100%, ce qui est plutôt improbable au niveau biologique. Le CNCPS a adopté ces coefficients en utilisant le ratio de la sécrétion dans les protéines du lait sur le prélèvement mammaire de chaque AA. Cependant, de par la nature et l'emplacement des enzymes responsables de l'oxydation des AA, certains AA ne sont pas oxydés au niveau mammaire, mais plutôt au niveau hépatique (Lobley et Lapierre, 2003; Lapierre et al., 2005). Ainsi, l'utilisation de ce ratio pour estimer les besoins en lactation crée une distorsion dans les besoins relatifs des AA essentiels. La prochaine révision du modèle CNCPS actuel (version 6.1; Higgs et van Amburgh, communication personnelle) changera d'ailleurs ces ratios pour ceux présentés au Tableau 7.

Le 2<sup>e</sup> point à reconsidérer est l'utilisation d'un coefficient d'utilisation fixe, quel que soit l'apport! Il est clairement reconnu que le taux de recouvrement marginal en protéine du lait diminue à mesure que l'apport en protéine augmente (e.g. Hanigan et al., 1998; Metcalf et al., 2008). Dans un premier temps, nous avons proposé des coefficients d'efficacité de lactation variables, en fonction de l'apport (Doepel et al., 2004). Par la suite, nous avons proposé d'amalgamer les coefficients d'utilisation pour les besoins « d'entretien » et de lactation, tenant compte que la répartition anatomique des enzymes responsables de l'oxydation des AA n'est pas en lien avec les sites de synthèse et d'exportation des protéines. Ces coefficients d'utilisation demeurent toujours variables en fonction des apports digestifs (Tableau 7; Lapierre et al., 2007).

- ***Nous proposons d'amalgamer les coefficients d'utilisation des PM et des AA pour les besoins d'entretien et de lactation.***
- ***Ces coefficients d'utilisation demeurent toujours variables en fonction des apports digestifs.***

### **Améliorer l'efficacité d'utilisation de la protéine**

Bien que les systèmes d'alimentation ne soient pas parfaits, il est quand même possible d'entreprendre des actions pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'N alimentaire et de réduire les coûts d'alimentation de son troupeau. En équilibrant pour les besoins en PM et pour les principaux AA potentiellement limitants, i.e. His, Met et Lys, il semble réaliste de viser un taux de PB de la ration des vaches en lactation à environ 16 - 16.5% pour des vaches de 40 kg et plus (Broderick, 2006), à condition d'équilibrer non pas sur une base de PB mais de PM. Une ration à 16.5% de PB et une consommation de 26 kg de MSI/jour apportera un peu plus de 2500 g de PM/jour. Le premier défi à considérer lorsque l'on veut réduire la teneur en PB de la ration à 16% est la réduction de la marge de sécurité au niveau de la protéine servie aux vaches. Il est alors important d'être très vigilant, de suivre la production laitière et les composantes du troupeau et de bien connaître la composition des ingrédients servis. Les facteurs à considérer pour maintenir la productivité des vaches lorsque l'on sert une ration contenant 16 % de PB ou moins pour des vaches de plus de 40 kg de lait par jour sont 1) l'uniformité de la ration totale mélangée (RTM) servie, un tri minimum de la RTM et la constance dans l'alimentation des vaches; 2) un suivi journalier de la variation de la qualité des fourrages et de leur teneur en humidité; 3) la mise en place d'un programme d'échantillonnage et d'analyse des fourrages et sous-produits rigoureux et régulier; 4) le réajustement de la ou des rations aux besoins en PM et énergie de la vache type à l'aide d'un programme alimentaire reconnu et éprouvé; 5) la prise en note des quantités d'aliments offerts par groupe dans un registre et la vérification des quantités d'aliments servis à chaque groupe de vaches; 6) l'analyse à chaque mois des concentrations d'urée dans le lait de chacune des vaches ou au minimum du réservoir à lait à chaque collecte de lait et l'application des correctifs au besoin.

Il a été rapporté qu'une teneur en protéine dégradable dans le rumen (PDR) à moins de 8,8% de la ration avait un effet négatif sur la MSI et sur la production de lait (Li et al. 2009). Formuler des rations avec au moins 9% de PDR semble être un seuil à viser avec ce type d'animaux afin de maintenir une bonne microflore ruminale. Car si la « santé » de la microflore n'est pas optimale, à cause d'une déficience en PDR, il y a presque toujours une diminution dans l'ingestion et de la digestibilité de la ration. Une portion de la PDR dans le rumen doit aussi être présente sous forme de peptides ou d'AA libres, i.e. que l'urée ne peut pas remplacer complètement toute la PDR. L'urée servie dans la RTM ne devrait pas dépasser plus de 0.5-0.7% de la MSI totale.

- ***En diminuant le taux de PB de la ration, la marge de sécurité (autrement dit l'excès) est réduite : un bon suivi et la vigilance sont de mise.***

### **Quelques exemples réussis de diminution des apports**

Lors de récentes expériences, il a été possible de réduire à des niveaux très bas la teneur en PB de la ration sans affecter la production laitière, si on complémentait la ration de base avec les AA essentiels limitant potentiellement la production laitière. Ces AA doivent cependant être protégés de la dégradation du rumen. Par exemple, pour des vaches recevant une ration adéquate en PM (15.7% PB) et produisant 38.8 kg lait/jour et 1.13 kg de protéines vraies, la diminution de la PB à 13.6% a diminué les productions à 35.2 et 1.01 kg/jour respectivement. Par contre, l'ajout de Lys, Met et His protégées de la dégradation ruminale a restauré les productions à 38.5 et 1.14 kg/jour (Lee et al., 2012a).

Dans un autre essai de 8 mois réalisé dans l'état de New York de 2008 à 2009 (Higgs et al., 2012; Tableau 8), deux troupeaux de 400 et 600 vaches en lactation ont vu leur ration diminuée de 17,5 à 16,6% ou de 17,7 à 16,9% en PB sans diminuer la quantité de lait produit (moyenne 35,6 kg/j). Les teneurs en urée du lait avant le projet étaient de 14,8 et 14,5 mg/dL, pour le troupeau A et B, respectivement. L'adoption des rations plus basses en PB a permis de diminuer les teneurs en urée du lait à 12,5 et 12,0 mg/dL à la fin de l'essai. Cet exemple confirme qu'il est possible de diminuer la teneur en PB des rations actuellement servis aux vaches laitières. En tant que producteurs laitiers ou intervenants, on doit se poser la question suivante: est-ce que je peux réduire la quantité de PB, tout en maintenant ou diminuant peu l'apport en PM, que mes vaches reçoivent? Ainsi, ces exemples démontrent

clairement que plutôt que de viser un % de PB dans la ration, on doit plutôt équilibrer pour apporter suffisamment de PM et vérifier par la suite si l'apport pour certains AA, plus spécifiquement la Lys, la Met et l'His, est suffisant. Si l'apport en certains AA n'est pas suffisant, on peut inclure des ingrédients riches pour ces AA (e.g. le tourteau soya est riche en Lys mais pauvre en Met; le tourteau de canola est une bonne source de Lys et Met) ou inclure directement des AA protégés de la dégradation ruminale, en tenant compte de l'aspect économique, évidemment.

## RÉPERCUSSIONS ENVIRONNEMENTALES

La projection de consommation de produits laitiers et de viande bovine indique une augmentation de plus de 50% d'ici l'an 2050. Bien que les ruminants consomment des produits et sous-produits que les humains ne peuvent pas valoriser, il existe tout de même une compétition importante pour les ressources disponibles. Ainsi, que ce soit de manière volontaire ou involontaire, la production de lait devra améliorer son efficacité d'utilisation des protéines. Parmi les effets négatifs associés à une efficacité de production moindre que celle des monogastriques, on retrouve une plus grande émission de l'N dans l'environnement. La majorité des pertes d'N dans l'environnement se produisent par le lessivage des nitrates, la volatilisation de l'ammoniaque et les émissions d'oxyde nitreux dans les bâtiments d'élevage, structures d'entreposage des fumiers et lors de leur application au champ. La consommation d'N en excès des besoins se retrouve rapidement excrétée dans l'urine et c'est dans cette excrétion, beaucoup plus que dans les fèces, que l'N est le plus susceptible d'être perdu par lessivage et par volatilisation. Ainsi, réduire l'N urinaire diminuera significativement les impacts négatifs sur l'environnement. Une ration contenant 14,8% de PB vs 16,7% comprenait 35% moins d'N dans l'urine et avec une application similaire en N au sol d'un mélange de fèces et d'urine, la ration faible en PB a produit 53% moins de volatilisation d'N (Figure 2; Lee et al., 2012b).

**- La majorité des pertes d'N dans l'environnement se produisent par le lessivage des nitrates, la volatilisation de l'ammoniaque et les émissions d'oxyde nitreux.**

### Impact d'une diminution de l'apport en N sur les excréments azotés

Tel que mentionné dans l'introduction, chez la vache laitière, le transfert de la protéine alimentaire dans le lait au Québec est en moyenne légèrement supérieur à 25%, une efficacité inférieure à celle des monogastriques, se situant à près de 35% pour les porcs et 45% pour les poulets. Il faut cependant mentionner que les ruminants peuvent utiliser des sources alimentaires inutilisables pour l'humain. Selon Dijkstra et al. (2013), l'efficacité théorique maximale de l'utilisation de l'N pour une vache produisant 40 kg de lait par jour pourrait tout de même atteindre 43%. Quelques vaches ont parfois démontré des efficacités supérieures, mais ces fortes performances tendent à être associées à une mobilisation des protéines corporelles qui peut être observée durant quelques jours ou semaines particulièrement en début de lactation et sont donc transitoires. Compte tenu de ces observations, un objectif d'augmentation de l'efficacité entre 32 et 35% est probablement envisageable. Il est possible de concilier hautes productions laitières et meilleure efficacité de l'utilisation de l'N, car pour les troupeaux inscrits chez Valacta pour l'an 2013, l'efficacité d'utilisation augmente avec le niveau de production, atteignant 29.8 % pour les troupeaux produisant plus de 11 000 kg /vache par an. Nous verrons dans une section ultérieure l'impact économique d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'N en harmonisant adéquatement l'apport avec les besoins!

Dans un modèle de prédiction de l'excrétion d'N (Kebreab et al., 2009; Figure 3), on constate que la majorité de l'N éliminé l'est via l'urine. Il est important de noter que l'axe des y a une échelle deux fois plus petite pour les figures des fèces et du lait comparativement à celle des pertes urinaires et d'excréta totaux. La perte urinaire d'N augmente plus vite que la perte fécale d'N. En fait, l'excrétion urinaire d'N représente environ 56% des pertes pour une vache qui consomme 500 g d'N/jour (23 kg de matière sèche d'une ration à 14% de PB) et cette proportion augmente à plus de 64% lorsque la vache ingère 640 g d'N/jour (23 kg de matière sèche d'une ration à 17,5% PB). Par contre l'N fécal s'élève dans les fèces lorsqu'il y a plus d'amidon de la diète qui n'est pas digéré dans le rumen et l'intestin et qui atteint le cæcum, où des fermentations microbiennes augmentent la quantité d'N perdu dans les fèces (Hassanat et al., 2009). Le traitement adéquat de l'amidon des grains et des fourrages, comme l'ensilage de maïs est important pour réduire cette situation. La forte augmentation d'excrétion d'N via l'urine à mesure que les apports en protéines augmentent s'explique par le fait que la protéine alimentaire dégradée qui est



excédentaire au besoin de la flore du rumen produira dans le rumen un surplus d'ammoniaque. Cette ammoniaque sera transformée en urée dans le foie avant d'être relâchée dans le sang. De même, l'excès d'AA est catabolisé en grande partie par le foie aussi en urée. L'urée fabriquée par le foie est en partie retournée dans le rumen pour y être utilisée entre autre par les bactéries pour fabriquer d'autres protéines tandis que l'urée excédentaire dans le sang sera éliminée via l'urine par les reins (Lapierre et Lobley, 2001). Les concentrations d'urée dans le sang s'équilibrent avec les concentrations d'urée dans le lait. Ceci explique pourquoi les concentrations d'urée dans le sang et du lait soient positivement corrélées entre elles et avec la teneur en N des rations, tel que discuté dans la prochaine section.

- **Le surplus d'N alimenté aux vaches est principalement excrété sous forme d'urée dans l'urine, la forme la plus polluante, d'où l'importance de la diminuer.**
- **En ajustant adéquatement les rations au Québec, on pourrait réduire l'excrétion d'azote de 2 000 tonnes par année, soit 15% des déjections actuelles, sans compromettre la productivité.**

#### **Un « à-côté » de l'excrétion urinaire d'urée : l'urée dans le lait, une mesure indirecte de l'efficacité**

Comme les concentrations d'urée du sang et du lait soient positivement corrélées entre elles et avec la teneur en N des rations, les concentrations d'urée dans le lait peuvent être utilisées comme un outil de diagnostic de l'équilibre protéique des rations de votre troupeau. Une méta-analyse récente, avec une banque de données présentant une variation en PB de la ration entre 9,4 à 24,1% et une concentration en urée du lait variant entre 3,8 et 30,2 mg d'urée-N/dL, démontre clairement la relation entre l'excrétion urinaire d'N et la teneur en urée du lait (Figure 4) et entre le % de PB de la ration et la teneur en urée du lait (Figure 5) que ce soit pour l'Amérique du Nord ou pour la région du nord-ouest de l'Europe (Spek et al., 2013). Cette étude confirme que les facteurs urée du lait et teneur en PB de la ration sont les plus corrélés pour expliquer l'excrétion d'N urinaire total ( $r^2 = 0,72$  et  $0,79$ , respectivement) et ainsi que l'N sous forme d'urée dans l'urine ( $r^2 = 0,87$  et  $0,81$ , respectivement).

Au Québec, les recommandations ont été révisées à la baisse en 2010, et on recommande actuellement des concentrations variant entre 8 et 14 mg d'urée-N/dL de lait, selon l'historique du troupeau (Lefebvre et Lacroix, 2010). La concentration en urée du lait est influencée par le moment de la traite, les saisons, le poids de vaches, la race, le géniteur de la vache, et les facteurs nutritionnels tels que la protéine dégradable ou non-dégradable dans le rumen et les hydrates de carbone non-fibreux. Un exposé récent par M. Wattiaux (ADSA, 2014) suggère d'utiliser les sécrétions totales d'urée plutôt que les concentrations pour minimiser les variations diurnes. Selon des experts américains, pour un troupeau alimenté selon les besoins de l'animal en suivant méticuleusement un programme d'alimentation bien équilibrée en protéine et énergie, la recommandation de la teneur en urée du lait est de 12 mg/dL et moins (Aguilar et Hanigan, 2014). Dans cette étude effectuée dans l'état de Virginie, la relation entre le taux d'urée dans le lait et le % de PB de la ration était en moyenne de 1,15 mg/dL pour chaque unité de pourcentage de PB de la ration. Donc, si une vache à un taux d'urée du lait de 13 mg/dL, il serait possible de réduire par un peu moins que 1% (0,87%) la teneur en PB de la ration avec un taux visé de 12 mg/dl.

- **Au Québec, on recommande des concentrations variant entre 8 et 14 mg d'urée-N/dL de lait.**

#### **RÉPERCUSSIONS MONÉTAIRES : IMPACT POUR LA FERME MOYENNE QUÉBÉCOISE**

Quelle serait l'impact d'une meilleure évaluation des besoins en protéines et en AA pour les producteurs laitiers québécois? Pour répondre à cette question, nous avons utilisé le modèle N-CyCLES qui permet de simuler l'impact global d'un changement de gestion sur une ferme laitière. Le scénario initial représente la situation d'une ferme moyenne du Centre du Québec 87 vaches livrant 6870 hL de lait standardisé à 4,0% gras et 3,4% protéine, soit un peu plus que la moyenne québécoise, et utilisant des aliments simples pour l'alimentation du troupeau. Les vaches en lactation sont regroupées en 2 groupes d'alimentation en fonction de leur stade de lactation. Nous avons évalué de façon conservatrice qu'une meilleure connaissance des besoins en AA permettrait une baisse d'environ 1,5 point du % de PB de la ration. Ce % de PB passerait ainsi de 17,4 à 15,9 % en moyenne. En utilisant les prix moyens des concentrés pour 2009-2011, l'amélioration du bénéfice est de 1700\$ (Tableau 9). Toutefois, dans le contexte actuel (2014) où les prix des concentrés, particulièrement ceux des suppléments protéiques sont élevés, l'amélioration du bénéfice dépasse les 4000\$ ou les 0,58 \$/hL. Du même coup, une meilleure adéquation entre les apports et les besoins en protéines permettrait de diminuer le bilan azote de la ferme de plus de 1260 kg

ou 12%. Ceci permettrait donc d'améliorer, sans effort pour les producteurs, à la fois la durabilité économique et la durabilité environnementale des fermes laitières.

**- Une baisse d'environ 1,5 point du % de PB de la ration, de 17,4 à 15,9 %, améliorerait le bénéfice annuel 1700\$ à 4000\$, pour une exploitation de 87 vaches, et cela sans réduire la production de lait.**

## **CONCLUSION**

Le potentiel qu'ont les vaches d'utiliser des sources d'aliments fibreux via la dégradation microbienne du rumen vient drôlement compliquer l'estimation des apports et par conséquent des besoins en PM et en AA. Néanmoins, de nombreux efforts de recherche ont permis de développer des modèles permettant de prédire les flux de protéines arrivant au duodénum pour être digérés. Le défi actuel est d'améliorer notre prédiction de l'utilisation de cette protéine et de ces AA. Plusieurs modèles utilisés pour équilibrer les rations sont à un point charnière pour mieux intégrer la biologie et on devrait observer des améliorations notables au cours des prochaines années. Cependant les connaissances et les outils actuels permettent déjà d'améliorer l'équilibre des rations au niveau de l'apport en protéines en utilisant les PM plutôt que la PB, et aussi en ajustant les apports de certains AA plus étudiés, notamment l'histidine, la lysine et la méthionine. L'utilisation de ces outils nous permet déjà d'équilibrer les rations à des niveaux de PB plus bas que ce qui était traditionnellement utilisé, et ce sans pénaliser la productivité. Il en résultera une diminution de l'empreinte environnementale des fermes laitières, d'une part, mais aussi une économie substantielle des coûts de production pour les exploitations laitières.

**Tableau 1.** Moyennes des flux de protéines et d'acides aminés essentiels (g/jour) observés et prédits avec différents modèles<sup>1</sup>

Variable	Observé	Modèles			
		AC	AMTS	CPM	NRC
Protéine brute	3027	2945	3026	3148	2951
Protéine microbienne	1610	1605	1678	2050	1573
Fraction non-dégradée	1480	1368	1348	1126	1415
Arginine	122	123	152	160	116
Histidine	61	59	66	69	56
Isoleucine	119	127	126	134	120
Leucine	230	220	219	224	226
Lysine	157	161	164	178	160
Méthionine	47	48	53	59	47
Phénylalanine	129	128	134	140	126
Thréonine	123	124	120	127	120
Valine	141	145	147	155	138

<sup>1</sup>Adapté de Pacheco et al. (2012)

<sup>2</sup>AC = AminoCow; AMTS = Agricultural Modeling and Training Systems, CPM = Cornell-Penn-Miner version of CNCPS; NRC = National Research Council (2001): voir le texte pour les détails.

**Tableau 2.** Disponibilité réelle des acides aminés lorsque les sécrétions endogènes sont tenues en compte dans le calcul des mesures de flux intestinal

Paramètre, g/jour	His	Ile	Leu	Lys	Met	Phe	Thr	Val
Duodéal (D)	53	120	189	144	55	111	109	133
N endogène duodéal (ED)	15	19	20	30	6	19	27	25
Net duodéal (ND = D - ED)	39	101	169	114	49	92	82	108
Iléal (I)	24	38	61	37	19	42	44	55
AA apparent digestible à l'iléon (AI = D-I)	30	82	128	108	36	70	65	78
Endogène iléal (EI)	7	10	11	14	3	9	15	13
Duodéal indigestible	5	6	6	9	2	6	8	8
Petit intestin non-réabsorbé (EPI)	2	4	5	4	1	4	7	6
AA réellement digestible à l'iléon (RDI = AI + EPI)	32	86	133	112	38	73	72	84
Apport net d'AA réellement digestible à l'iléon (ANRD = ND - (I - EI))	22	73	119	91	33	60	53	66
Disponible, tenant compte des pertes endogènes, (Disp = ANRD - EI)	15	63	108	78	30	51	38	53

**Tableau 3.** Besoins en protéines métabolisables (g/jour) pour chacune des protéines « exportées » selon différents modèles<sup>1</sup>

Protéines “exportées”	Modèle <sup>2</sup>		
	NRC	AMTS	Proposition
Téguments	15	15	15
Endogène urinaire	108	108	108
Métabolique fécal	630	810	510
Endogène au duodénum	191	-	-
Lait	2015	2060	2015
<b>TOTAL</b>	<b>2959</b>	<b>2993</b>	<b>2648</b>

<sup>1</sup>Pour une vache pesant 700 kg, consommant 27 kg/jour de matière sèche et produisant 45 kg de lait par jour à 3.0% de protéine vraie.

<sup>2</sup>AMTS = Agricultural Modeling and Training Systems (version commercial du CNCPS); NRC = National Research Council (2001): voir le texte pour les détails.

**Tableau 4.** Proportion optimale (%) de lysine et de méthionine dans l’apport de protéines métabolisables pour maximiser le rendement ou la concentration en protéine du lait selon différents modèles

Réponse à maximiser	Modèle <sup>1</sup>	Acide aminé	
		Lysine	Méthionine
Rendement en protéines	NRC	7.08	2.35
	NRC - révision <sup>2</sup>	6.95	2.38
	AMTS <sup>2,3</sup>	6.74	2.31
	CPM <sup>2</sup>	7.36	2.44
Concentration en protéines	NRC	7.24	2.38
	NRC - révision	6.89	2.23
	AMTS	6.84	2.40
	CPM	7.23	2.40

<sup>1</sup>NRC = National Research Council (2001); AMTS = Agricultural Modeling and Training Systems (version commercial du CNCPS); CPM = Cornell-Penn-Miner version of CNCPS.

<sup>2</sup>Whitehouse et al., 2010 a et b.

<sup>3</sup>Whitehouse et al., 2009 pour la méthionine en utilisant le modèle de formulation AMTS.

**Tableau 5.** Composition proposée en acides aminés (AA) du lait et des pertes métaboliques fécales (PMF)<sup>1</sup>

AA	Lait	PMF
	mg AA / g protéine vraie	mg AA / g protéine brute <sup>2</sup>
Arginine	37.4	32.3
Histidine	29.0	20.0
Isoleucine	61.3	31.5
Leucine	103.6	40.1
Lysine	87.6	42.4
Méthionine	29.9	10.6
Phénylalanine	52.2	28.5
Thréonine	47.0	46.2
Tryptophane	16.2	12.0
Valine	69.3	43.9
Alanine	35.4	41.7
Asparagine (Asn)	42.7	67.6 <sup>3</sup>
Aspartate (Asp)	37.8	-
Cystéine	9.0	19.6
Glutamine (Gln)	96.5	96.3 <sup>3</sup>
Glutamate (Glu)	128.8	-
Glycine	20.0	122.1
Proline	103.8	68.4
Sérine	67.4	51.2
Tyrosine	58.4	25.3

<sup>1</sup>Voir texte pour détail.

<sup>2</sup>Avec 80% de protéine vraie.

<sup>3</sup>Pour PMF, Asn est la somme de Asn+Asp et Gln est la somme de Gln+Glu.

**Tableau 6.** Coefficients d'efficacité d'utilisation des acides aminés (AA) pour les besoins d'entretien et de lactation actuellement utilisé par le CNCPS<sup>1</sup>

Fonction	AA								
	Arg	His	Ile	Leu	Lys	Met	Phe	Thr	Val
Entretien	0.85	0.85	0.66	0.66	0.85	0.85	0.85	0.85	0.66
Lactation	0.35	0.96	0.66	0.72	0.82	1.00	0.98	0.78	0.62

<sup>1</sup>Adapté de Fox et al., 2004.

**Tableau 7.** Coefficients d'efficacité d'utilisation combinée (entretien et lactation) des AA et de la protéine métabolisable (PM) en fonction de leur apport optimal

AA	% de l'apport optimal			
	50%	75%	100%	125%
Arginine	0.68	0.63	0.58	0.52
Histidine	0.96	0.85	0.76	0.68
Isoleucine	0.77	0.72	0.67	0.60
Leucine	0.74	0.67	0.61	0.55
Lysine	0.81	0.75	0.69	0.62
Méthionine	0.85	0.74	0.66	0.59
Phénylalanine	0.70	0.63	0.57	0.51
Thréonine	0.68	0.68	0.66	0.60
Valine	0.79	0.72	0.66	0.59
<b>PM</b>	<b>0.72</b>	<b>0.67</b>	<b>0.62</b>	<b>0.56</b>

<sup>1</sup>Calculé à partir de la banque de données de Doepel et al. (2004) et adapté de Lapierre et al., 2007; estimé à partir des AA dans la protéine du lait plus les besoins de téguments, pertes endogènes urinaires et pertes métaboliques fécales, tel que proposé dans le présent article divisé par l'apport net en AA (NRC, 2001).

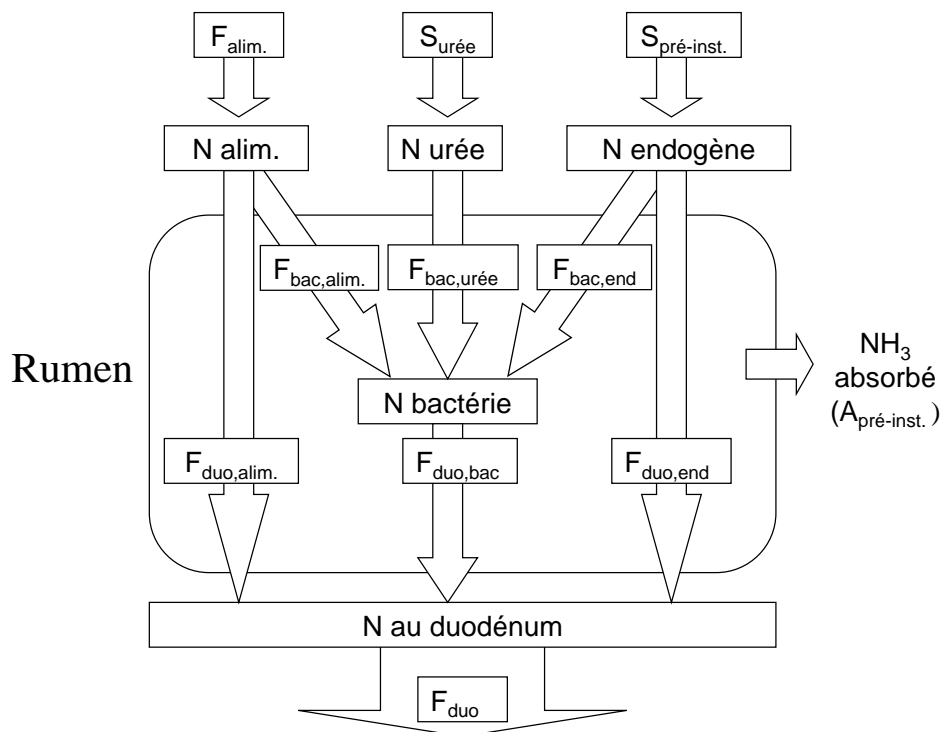
**Tableau 8.** Performances de 2 troupeaux dans l'état de Ney York qui ont réduit l'apport de protéine brute alimentaire.

Paramètres	Troupeau A		Troupeau B	
	Ration initiale	Ration finale	Ration initiale	Ration finale
Lait, kg/j	35,9	36,3	37,5	36,4
Lipides du lait, %	3,77	3,63	3,56	3,63
Protéine vraie du lait, %	3,03	3,11	2,96	3,07
N uréique du lait, mg/dL	15,7	12,3	13,5	12,0
Fourrage, % de MS de la ration	54	57	60	48
Ensilage de maïs, % du fourrage	32	40	53	60
Ration (base MS)				
Protéine brute, %	17,6	16,6	17,7	16,9
NDF, %	32,5	33,6	31,3	33,2
Lipide, %	4,3	3,8	5,4	4,2
Protéine métabolisable, g/j	2950	2769	2646	2690
N ingéré, g/j	697	641	653	632
N lait, g/j	195	199	183	189
N fécal, g/j	250	237	233	231
N urinaire, g/j	250	204	236	210
N total excrété, g/j	500	441	469	441
N lait, % N ingéré	28	31	28	30
N lait : N urinaire	0,78 : 1	0,98 : 1	0,76 : 1	0,83 : 1
Coût d'alimentation, \$/vache/j	4,07	3,35	4,33	4,12
Revenu du lait : coût d'aliments	5,32	6,31	4,79	4,98

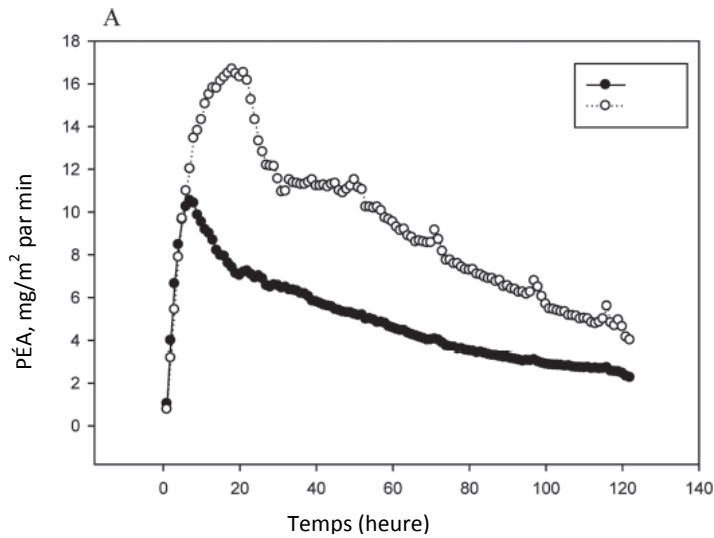
**Tableau 9.** Impact prévisible d'une meilleure estimation des besoins en AA pour une ferme moyenne du Centre du Québec<sup>1</sup>

Paramètres	Prix moyens des concentrés	Prix élevés des concentrés
Augmentation du bénéfice, \$/an	1706	4005
Diminution du bilan azote, kg/an	-1263	-1270
Diminution du bilan phosphore, kg/an	-39	-42

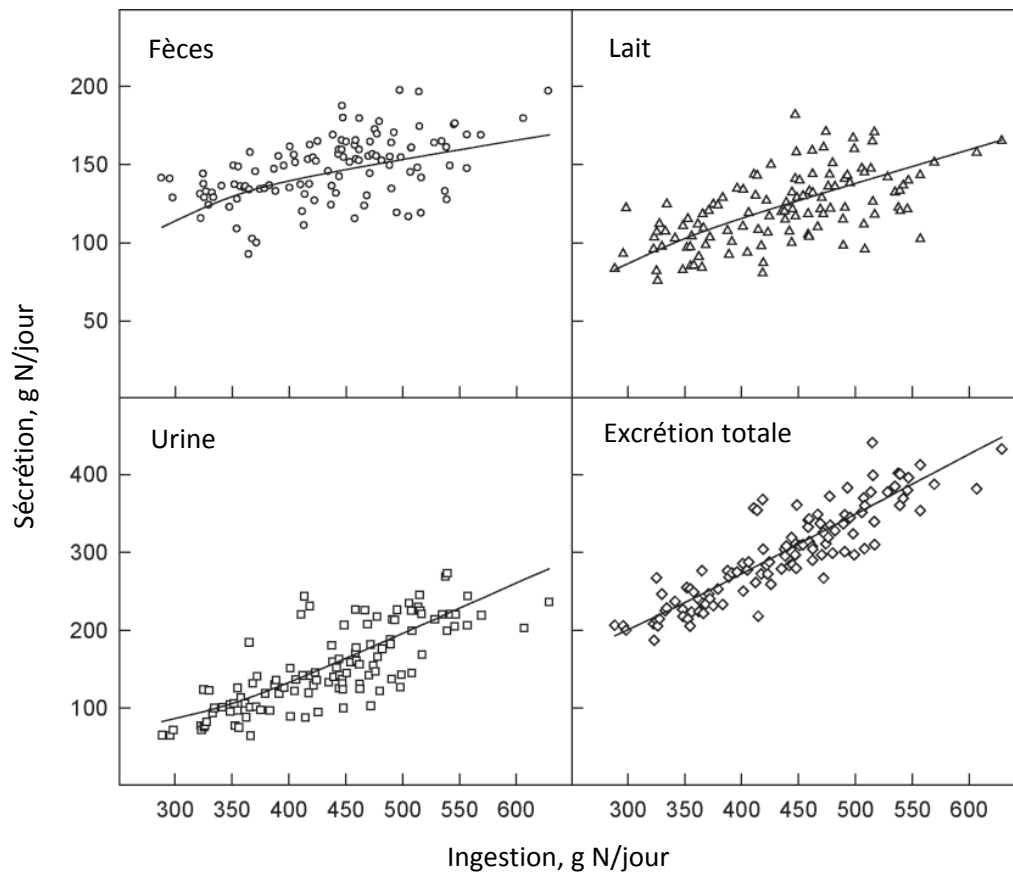
<sup>1</sup>Ferme de 142 ha en culture et de 87 vaches livrant 6870 hL de lait standardisé à 4,0% gras et 3,4% protéine.



**Figure 1.** Schématisation des sources d'N au rumen et au duodénum. F= flux, S = sécrétion, bac = bactérie end= sécrétions endogène d'N (adapté de Ouellet et al., 2002)

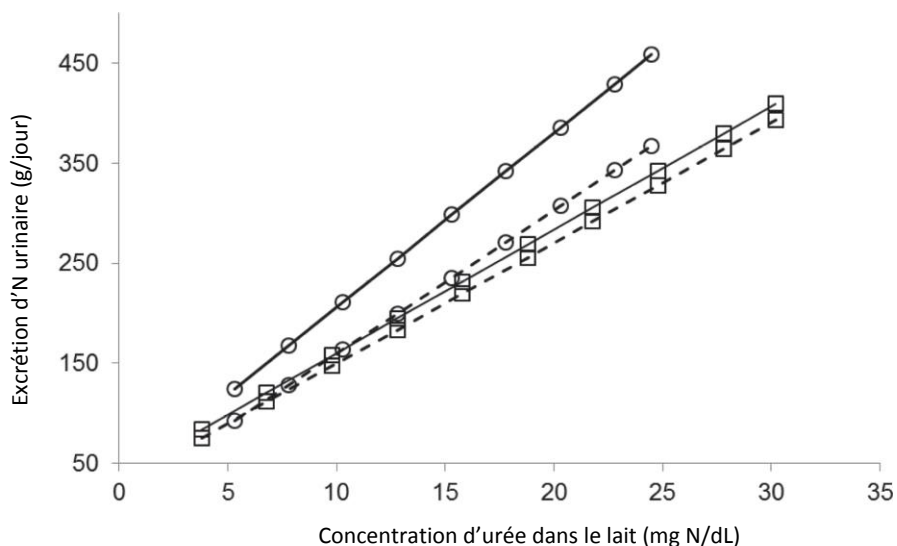


**Figure 2.** Effet de la concentration en protéine brute (● : 14,8% vs ○ : 16,7%) de la ration sur le potentiel d'émission d'ammoniaque (PÉA) de fèces et d'urine. Adapté de Lee et al. (2012b).

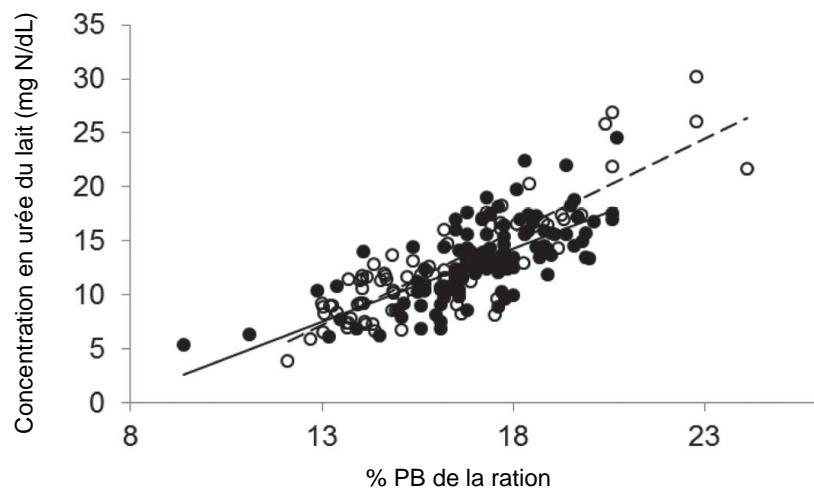


**Figure 3.** Relation entre l'N ingéré et la sécrétion d'N dans le lait, les fèces et l'urine. Adapté de Kebreab et al. (2009).





**Figure 4.** Relation entre la concentration d'urée dans le lait (mg N/dL) et l'excrétion d'N urinaire (g/jour). ○ : Amérique du Nord et □ : nord-ouest de l'Europe; lignes en continues : valeurs obtenues par collecte totale d'urine et lignes en pointillé : calcul entre l'ingestion moins l'N excrété via les fèces et le lait (adapté de Spek et al., 2013).



**Figure 5.** Relation entre la teneur en protéine de la ration (PB, % matière sèche (MS)) et la concentration en urée du lait (mg N/dL). ● : Amérique du Nord et ○ nord-ouest de l'Europe (adapté de Spek et al., 2013).

## Références

- Broderick, G. 2006. Nutritional strategies to reduce crude protein in dairy diets. 21<sup>st</sup> Annual Southwest Nutrition & Management Conference Proceedings. University of Arizona. p1-14.
- Clark, J.H., T.H. Klusmeyer et M.R. Cameron. 1992. Microbial protein synthesis and flows of nitrogen fractions to the duodenum of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 75:2304-2323.
- Dijkstra, J., C.K. Reynolds, E. Kebreab, A. Bannink, J.L. Ellis, J. France et A.M. van Vuuren. Challenges in ruminant nutrition: towards minimal nitrogen loss in cattle. Pages 47-58 dans *Energy and protein metabolism and nutrition in sustainable animal production*. EAAP No. 134. Ed. J.W. Oltjen, E. Kebreab and H. Lapierre. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands.
- Doepel, L., D. Pacheco, J.J. Kennelly, M.D. Hanigan, I.F. López et H. Lapierre. 2004. Milk protein synthesis as a function of amino acid supply. *J. Dairy Sci.* 87:1279-1297.
- Fox, D.G., L.O. Tedeschi, T.P. Tylutki, J.B. Russell, M.E. Van Amburgh, L.E. Chase, A.N. Pell et T.R. Overton. 2004. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Anim. Feed Sci. Tech.* 112:29-78.
- Higgs, R.J., Chase, L.E. et M.E. Van Amburgh. 2012. Case study: Application and evaluation of the Cornell net carbohydrate and protein system as a tool to improve nitrogen utilization in commercial dairy herds. *Professional Animal Scientist.* 28:370-378.
- Hanigan, M.D., J.P. Cant, D.C. Weakley et J.L. Beckett. 1998. An evaluation of postabsorptive protein and amino acid metabolism in the lactating dairy cow. *J. Dairy Sci.* 81:3385-3401.
- Hassanat, F., H. Lapierre, D.R. Ouellet. 2009. Effect of starch infusion site on glucose rate of appearance (Ra) and digestibility of starch and nitrogen in dairy cows. *J. Anim. Sci.* Vol. 87 (E-suppl. 2) / *J. Dairy Sci.* Vol. 92 (E-suppl.1): 97.
- Kebreab, E., J. Dijkstra, A. Bannink et J. France. 2009. Recent advances in modeling nutrient utilization in ruminants. *J. Anim. Sci.* 87:E111-122
- Lapierre, H. et G.E. Lobley. 2001. Nitrogen recycling in the ruminant: a review. *J. Dairy Sci.* 84 (E. Suppl.):E223-E236.
- Lapierre, H., R. Berthiaume, G. Raggio, M.C. Thivierge, L. Doepel, D. Pacheco, P. Dubreuil et G.E. Lobley. 2005. The route of absorbed nitrogen into milk protein. *Animal Science* 80:11-22.
- Lapierre, H., G.E. Lobley, D.R. Ouellet, L. Doepel et D. Pacheco. 2007. Amino acid requirements for lactating dairy cows: reconciling predictive models and biology. *Proc. Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers Dpt. Anim. Science, Cornell University, NY*:39-59.
- Lapierre, H., L. Doepel, D. Pacheco et D.R. Ouellet. 2014. Amino acid requirement and post-absorptive metabolism in cattle: implications for ration formulation. Pages 167-178 in *Proc. Florida Ruminant Nutrition Symposium, University of Florida, Florida, USA*.
- Lee, C., A.N. Hristov, T.W. Cassidy, K.S. Heyler, H. Lapierre, G.A. Varga, M.J. de Veth, R.A. Patton et C. Parys. 2012a. Rumen-protected lysine, methionine, and histidine increase milk protein yield in dairy cows fed a metabolizable protein-deficient diet. *J. Dairy Sci.* 95:6042-6056.
- Lee, C., A.N. Hristov, C.J. Dell, G.W. Feyereisen, J. Kaye et D. Beegle. 2012b. Effect of dietary protein concentration on ammonia and greenhouse gas emitting potential of dairy manure. *J. Dairy Sci.* 95:1930-1941.
- Lefebvre, D. et R. Lacroix. 2010. L'urée du lait, pour optimiser la protéine de la ration. Pages 34-36. dans *Le producteur de lait québécois*. Juin 2010.
- Li, L. Cyriac, J., Knowlton, K.F., Marr, L.C., Gay, S.W., Hanigan, D.M. et J.A. Ogejo. 2009. Effects of reducing dietary nitrogen on ammonia emissions from manure on the floor of a naturally ventilated free stall dairy barn at low (0-20°C) temperatures. *J. Environ. Qual.* 38:2172-2181.
- Lobley, G.E. et H. Lapierre. 2003. Post-absorptive metabolism of amino acids. Pages 737-756 dans *Progress in research on energy and protein metabolism*. EAAP publication No.109. Ed. W.B. Souffrant and C.C. Metges.
- Metcalf, J.A., R.J. Mansbridge, J.S. Blake, J.D. Oldham et J.R. Newbold. 2008. The efficiency of conversion of metabolizable protein into milk true protein over a range of metabolizable protein intakes. *Animal* 2:1193-1202.
- NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. 7th rev. . ed. Natl. Acad. Sci., Washington, DC.
- Ouellet, D.R., M. Demers, G. Zuur, G.E. Lobley, J.R. Seoane, J.V. Nolan et H. Lapierre. 2002. Effect of dietary fiber on endogenous nitrogen flows in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 85:3013-3025.

- Ouellet, D.R., D. Valkeners, G. Holtrop, G.E. Lobley et H. Lapierre. 2007. Contribution of endogenous secretions and urea recycling to nitrogen metabolism. Pages 1-24 dans Proc. Cornell Nutrition Conference for feed manufacturers. Dpt. Anim. Science, Cornell University, NY.
- Ouellet, D.R., R. Berthiaume, G. Holtrop, G.E. Lobley, R. Martineau et H. Lapierre. 2010. Effect of method of conservation of timothy on endogenous nitrogen flows in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:4252-4261.
- Pacheco, D., R.A. Patton, C. Parys et H. Lapierre. 2012. Ability of commercially available dairy ration programs to predict duodenal flows of protein and essential amino acids in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 95:937-963.
- 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.
- Tamminga, S., H. Schulze, J. Van Bruchem et J. Huisman. 1995. The nutritional significance of endogenous N-losses along the gastro-intestinal tract of farm animals. *Arch. Tierernahr.* 48:9-22.
- Valacta. 2013. L'évolution de la production laitière québécoise. Le producteur de lait québécois.
- Whitehouse, N., C. Schwab, T. Tylutki, D. Luchini et B. Sloan. 2009. Comparison of optimal lysine and methionine in metabolizable protein estimated by the NRC (2001), CPM-Dairy (v.3.0.10) and AMTS.Cattle (v.2.1.1) models. *J. Dairy Sci.* 92, E-Suppl. 1: 103.
- Whitehouse, N., C. Schwab, D. Luchini et B. Sloan. 2010a. A critique of dose-response plots that relate changes in content and yield of milk protein to predicted concentrations of lysine in metabolizable protein by the NRC (2001), CPM-Dairy (v.3.0.10) and AMTS.Cattle (v.2.1.1) models. *J. Dairy Sci.* 93, E-Suppl. 1: 447.
- Whitehouse, N., C. Schwab, D. Luchini et B. Sloan. 2010b. A critique of dose-response plots that relate changes in content and yield of milk protein to predicted concentrations of methionine in metabolizable protein by the NRC (2001), CPM-Dairy (v.3.0.10) and AMTS.Cattle (v.2.1.1) models. *J. Dairy Sci.* 93, E-Suppl. 1: 447.