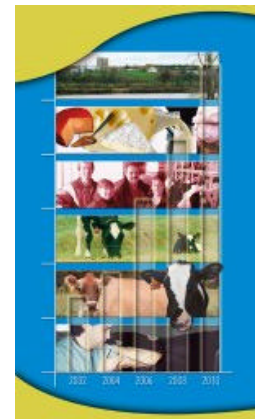


26e Symposium sur les bovins laitiers

Préparez l'avenir !

Une initiative du

Comité bovins laitiers



Équilibrer les rations pour les acides aminés : rêve ou réalité

Hélène LAPIERRE, Ph.D., agronome, chercheure

Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc
Agriculture et Agroalimentaire Canada
Lennoxville

Conférence préparée avec la collaboration de :

Robert BERTHIAUME, M.Sc., Ph.D., chercheur

Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc
Agriculture et Agroalimentaire Canada, Lennoxville

Pascal DUBREUIL, D.M.V., M.Sc., Ph.D., professeur titulaire

Faculté de médecine vétérinaire
Université de Montréal, Saint-Hyacinthe

24 octobre 2002
Université de Sherbrooke
Centre culturel



INTRODUCTION

Peut-on encore penser augmenter l'efficacité de l'utilisation de la protéine alimentaire ? Si l'on considère qu'en moyenne, pendant une lactation, environ 25-35 % de la protéine ingérée sera transférée au lait tandis que le reste sera excrété en urine (35-45 %) ou dans les fèces (30-40 %), il est raisonnable de penser qu'il y a place à amélioration. Mais comment y arriver ? Il y a quelques années, les besoins en protéines des vaches laitières étaient exprimés en protéines brutes. Puis, le concept de dégradabilité ruminale des protéines s'est développé, a été et est encore utilisé avec succès pour équilibrer les rations. Le système se peaufine et on parle maintenant de protéines métabolisables ! Mais si l'on considère ce qui est effectivement utilisé par l'animal, ce n'est pas des besoins en protéines dont il faudrait parler, mais des besoins en acides aminés.

PROTÉINES, AZOTE, ACIDES AMINÉS ?

Tout d'abord, que sont les acides aminés ? Les acides aminés sont les blocs constitutifs des protéines. Dans l'organisme, il y en a 20 au total qui sont utilisés pour fabriquer toutes les protéines que le corps nécessite. Peu importe la fonction de la protéine, que ce soit une hormone (insuline, somatotrophine), un nutriment pour le nouveau-né (caséine) ou une structure (muscle- myosine), la structure est toujours la même : une séquence définie d'acides aminés alignés les uns à la suite des autres. Une analogie explique bien cette relation : les acides aminés sont comme les lettres de l'alphabet tandis que les protéines sont comme les mots. Cela ne prend que 26 lettres pour écrire tous les mots de la langue française, comme cela ne prend que 20 acides aminés pour fabriquer toutes les protéines ! Mais pour qu'un mot soit orthographié correctement, chaque lettre doit être à sa place et une lettre ne peut en remplacer une autre. Il en va de même pour qu'une protéine soit fonctionnelle; les acides aminés doivent être dans une séquence très précise et un acide aminé ne peut en remplacer un autre. Ce que l'animal utilise ultimement, ce que chaque cellule doit aller chercher dans l'approvisionnement sanguin pour se nourrir et fabriquer des protéines, ce sont ces acides aminés individuels, pas les protéines. Alors, l'idéal serait de pouvoir définir adéquatement les besoins en chacun des acides aminés d'une part et l'apport alimentaire de ces acides aminés d'autre part. Actuellement, quand on définit les besoins et les apports en protéines, c'est comme dire : « J'ai besoin de 133 lettres pour écrire des mots ! »... On a plus de chances d'écrire les bons mots et plus de mots si on peut spécifier quelles lettres sont nécessaires. C'est le défi à relever avec les acides aminés !

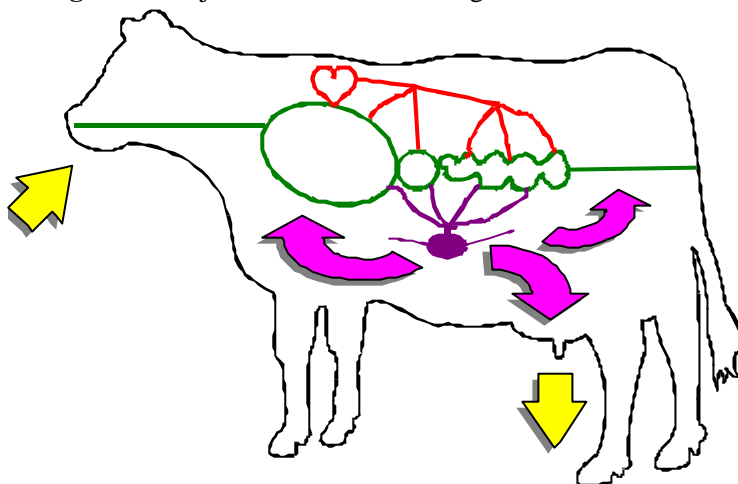
Les acides aminés se divisent en deux catégories: les acides aminés essentiels et les acides aminés non essentiels. Bien que les deux catégories soient essentielles à la fabrication de protéines, ces qualificatifs ont été attribués selon la capacité physiologique de l'animal à les fabriquer. Brièvement, rappelons que l'animal est incapable de fabriquer les acides aminés essentiels (histidine, isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane et valine) sauf à partir de métabolites provenant de ces acides aminés mêmes, alors qu'il possède les voies métaboliques de synthèse pour les acides aminés non essentiels (alanine, aspartate, asparagine, cystéine, glutamate, glutamine, glycine, proline, sérine, tyrosine). On a aussi ajouté le qualificatif semi-essentiel pour les

acides aminés pouvant être synthétisés mais en quantité insuffisante pour couvrir les besoins d'animaux en forte production; c'est le cas de l'arginine.

INTÉGRATION DE L'ÉTUDE DES APPORTS ET DES BESOINS EN ACIDES AMINÉS

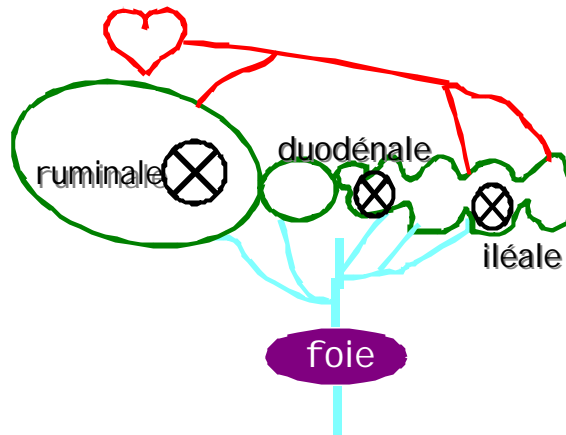
Depuis quelques années au Centre de recherche de Lennoxville, nous travaillons à mieux comprendre le destin des acides aminés, de l'absorption jusqu'au lait (Figure 1). Par notre approche, nous voulons intégrer la définition des apports simultanément à la définition des besoins. Pour ce faire, nous avons adapté des techniques chirurgicales pour implanter chez la vache des canules qui nous permettent de prélever du digesta dans différents segments du système digestif et/ou des cathéters permanents dans les vaisseaux drainant les organes que nous voulons étudier, qui nous permettent de prélever du sang en amont et en aval de l'organe en question.

Figure 1. Trajet des aliments: de l'ingestion au lait.



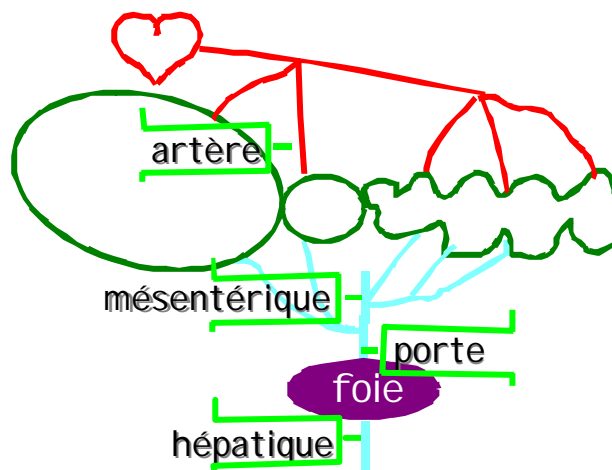
Les canules peuvent être installées (Figure 2) au niveau du rumen, du duodénum (entrée du petit intestin) et de l'iléum (fin du petit intestin). Des collectes au rumen permettent d'évaluer les concentrations de nutriments et les conditions environnementales dans lesquelles baignent les microorganismes, de quantifier ces microorganismes ou d'incuber des sachets de nylon contenant des aliments pour évaluer la dégradation ruminale. Des prélèvements au duodénum permettent de quantifier le débit de nutriments au duodénum (ex. : protéines) et de quantifier l'origine de ces différentes fractions (ex. protéines d'origine microbienne : mesure de purines/protéines d'origine endogène; marquage avec un acide aminé marqué avec un isotope stable). Des prélèvements à l'iléum combinés avec des prélèvements au duodénum permettent de déterminer la quantité de nutriments qui a apparemment disparu du petit intestin, sans avoir à tenir compte des pertes qui peuvent survenir lors du passage du digesta dans le gros intestin. Pour clore le tout, on peut procéder à des collectes totales de fèces, à partir desquelles on estimera la disparition totale apparente des nutriments ingérés.

Figure 2. Emplacement des canules du système digestif



Des cathéters sanguins peuvent être installés (Figure 3) dans une artère facile d'accès (le sang artériel étant partout le même) pour donner de l'information sur la composition du sang irriguant l'organe. Ensuite, des cathéters peuvent être installés dans la veine mésentérique principale (drainant le petit intestin), la veine porte (drainant tout le système digestif, le pancréas et la rate), la veine hépatique (à la sortie du foie) et la veine mammaire. En plus des concentrations dans chaque vaisseau sanguin, le débit sanguin est mesuré par l'infusion d'une teinture inerte (acide para-amino hippurique) ou par sonde débitmétrique. Le résultat de la multiplication du débit sanguin par la différence de concentration entre la veine et l'artère correspond au bilan net du nutriment dans l'organe étudié, c'est-à-dire la quantité nette de ce nutriment qui est utilisée ou relâchée par le tissu en question.

Figure 3. Emplacement des cathéters sanguins



Cette approche permet de mesurer simultanément les nutriments qui sont apportés par la ration et d'en mesurer l'utilisation dans les principaux tissus utilisateurs, soit le système digestif, le foie et la glande mammaire. L'utilisation peut être mesurée de deux façons, soit l'utilisation nette ou l'utilisation totale, car le mouvement total d'un acide aminé dans un organe est bien plus grand que l'utilisation nette. Lorsqu'on mesure les concentrations à l'entrée et à la sortie d'un organe, ce bilan indique la quantité nette d'acide aminé que l'organe a utilisé (ou relâché). Cependant, par exemple pour un organe utilisant les acides aminés, cette quantification ne tient pas compte du fait que cet organe relâche aussi l'acide aminé en question provenant de la dégradation protéique, impliquant du même fait que sa captation totale est plus grande. Cette information est donnée par l'utilisation d'acides aminés qui sont « marqués » c'est-à-dire qui se différencient des autres par un ou des atomes de masse différente (isotopes). Le carbone est un bon exemple. Le carbone que l'on retrouve le plus à l'état naturel (près de 99 %) a une masse moléculaire de 12 g. Par contre, environ 1 % du carbone a une masse moléculaire de 13 g et une infime portion a une masse de 14 g (carbone 14). Le carbone de masse 14 peut se différencier par sa masse, mais aussi par son rayonnement radioactif, ce qui en rend la détection en laboratoire relativement facile mais l'utilisation avec des vaches quasi impossible. Par contre, le carbone 13 peut se différencier par sa masse, mais n'est pas radioactif; c'est un isotope stable. L'utilisation d'isotopes permet de mesurer toute la dynamique de la synthèse protéique au niveau corporel ou au niveau d'un tissu, car la synthèse de protéines n'est pas un processus statique. Le taux de renouvellement des protéines est élevé et varie, selon les différents tissus, de 2 % pour le muscle à plus de 50 % pour le système digestif (revue : Lapierre et Bernier, 1996). Ainsi, au niveau corporel, pour une vache en fin de lactation produisant 17 kg de lait, la quantité totale de protéines sécrétées dans le lait (680 g/j) et retenues dans les tissus (200 g/j) est de 880 g/j alors que la quantité totale de protéines fabriquées par l'organisme est de 3,5 kg/j, impliquant un important renouvellement de la masse protéique (Lapierre *et al.*, 2002). Tout ceci pour démontrer que l'utilisation des acides aminés fait partie d'un processus très dynamique. Nous nous concentrerons cependant sur les débits nets pour suivre le trajet des acides aminés de l'absorption jusqu'au lait.

DÉFINITION ADÉQUATE DES APPORTS EN ACIDES AMINÉS

Une des raisons expliquant pourquoi l'équilibre des rations avec les acides aminés est déjà utilisé chez les monogastriques et non chez les ruminants est la difficulté d'établir l'apport réel en acides aminés chez ces derniers. Tout d'abord, les protéines sont absorbées au niveau intestinal où elles sont scindées en acides aminés et rejoignent la circulation sanguine. Chez les monogastriques, les protéines qui arrivent à l'intestin sont à peu de chose près celles qui ont été ingérées. Chez les ruminants, l'histoire est complètement différente : les protéines qui arrivent à l'intestin sont un joyeux mélange des protéines alimentaires qui ont échappé à la dégradation des microbes du rumen, des protéines fabriquées par les microbes du rumen à partir des acides aminés des protéines alimentaires, mais aussi à partir de fractions azotées non protéiques et de protéines dites endogènes, c'est-à-dire des protéines sécrétées par le système digestif lui-même. ***Les proportions de chacune de ces fractions sont très variables et directement liées à la composition de la ration. La proportion de protéines microbiennes est habituellement au-dessus de 50 % (Clark et al., 1992), la proportion de protéines de source endogène peut atteindre 15 % du flot duodénal (Ouellet et al., 2002)***

tandis que la proportion restante provient de la protéine alimentaire non dégradée. La composition en acides aminés de chacune de ces fractions étant aussi très variable (Tableau 1), il est important d'avoir une bonne estimation de chacune des fractions pour obtenir une évaluation adéquate de l'approvisionnement en acides aminés.

Il faut donc tout d'abord déterminer d'où proviennent les protéines arrivant au duodénum, car leur origine aura un impact sur la quantification de l'apport net en acides aminés à l'animal. Car si les protéines microbiennes et les protéines alimentaires contribuent à un apport nouveau, les protéines d'origine endogène ont dû être fabriquées avec des acides aminés d'origine artérielle, c'est-à-dire qui ont dû être fournis par l'animal. Il existe peu de données chez la vache laitière pour définir l'amplitude et les facteurs pouvant affecter le débit des protéines endogènes arrivant au duodénum. Le NRC (2001) suggère 12 g de protéines par kg de matière sèche ingérée. De récents travaux menés à Lennoxville suggèrent que cette valeur est un peu faible et ne tiendrait pas compte des sécrétions endogènes de protéines recaptées par les microorganismes du rumen. Cette valeur serait plutôt de 24 g de protéines brutes par kg de matière sèche ingérée, soit environ 15 % du débit duodénal, et n'a pas été affectée par le niveau de fibre de la ration (Ouellet *et al.*, 2002).

De plus, pour ajouter au défi du rumen dans la quantification des apports en acides aminés, les fourrages utilisés dans les rations des ruminants sont très variables en qualité, à la fois pour l'énergie et pour la protéine. Car, s'il est vrai que tous les acides aminés, donc toutes les protéines, contiennent de l'azote, tout l'azote n'est pas nécessairement incorporé dans les protéines ! Lorsque l'analyse en protéine d'un aliment est effectuée, ce n'est pas la protéine qui est analysée, mais l'azote qui est multiplié par un facteur de conversion. Ainsi, un fourrage qui dose 24 % de protéines peut en fait ne contenir que la moitié en protéines véritables, alors que le reste est de l'azote non protéique. Afin de mieux déterminer la valeur protéique des aliments, les protéines ont été réparties en différentes fractions en fonction de leur dégradabilité/solubilité. Les programmes de formulation de ration, les plus connus étant le NRC (*National Research Council*, 2001) et le CNCPS (*Cornell Net Carbohydrate Protein System*, 2000), utilisent différentes méthodologies pour quantifier ces fractions azotées et déterminent des fractions a, b (1, 2 et 3) et c pour mieux prédire le débit protéique au duodénum.

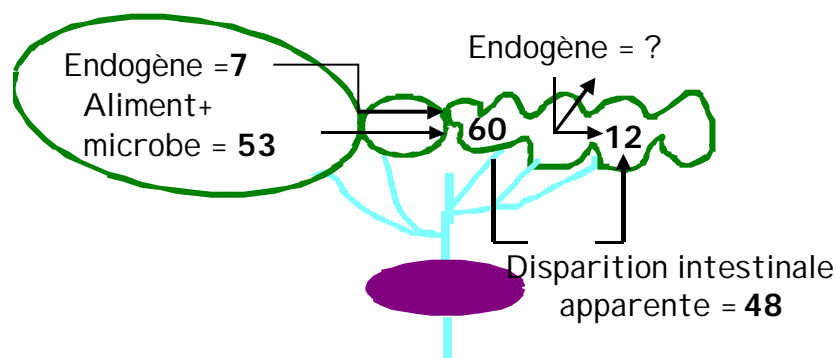
DÉFINITION DES BESOINS EN ACIDES AMINÉS : SUIVRE LE TRAJET DE L'ABSORPTION À LA PROTÉINE DU LAIT

Afin de déterminer l'utilisation nette des acides aminés, nous allons suivre le parcours des acides aminés, de leur apparition au niveau duodénal jusqu'à la fabrication de la protéine sécrétée dans le lait. Le tableau 2 présente les différentes étapes de l'utilisation des acides aminés de l'absorption intestinale jusqu'au lait, en g/j. Pour mieux illustrer ces étapes, chaque section sera accompagnée d'un diagramme représentant le concept qui y est discuté en utilisant la méthionine comme exemple. Un dernier graphique (Figure 9) résume le métabolisme relatif de deux acides aminés ayant des voies métaboliques très différentes et souvent considérés comme étant les premiers acides aminés limitants avec les rations servies en Amérique du Nord, la lysine et la méthionine.

Disparition intestinale

La première étape de la mesure de la disponibilité d'un acide aminé consiste à déterminer la quantité qui disparaît du système digestif en soustrayant le débit iléal du débit duodénal, c'est-à-dire la digestibilité apparente (Figure 4). La disparition des acides aminés du petit intestin, où se fait l'absorption des acides aminés, est une indication de la quantité d'acides aminés mis à la disposition de l'animal. Pour déterminer l'apport net, il faut cependant soustraire la quantité d'acides aminés provenant des sécrétions endogènes qui ont été apportées au duodénum. De plus, les sécrétions endogènes viennent doublement brouiller les cartes. En effet, en plus de la contribution mesurée au niveau duodénal, une quantité d'acides aminés que l'on retrouve à l'iléum ne provient pas du débit duodénal non digéré, mais de sécrétions endogènes, intestinales ou pancréatiques qui n'ont pas été digérées. Afin de déterminer l'apport réel en acides aminés des différents aliments, les nutritionnistes des monogastriques travaillent avec la digestibilité iléale réelle. Cependant, les valeurs sont peu nombreuses du côté des ruminants et n'ont pas la même signification étant donné le remaniement majeur des nutriments effectué par la microflore du rumen.

Figure 4. Débit duodénal et disparition intestinale de la méthionine (g/j)

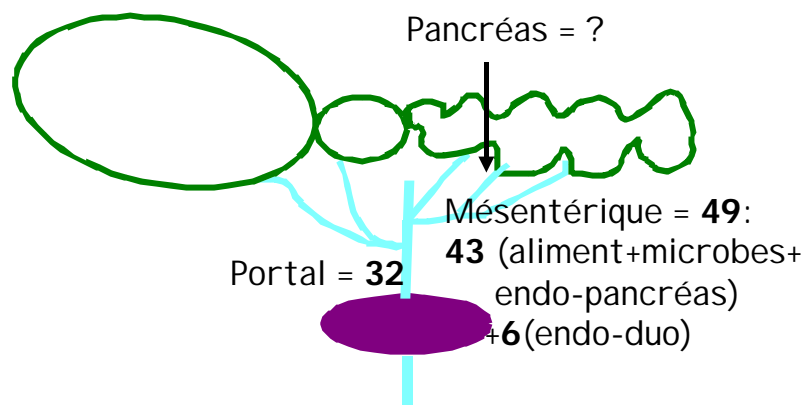


Absorption dans la circulation sanguine

Ce qui disparaît du petit intestin est absorbé dans la circulation sanguine, tout d'abord dans la veine mésentérique principale qui va ensuite rejoindre la veine porte (Figure 5). En théorie, le ratio entre ce qui apparaît dans la circulation sanguine et ce qui disparaît du petit intestin devrait quantifier la quantité d'acides aminés utilisés par le petit intestin. Chez des animaux en croissance, une utilisation pourrait aussi indiquer que le tissu utilise des acides aminés pour croître. Chez la vache en lactation (sauf en début de lactation où le système digestif s'adapte à l'augmentation de la consommation), une telle utilisation indiquerait l'oxydation de ces acides aminés, soit une perte nette. En moyenne, ce ratio est très près de l'unité pour les acides aminés essentiels (Tableau 2) chez des moutons (MacRae *et al.*, 1997) et chez des vaches laitières (Berthiaume *et al.*, 2001). Ce ratio semble indiquer une utilisation nette presque nulle des acides aminés par le petit intestin mais, ici aussi, les sécrétions

endogènes, d'origine pancréatique cette fois, viennent embuer le message en augmentant l'absorption mésentérique sans modifier la disparition intestinale apparente. Des travaux chez le mouton où une canule intestinale était placée après l'arrivée du canal pancréatique dans l'intestin confirment l'importance de ces sécrétions (Zuur *et al.*, en préparation). Finalement, une estimation de l'apport net en acides aminés peut être donnée par l'absorption portale.

Figure 5. Débit mésentérique et portal de la méthionine (g/j)

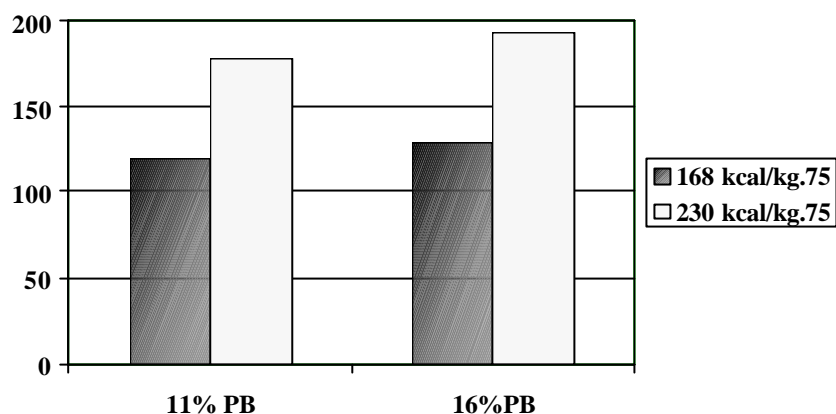


Cependant, bien que cette mesure n'inclue pas les apports provenant des sécrétions endogènes mesurées au duodénum, elle exclut les acides aminés qui ont été oxydés par le système digestif et ceux qui ont été sécrétés et non réabsorbés. Les enzymes responsables de l'oxydation des acides aminés se retrouvent presque exclusivement dans le foie, sauf pour les acides aminés à chaîne ramifiée (isoleucine, leucine et valine). Il y a effectivement oxydation de la leucine dans la paroi du système digestif chez la vache laitière (Lapierre *et al.*, 2002). Des études chez le mouton (Lobley, 2002) suggèrent qu'il y a aussi oxydation de la leucine, une faible oxydation de la phénylalanine, mais aucune oxydation de la méthionine et de l'histidine. D'après les travaux chez le porc, il y aurait aussi peu d'oxydation de la thréonine. La quantité d'acides aminés totale nette disponible à l'animal inclut donc la somme de l'absorption portale et de l'oxydation. **Déjà, les proportions d'acides aminés disponibles à l'animal relativement à l'apport initial commencent à se différencier, la proportion d'acides aminés au niveau portal représentant entre 56 % (valine) et 97 % (histidine) de la quantité disponible à l'animal (Tableau 2)... et la route vers la glande mammaire ne fait que commencer.**

La quantité d'acides aminés absorbés est évidemment reliée à la quantité de protéines ingérées, mais de façon plus marquée à la quantité d'énergie ingérée. On peut voir à la figure 6 qu'une augmentation du niveau de protéines brutes a peu d'effet sur l'absorption totale d'acides aminés tandis que l'énergie a un impact majeur (Reynolds *et al.*, 1992). **Ceci démontre clairement que le niveau de protéines brutes d'une ration est un bien faible indicateur de sa valeur nutritive protéique, car cette soi-disant protéine n'est peut-être que de l'azote non protéique, et que sans une microflore**

ruminale bien pourvue en énergie, le niveau final d'acides aminés vraiment disponibles à l'animal peut être limité à cause d'une synthèse microbienne réduite.

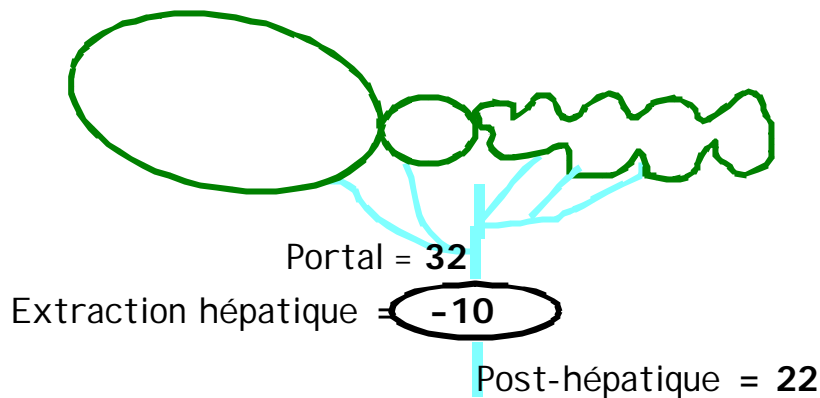
Figure 6. Effet du niveau de protéines et d'énergie sur le débit portal d'acides aminés (mmoles/h)



À travers le foie

Après avoir traversé la barrière intestinale, les acides aminés sont dirigés vers le foie, un organe ayant un métabolisme très actif. Bien qu'il ne représente qu'environ 2 % de la masse de l'animal, il contribue à 15-25 % de la consommation d'énergie et de la synthèse protéique corporelle! Il y coule environ 2000 litres de sang à l'heure! Comme pour bien d'autres nutriments, le passage des acides aminés est déterminant pour la quantité qui sera disponible aux tissus périphériques (Figure 7). Le foie extrait, sur une base nette, de 10 % (thrénine) à 50 % (phénylalanine) de la quantité nette d'acides aminés absorbés au niveau portal. Curieusement, les acides aminés à chaîne ramifiée et la lysine, à un degré moindre, ont un bilan hépatique net positif. L'extraction des acides aminés non essentiels est encore plus élevée, avec un taux moyen d'extraction de 50 % mais pouvant atteindre jusqu'à 100 % de l'absorption dans le cas de la glycine (composant principal de la bile). Ces acides aminés servent de navette azotée entre les tissus périphériques (ex. : muscle, glande mammaire) et le foie pour éliminer les déchets métaboliques azotés; certains sont aussi utilisés comme précurseur du glucose. Ce métabolisme aura un impact majeur sur la quantité absolue et relative des acides aminés pouvant approvisionner les tissus périphériques. Chez la vache laitière, après le passage dans le foie, il y a entre 50 % (phénylalanine) et 90 % (isoleucine) de l'apport initial qui reste disponible aux tissus périphériques (Tableau 2).

Figure 7. Extraction hépatique et débit post-hépatique de la méthionine (g/j)



Le taux d'extraction observé chez la vache laitière est plus faible lorsque la vache est en lactation (Wray-Cahen *et al.*, 1997) que chez le bovin en croissance (Lapierre *et al.*, 2000) et est définitivement plus faible que chez le mouton à l'entretien (Lobley *et al.*, 1996). Il semble y avoir un lien entre le catabolisme hépatique et la demande provenant des tissus périphériques. Par exemple, lors d'une étude où de la caséine a été infusée dans l'abomasum, la totalité de la quantité additionnelle absorbée pendant l'infusion était prélevée par le foie. Cependant, lorsque la croissance des mêmes animaux était stimulée par l'administration de somatotrophine, le catabolisme hépatique diminuait au même niveau que celui des animaux témoins (Taniguchi *et al.*, 1997). Cependant, à ce stade-ci, il n'est pas encore clairement établi si le foie joue un rôle au niveau du contrôle de la disponibilité des acides aminés ou s'il réagit simplement en rétrocontrôle à ce qui se passe dans le reste de l'animal, car la quantité totale d'acides aminés présentés au foie inclut les acides aminés nouvellement absorbés plus l'apport artériel. Donc, lorsqu'on exprime la quantité d'acides aminés extraits par le foie en fonction de la quantité totale d'acides aminés arrivant dans le foie, le taux d'extraction varie plutôt entre 5 et 10 %. Ce qui veut dire qu'après un premier passage à travers le foie, les acides aminés peuvent aller approvisionner la glande mammaire et que si celle-ci n'utilise pas les acides aminés présentés, ceux-ci sont recirculés au foie qui, après quelques passages, catabolisera les acides aminés en excès. En effet, le foie a un rôle majeur dans le maintien de l'homéostasie en acides aminés, car ceux-ci peuvent devenir toxiques si leur concentration devient trop élevée dans le sang. Une étude récente où des acides aminés ont été infusés dans la veine jugulaire semble indiquer que l'extraction des acides aminés du foie est directement liée aux concentrations circulantes et relativement indépendante du métabolisme mammaire en soi (Berthiaume *et al.*, 2002). Un autre point doit être retenu : tous les acides aminés prélevés par le foie ne sont pas nécessairement détruits. Le foie fabrique des protéines qui sont exportées à l'extérieur du foie, comme l'albumine, et la fabrication de ces protéines peut représenter jusqu'à 20 % de l'extraction hépatique de la phénylalanine (Raggio *et al.*, 2002). Ces protéines peuvent être utilisées ultérieurement par les autres tissus comme source d'acides aminés.

Le métabolisme hépatique a donc un impact déterminant et différentiel sur la quantité d'acides aminés qui approvisionneront les tissus périphériques, le débit post-hépatique représentant de 46 % (phénylalanine) à 89 % (lysine) de la quantité initialement disponible (Tableau 2).

La glande mammaire

Une fois passé le foie, le sang rejoint les poumons et le cœur où il est oxygéné et pompé pour distribuer aux cellules de tous les organes l'oxygène et les nutriments dont elles ont besoin pour remplir leur fonction spécifique. Chez la vache laitière en lactation, la glande mammaire est un utilisateur majeur des acides aminés apportés à l'animal et disponibles après le métabolisme du système digestif et du foie. On constate cependant que le prélèvement de chacun des acides aminés par la glande mammaire est variable. **En moyenne, pour trois acides aminés, l'histidine, la méthionine et la phénylalanine, la glande mammaire prélève tout ce qui est disponible à l'animal (Figure 8, Tableau 2) et, qui plus est, incorpore toute cette quantité dans le lait sécrété. Par contre, la glande mammaire prélève une quantité d'acides aminés à chaîne ramifiée et de lysine beaucoup plus grande que celle qu'elle utilise directement pour la fabrication du lait.** L'utilisation exacte de ce surplus d'acides aminés par la glande mammaire n'est pas encore totalement élucidée, mais semble importante si l'on considère que la lysine est souvent considérée comme un acide aminé limitant. Ces acides aminés pourraient être utilisés pour fabriquer des acides aminés non essentiels à l'intérieur de la glande mammaire, car celle-ci n'en prélève pas assez pour la quantité de protéines sécrétées. Lors d'une étude récente, nous avons mesuré l'incorporation de l'azote de la lysine dans les acides aminés non essentiels, et effectivement, certains acides aminés comme la serine et le glutamate contenaient un azote provenant de la lysine (Lapierre et Lobley, non publié).

Figure 8. Débit post-hépatique et utilisation mammaire de la méthionine (g/j)

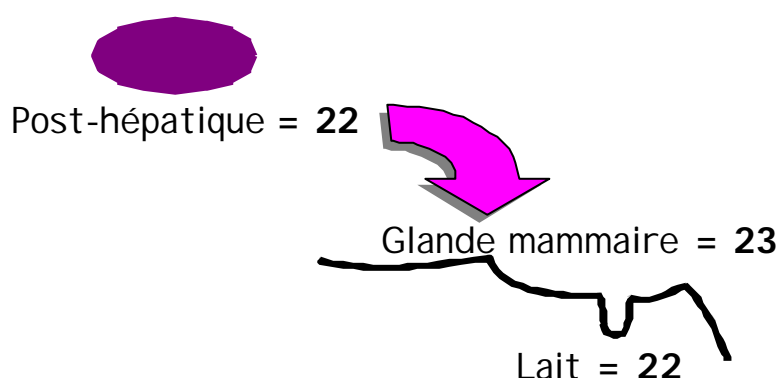
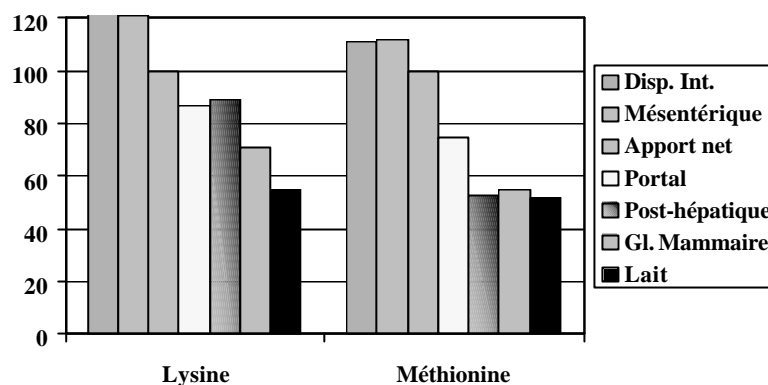


Figure 9. Débit d'acides aminés de l'intestin au lait



Mais qu'est-ce qui peut stimuler la glande mammaire à prélever plus d'acides aminés et à en incorporer davantage sous forme de protéines du lait ? Comment les métabolismes de la glande mammaire et du foie sont-ils coordonnés ? L'approvisionnement en acides aminés est certes un des éléments de la réponse mais une étroite coordination hormones et nutriments (énergie-acides aminés) entre certainement en action pour assurer le contrôle métabolique de la production de protéines.

L'approvisionnement de la glande mammaire en acides aminés est donc très différent, en quantités relative et absolue, de la quantité nette fournie par la ration, à cause du métabolisme intensif du système digestif et du foie. Afin de bien définir l'apport à la glande mammaire, il devient essentiel de connaître et de quantifier l'amplitude et les facteurs contrôlant ces prélèvements.

IMPLICATIONS PRATIQUES

Évidemment, la réponse à ces questions biologiques veut apporter une solution à la ferme. Comment cette information peut-elle être utilisée pour améliorer la situation sur une ferme laitière, à la fois au niveau du revenu et au niveau environnemental ? Cette connaissance nous aidera à mieux appliquer le concept d'acides aminés limitants. Tel que nous l'avons déjà expliqué, tous les acides aminés doivent être présents pour permettre une synthèse protéique, car un acide aminé ne peut en remplacer un autre. Théoriquement, il y a donc un acide aminé qui vient à manquer le premier et la supplémentation en ce seul acide aminé peut permettre d'utiliser tous les autres qui sont présents mais inutilisables... comme au jeu de Scrabble où une seule lettre peut faire toute la différence dans le nombre de mots que l'on peut écrire. Évidemment, cette vision est une version simplifiée de la réalité, car la vache en lactation possède des réserves qu'elle peut utiliser vu la flexibilité offerte par le haut taux de renouvellement des protéines. Mais au bout du compte, plus l'apport net sera équilibré, plus la vache pourra faire un bon usage de ce qui lui est fourni.

Réduction du niveau de protéines totales de la ration

Comment peut-on équilibrer les rations ? Actuellement, des recommandations sont données par le NRC (2001) seulement pour deux acides aminés, la lysine et la méthionine. Les recommandations sont exprimées en pourcentage de l'apport total en protéines métabolisables (disponibles) à la vache: il est recommandé que la lysine représente 7,2 % et la méthionine 2,4 % des protéines métabolisables. Des recommandations pour les autres acides aminés essentiels ont été proposées par Rulquin *et al.* (2001) suite à des études où les acides aminés ont été infusés de façon individuelle et par Doepel *et al.* (2002) suite à une revue d'études où les acides aminés ont été infusés en groupe (Tableau 3). Comme le niveau de production est très variable, il est plus facile d'exprimer les besoins d'une façon globale en pourcentage. Cependant, si les apports sont excédentaires, les pourcentages relatifs sont inutiles et même à éviter. Si l'on veut équilibrer avec les pourcentages, il faut d'abord s'assurer que la quantité totale de protéines métabolisables fournie est adéquate et non en excès. Pour arriver à optimiser la quantité totale de protéines métabolisables, il est d'abord recommandé de maximiser la synthèse microbienne, avec un apport suffisant en énergie et en protéines disponibles au niveau ruminal. Comme la protéine microbienne est de bonne qualité (Tableau 1) et relativement peu dispendieuse à produire, on essaiera de la maximiser. On utilisera ensuite des suppléments protéiques avec une dégradabilité plus faible et dont la composition en acides aminés se complémente bien (ex. : maïs et soya). Et finalement, s'il est économiquement justifié de le faire, on pourra ajouter des acides aminés protégés de la dégradation ruminale. En effet, contrairement aux monogastriques auxquels on peut donner des acides aminés libres qui seront absorbés, chez les ruminants, les acides aminés fournis avec la ration doivent être protégés de la dégradation microbienne dans le rumen et être ensuite relâchés au niveau intestinal. Actuellement, un seul acide aminé est offert commercialement, la méthionine. Il est offert par différentes compagnies, chacune ayant sa propre technologie d'enrobage. Les produits commerciaux disponibles en Amérique sont Mepron®M85 (Degussa Corporation), Met-Plus™ (Nisso America, Inc.) et Smartamine™ (Aventis Animal Nutrition). On retrouve aussi un analogue de la méthionine, vendu sous les noms de Alimet® (Novus International) et Rhodimet™ AT 88 (Aventis Animal Nutrition). Comme ces produits sont relativement dispendieux, il importe de les acheter de compagnies fiables qui ont des chiffres sérieux à présenter, car certains produits offrent une protection nulle (Rulquin *et al.* 2001).

Équilibrer les rations pour les acides aminés pourra avoir un impact différent selon la régie actuelle du troupeau. Dans un premier temps, il faut reconnaître qu'il est peu probable qu'il y ait une déficience réelle en un acide aminé dans les troupeaux ayant une moyenne élevée. Cependant, ce niveau est habituellement obtenu en nourrissant le troupeau avec une ration à teneur élevée en protéines, souvent atteinte avec des suppléments de protéines non dégradables dispendieux. Dans de telles circonstances, équilibrer les rations pour les acides aminés permettra de diminuer le pourcentage de protéines dans la ration par un choix judicieux des ingrédients pour apporter les différents acides aminés en quantités suffisantes et non en excès parce que non identifiés. Cette nouvelle formulation diminuera substantiellement les coûts d'alimentation tout en augmentant l'efficacité de l'utilisation de l'azote, ce qui diminuera les rejets azotés dans l'environnement sans diminuer la production de lait et de protéines.

D'autre part, si la ration présente une déficience en un acide aminé, l'équilibre de la ration devrait permettre d'augmenter la production de lait et de protéines. Une formulation de ration basée sur les acides aminés, en diminuant la teneur en protéines, permettra aussi plus de flexibilité pour augmenter l'apport en énergie, si souvent limitant surtout en début de lactation.

Amélioration du revenu à la ferme

Ces considérations théoriques ont donné des résultats concrets. Par exemple, Schwab et Ordway (2001) de l'Université du New Hampshire ont rapporté qu'après avoir apporté les changements appropriés à la ration servie aux vaches du troupeau (Tableau 4), ils ont réduit le pourcentage de protéines de 18,1 % à 17,2 %, mais augmenté le pourcentage de lysine de 6,34 % à 6,55 % et celui de la méthionine de 1,73 % à 2,20 %. La production de lait n'a pas varié alors que le taux de protéines a augmenté de 2,70-2,83 % à 3,12-3,16 %, et que le taux d'urée dans le lait a diminué de 14,5 à 12,4 mg/dL. Le coût de la ration n'a pas diminué à cause de l'ajout d'acides aminés protégés, mais l'augmentation du niveau de protéines dans le lait a résulté en une augmentation du profit de 0,70 \$US par vache par jour.

Diminution des rejets azotés

Un autre point important à considérer est qu'une utilisation plus efficace de l'azote alimentaire réduit les rejets azotés dans l'environnement. Les pressions environnementales sont de plus en plus fortes sur les systèmes de production animale. L'azote excrété par les animaux peut contribuer à différents types de pollution, tous pointés du doigt : pollution des nappes phréatiques, production de N₂O contribuant aux changements climatiques à cause de l'effet de serre et production de micro-particules de sulfate et nitrate d'ammonium. Une diminution des quantités d'azote ingéré a un effet direct sur les quantités d'azote excrété. L'ajout d'un supplément de protéines à une ration déficiente en protéines a augmenté la quantité de protéines sécrétées dans le lait de 14 % mais a augmenté la quantité d'azote excrété dans l'urine de 97 % (Thivierge *et al.*, 2002). Dans un travail de modélisation du métabolisme azoté, Kebreab *et al.* (2002) ont estimé qu'une diminution du niveau de protéines dans les rations à environ 16 % diminuerait la production d'ammoniac de 20 %. Évidemment une telle diminution doit se faire dans la connaissance des acides aminés dont il faut maintenir l'approvisionnement si on veut éviter une diminution parallèle de la quantité de protéines sécrétées dans le lait.

CONCLUSION

Nous avons actuellement atteint un seuil critique dans notre compréhension du métabolisme protéique de la vache laitière. Bien que nos connaissances ne soient pas parfaites, il devient évident qu'équilibrer les rations pour les acides aminés est un rêve... devenu réalité! Nous avons assez d'information pour équilibrer les rations, premièrement pour les protéines métabolisables et, ensuite, pour ajuster les ratios pour la méthionine et la lysine, à tout le moins, en faisant un choix adéquat des ingrédients. Il nous reste à continuer l'exploration pour mieux quantifier les autres acides aminés et pour définir l'interaction énergie-acides aminés, qui devient critique non seulement au niveau du rumen, mais aussi au niveau de la glande mammaire.

Tableau 1. Comparaison du profil en acides aminés (% des acides aminés essentiels) dans le lait, les microorganismes ruminiaux, les sécrétions endogènes et de s aliments de source végétale et animale¹

| Acide aminé | Lait | Bactéries ruminales | Sécrétions endogènes ² | Fin gluten de maïs | Tourteau de soya | Farine de poisson |
|---------------|------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Arginine | 72 | 104 | 49 | 71 | 162 | 131 |
| Histidine | 55 | 42 | 36 | 47 | 61 | 64 |
| Isoleucine | 114 | 116 | 46 | 91 | 101 | 92 |
| Leucine | 195 | 159 | 48 | 372 | 172 | 162 |
| Lysine | 160 | 166 | 73 | 37 | 139 | 172 |
| Méthionine | 55 | 51 | 15 | 52 | 32 | 63 |
| Phénylalanine | 100 | 101 | 46 | 141 | 116 | 90 |
| Thréonine | 89 | 114 | 65 | 75 | 87 | 94 |
| Tryptophane | 30 | 27 | 19 | 12 | 28 | 24 |
| Valine | 130 | 124 | 61 | 103 | 102 | 108 |

¹ Adapté du NRC (2001)

² Ørskov *et al.*, 1986.

Tableau 2. Métabolisme des acides aminés (g/j): de la disparition intestinale au lait.

| Acide aminé | Situation anatomique ¹ | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|-------|----------|------------|--------|-------|----------------|--------------|------|
| | Disp. int. | Més. | Duo-endo | Apport net | Portal | Hép. | Post-hépatique | Glande mamm. | Lait |
| Histidine | 50,0 | 51,5 | 12,9 | 38,7 | 37,6 | -10,5 | 27,1 | 23,4 | 22,2 |
| Isoleucine | 116,9 | 124,3 | 16,7 | 107,7 | 73,4 | 15,4 | 88,8 | 59,9 | 49,2 |
| Leucine | 191,6 | 186,0 | 17,1 | 168,9 | 116,5 | 23,3 | 139,8 | 100,7 | 81,6 |
| Lysine | 168,2 | 150,8 | 26,2 | 124,6 | 108,1 | 3,2 | 111,3 | 88,4 | 68,1 |
| Méthionine | 47,9 | 48,5 | 5,2 | 43,2 | 32,2 | -10,0 | 22,2 | 23,7 | 22,6 |
| Phénylalanine | 106,6 | 113,1 | 16,7 | 96,4 | 84,8 | -40,7 | 44,1 | 43,3 | 41,6 |
| Thréonine | 111,1 | 111,0 | 23,3 | 87,7 | 62,9 | -6,3 | 56,6 | 39,6 | 36,5 |
| Valine | 159,0 | 147,9 | 21,9 | 126,0 | 70,8 | 20,5 | 91,4 | 69,1 | 55,2 |

¹ Disp. int.: disparition intestinale

Més.: mésentérique

Duo-endo: flot duodénal d'origine endogène

Hép.: hépatique

Glande mamm.: glande mammaire.

Adapté de Berthiaume *et al.*, 2001; Berthiaume *et al.*, non publié; Blouin *et al.*, 2002; Lapierre *et al.*, 2002; Lobley, 2002; MacRae *et al.* 1997; Ørskov *et al.*, 1986; Ouellet *et al.*, 2002

Tableau 3. Besoins en acides aminés exprimés par rapport à la composition de la protéine chez la vache laitière

| Acide aminé | Rulquin <i>et al.</i> , 2001 ¹ | Doepel <i>et al.</i> , 2002 ² |
|---------------|---|--|
| Histidine | 3,2 | 2,3 |
| Isoleucine | 5,0 | 5,3 |
| Leucine | 8,8 | 9,6 |
| Lysine | | 7,3 |
| Méthionine | | 2,2 |
| Phénylalanine | 5,0 | 5,4 |
| Thréonine | 4,0 | 5,0 |
| Valine | 5,3 | 6,1 |

¹Composition (%) de la protéine digestible.

²Composition (%) de la protéine métabolisable

Tableau 4. Description des rations utilisées à l'Université du New Hampshire¹

| Ingrédient (%) | Non équilibrée | Équilibrée |
|--|-----------------------|-------------------|
| Foin de luzerne | 9,6 | 6,0 |
| Ensilage de maïs | 29,8 | 30,9 |
| Ensilage d'herbe | 9,6 | 12,3 |
| Écailles de soya | 4,8 | 3,7 |
| Orge | 7,4 | |
| Maïs moulu | 15,4 | 19,1 |
| Tourteau de soya, « solvant » | 11,6 | 7,4 |
| Tourteau de soya, « pression » | 6,4 | |
| Gras | 1,9 | 1,9 |
| Vitamines et minéraux | 3,5 | 3,1 |
| Tourteau de canola | | 3,7 |
| Urée | | 0,14 |
| Supplément de protéines non dégradables contenant de la méthionine protégée et un analogue de méthionine | | 2,2 |
| Évaluation de la ration (NRC, 2001) | | |
| Protéine brute, % MS | 18,1 | 17,2 |
| Protéine dégradable, % MS | 10,8 | 10,6 |
| Protéine non dégradable, % MS | 7,3 | 6,6 |
| Protéine métabolisable, g/jour | 3071 | 2809 |
| Lysine, % protéine métabolisable | 6,34 | 6,55 |
| Méthionine, % protéine métabolisable | 1,73 | 2,20 |
| Lysine, g/jour | 195 | 184 |
| Méthionine, g/jour | 53 | 61 |

¹ Adapté de Schwab et Ordway, 2001.

RÉFÉRENCES

- Berthiaume, R., P. Dubreuil, M. Stevenson, B.W. McBride et H. Lapierre. 2001. Intestinal disappearance, mesenteric and portal appearance of amino acids in dairy cows fed ruminally protected methionine. *J. Dairy Sci.* 84: 194-203.
- Blouin, J.P. , J.F. Bernier, C.K. Reynolds, G.E. Lobley, P. Dubreuil et H. Lapierre. 2002 Effect of diet quality on splanchnic fluxes of nutrients and hormones in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* Accepté.
- 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.
- CNCPS, 2000. The Cornell University Nutrient Management Planning System. The net carbohydrate and protein system for evaluating herd nutrition and nutrient excretion.CNCPS version 4.0, November 3rd, 2000. Model Documentation.
- Doepel, L, M. D. Hanigan, J. J. Kennelly, D. Pacheco, I. F. Lopez-Campbell et H. Lapierre. 2002. Milk protein synthesis as a function of amino acid supply. *J. Dairy Sci.* en préparation.
- Kebreab, E., J. France, J.A.N. Mills, R. Allison, and J. Dijkstra.2002. A dynamic model of N metabolism in the lactating dairy cow and an assessment of impact of N excretion on the environment. *J. Anim. Sci.* 80: 248-259.
- Lapierre, H. et J.F. Bernier. 1996. Le destin de l'azote alimentaire... après le rumen. Journées de recherche et Colloque de zootechnie. C.P.A.Q. Inc. et Université Laval: 79-93.
- Lapierre, H., J.F. Bernier, P. Dubreuil, C.K. Reynolds, C. Farmer, D.R. Ouellet, et G.E. Lobley. 2000. The effect of feed intake level on splanchnic metabolism in growing beef steers. *Soc. Anim. Sci.* 78: 1084-1099.
- Lapierre, H., J.P. Blouin, J.F. Bernier, C.K. Reynolds, P. Dubreuil et G.E. Lobley. 2002. Effect of diet quality on whole body and splanchnic protein metabolism in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* Accepté.
- Lobley, G.E., A. Connell, D.K. Revell, B.J. Bequette, D.S. Brown et A.G. C alder. 1996. Mass and kinetic amino acid transfers across the ovine splanchnic bed: transport in blood and plasma, monitored through use of multiple U-¹³C amino acid mixture. *Br. J. Nutr.* 75: 217-235.
- Lobley, G.E. 2002. Protein turnover - what does it mean for animal production. CSAS-Symposium-SCSA. Sous presse.
- MacRae, J.C., Bruce, L.A., Brown, D.S., Farningham, D.A.H. and Franklin, M.F. (1997). Absorption of amino acids from the intestine and their net flux across the mesenteric and portal drained viscera of lambs. *J. Anim. Sci.* 75: 3307-14.

- National Research Council. 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. 7th rev. ed. Natl. Acad. Sci., Washington, DC.
- Ørskov, E.R., N.A. Macleod et D.J. Kyle. 1986. Flow of nitrogen from the rumen and abomasum in cattle and sheep given protein-free nutrients by intragastric infusion. *Br. J. Nutr.* 56:241-248.
- 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.* Accepted.
- Taniguchi, K., G. B. Huntington, and B. P. Glenn. 1995. Net nutrient flux by visceral tissues of beef steers given abomasal and ruminal infusions of casein and starch. *J. Anim. Sci.* 73:236-249.
- Raggio, G., G.E. Lobley, D. Pellerin, G. Allard, R. Berthiaume, P. Dubreuil, M. Babkine et H. Lapierre. 2002. Effect of protein intake on synthesis of albumin and plasma total protein in lactating dairy cows. CSAS/ADSA/ASAS meeting. Résumé.
- Reynolds, C. K., D. P. Casper, D. L. Harmon, and C. T. Milton. 1992b. Effect of CD and ME intake on visceral nutrient metabolism in beef steers. *J. Anim. Sci.* 70 (Suppl.1):315.
- Rulquin, H., and J. Kowalczyk. 2000. A blood procedure to determine bioavailability of rumen-protected met for ruminants. *J. Anim. Sci.* 78/ *J. Dairy Sci.* 83 (Suppl.1):268.
- Rulquin, H., R. Vérité, J. Guinard-Flament, and P.M. Pisulewski. 2001. Acides aminés digestibles dans l'intestin. Origine des variations chez les ruminants et répercussions sur les protéines du lait. *INRA Prod. Anim.* 14:201-210.
- Thiviere, C., J.F. Bernier, and H. Lapierre. 2002. Effects of supplemental protein and energy and feeding frequency on the performance of lactating dairy cows fed a protein-deficient diet. *Can. J. Anim. Sci.* 82:225-231.
- Schwab, C.G., and R.S. Ordway. Amino acid supplementation of dairy cattle: Need ? Responses ? Economics ? Proceedings of the 22nd Western Nutrition Conference. September 2001.
- Wray-Cahen, D., J.A. Metcalf, F.R.C. Backwell, B.J. Bequette, D.S. Brown, J.D. Sutton, et G.E. Lobley. 1997. Hepatic response to increased exogenous supply of plasma amino acids by infusion into the mesenteric vein of Holstein-Friesian cows in late gestation. *Br. J. Nutr.* 78: 913-30.
- Zuur, G., F. Yu, R.L. Coop., L.A. Bruce, G.E. Lobley, et J.C. MacRae. 2002. Endogenous leucine flows at the jejunum and ileum in lambs exposed to the intestinal parasite *Trichostrongylus colubriformis*. En préparation.