

La quantification des principaux phénomènes digestifs chez les ruminants : les relations utilisées pour rénover les systèmes d'unités d'alimentation énergétique et protéique

D. SAUVANT^{1,2}, P. NOZIÈRE^{3,4}

¹ INRA, UMR791 MoSAR, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France

² AgroParisTech, UMR791 MoSAR, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France

³ INRA, UMR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès-Champanelle, France

⁴ Clermont Université, VetAgro Sup, UMR1213 Herbivores, BP 10448, F-63000 Clermont-Ferrand, France

Courriel : daniel.sauvant@agroparistech.fr

Les systèmes d'unités d'alimentation constituent un levier majeur du progrès des filières animales en permettant de calculer les régimes alimentaires les plus adaptés. Depuis plus d'un siècle et demi, ces systèmes sont périodiquement mis à jour en fonction de l'avancée des connaissances scientifiques et des nouveaux enjeux des filières. Ces dernières années, la production des connaissances sur la nutrition des ruminants a connu une forte croissance, notamment grâce aux progrès des recherches des pays émergents. Parallèlement, les nouveaux enjeux économiques, environnementaux et sociétaux nécessitent d'adopter une démarche multicritère pour l'alimentation animale.

Les systèmes d'unités d'alimentation pour les animaux existent depuis des décennies puisque l'on peut dire que les premiers systèmes assez précis ont été proposés dans la seconde partie du XIX^{ème} siècle, suite en particulier aux progrès réalisés en Allemagne dans les analyses des aliments et les mesures de digestibilité (Henneberg et Stohmann 1860). Le principe de construction de ces systèmes est d'intégrer les connaissances de base sur la digestion des aliments et l'utilisation métabolique des nutriments absorbés au sein d'unités alimentaires qui répondent à un cahier des charges. En particulier, ces unités doivent permettre d'exprimer aussi bien les besoins des animaux que les valeurs des aliments ; elles doivent être additives, pour permettre le calcul des rations, et prédites avec le maximum de précision. Enfin elles doivent être peu coûteuses à mettre en œuvre.

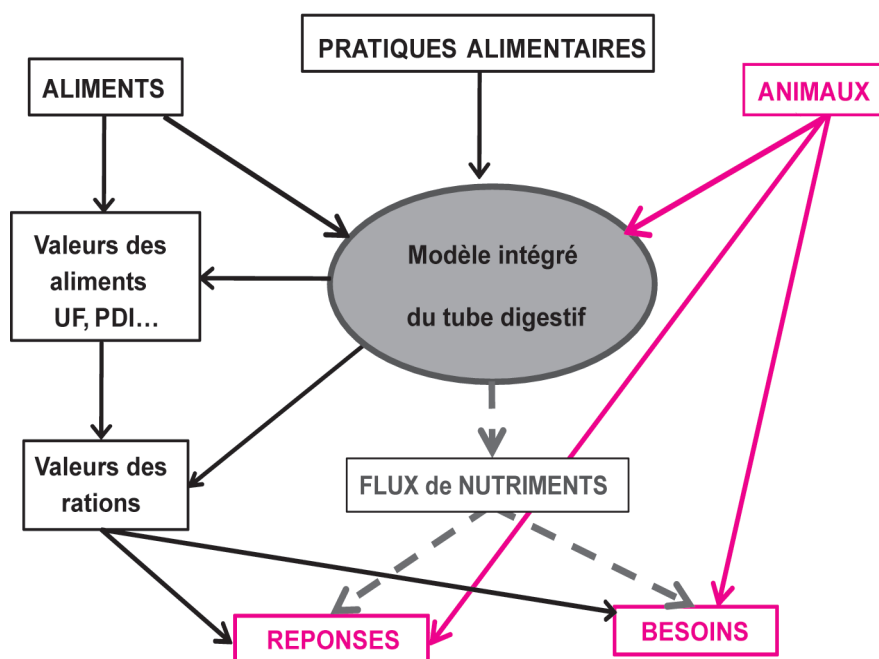
Les systèmes d'unités d'alimentation constituent un facteur essentiel du progrès en matière d'alimentation des animaux grâce à des prévisions plus précises des besoins des animaux et des valeurs des aliments. Ils doivent également être capables d'évoluer vers plus de précision et intégrer les nouvelles préoccupations des filières d'élevage. A

ce propos, depuis quelques décennies, de nouveaux défis ont vu le jour et sont à prendre en compte au niveau des pratiques alimentaires. En effet, outre l'objectif d'avoir une transformation efficace des aliments, il est à ce jour nécessaire de minimiser les rejets d'éléments susceptibles d'altérer le milieu (N, P, CH₄...), de produire des produits dont la composition s'adapte à la demande, de respecter la santé et le bien-être des animaux, etc. En conséquence, un nouveau concept a vu le jour, il s'agit de la prévision des réponses multiples des animaux aux variations des régimes et des pratiques alimentaires (Sauvant 1999). Cette évolution questionne les systèmes d'unités alimentaires qui étaient essentiellement conçus jusqu'alors pour permettre l'expression du potentiel génétique des animaux en fournissant l'énergie, les protéines, les minéraux et les vitamines nécessaires à cette expression. Les systèmes d'unités doivent donc être désormais capables non seulement de s'assurer que les besoins sont satisfaits, mais aussi de prévoir les principales réponses animales aux caractéristiques des régimes et aux pratiques alimentaires.

Dans le domaine de l'alimentation des ruminants, la France possède des unités

originales depuis la période de l'entre-deux guerres avec les propositions d'A.M. Leroy, Unités Fourragères (UF) pour l'énergie et Matières Azotées Digestibles (MAD) pour les protéines (Leroy 1926), sachant que la diffusion large de ces nouveaux concepts a surtout eu lieu après la dernière guerre mondiale avec les éditions successives du petit ouvrage de 80 pages sur les « Equivalents Fourragers » (Leroy *et al* 1950). Ces unités ont eu cours jusqu'en 1978, qui a vu la sortie du fameux « livre rouge » intitulé « L'alimentation des ruminants ». Cet ouvrage a été produit à l'INRA par R. Jarrige, entouré de 28 chercheurs et enseignants-chercheurs (INRA 1978). A cette occasion, des unités entièrement nouvelles ont été créées pour l'énergie (UFL et UFV), les protéines (Protéines Digestibles dans l'Intestin, PDI) et l'ingestion avec l'Unité d'Encombrement (UE). Pour les fourrages, cet ouvrage avait repris et enrichi les « tables vertes » de Demarquilly et Weiss (1970). Depuis, des actualisations ont eu lieu en 1988 (INRA 1988), avec une édition en langue anglaise (INRA 1989), en 2002 pour les tables multi-espèces des valeurs des concentrés et co-produits (INRA-AFZ 2002) et en 2007 pour les tables des valeurs des fourrages et les recommandations pour

Figure 1. Schéma général du projet « Systali ».



l'ensemble des espèces (INRA 2007). Depuis 1988, la mise en œuvre des unités d'alimentation s'appuie sur le logiciel INRAtion (INRA, Educagri Editions, Dijon, France), complété en 1999 par le module « Prévalim » de prévision de la valeur des aliments (Baumont *et al* 1999).

Les systèmes actuels possèdent cependant certaines limites, en particulier ils intègrent mal les interactions énergie-protéines et les phénomènes d'interactions digestives ; ils ne s'appliquent pas, ou mal, aux régimes extrêmes (régimes pauvres en azote et riches en parois, ou bien régimes de densité énergétique très élevée et ingérés en grande quantité...). En outre, jusqu'à présent les systèmes d'unités étaient conçus pour les ruminants des pays tempérés ; la rénovation en cours a pour but de proposer des systèmes qui soient applicables à tous les types de ruminants, bovins, ovins et caprins en particulier, quelque soient leurs conditions alimentaires et d'élevage.

Peu de pays disposent des moyens de recherche et de développement suffisants pour construire de nouveaux systèmes d'unités d'alimentation ; de ce fait, comme dans de nombreux domaines, il existe une certaine concurrence entre pays producteurs de systèmes pour leur utilisation vers d'autres pays. En conséquence, il est nécessaire d'actualiser régulièrement les systèmes sous peine de voir leur champ d'application géographique se réduire rapidement au profit de systèmes plus actualisés. Dans le domaine des ruminants, le NRC aux USA a actualisé les systèmes pour les petits ruminants en 2007. En revanche, pour les bovins c'est le système proposé en 2001

qui reste en place, sachant qu'aux USA le système CNCPS de Cornell (Sniffen *et al* 1992) a vu son rayonnement international croître. En Europe, pour ne retenir que les propositions récentes, les Néerlandais ont actualisé leur système d'unités protéiques (van Duinkerken *et al* 2011) qui, à l'origine, dérivait des PDI (Tamminga *et al* 1994) ; par ailleurs, les pays du nord de l'Europe ont produit le système « NorFor » en fédérant et en procédant à une large rénovation des systèmes protéiques, énergétiques et d'ingestion utilisés dans ces pays (Volden 2011).

L'objectif du projet « Systali », porté par l'INRA, est de réaliser une première phase de rénovation des unités d'alimentation énergétique et protéique qui puisse prendre en compte de façon plus précise les phénomènes d'interactions digestives, les transits, la synthèse microbienne, les relations énergie-protéines, les rations extrêmes... et qui puisse aboutir, à terme, à des systèmes qui pourront s'exprimer en quantités de nutriments absorbés : acides aminés (c'est déjà largement le cas pour le système PDI actuel), glucose et acides gras dans l'intestin grêle et acides gras volatils (AGV) au niveau du rumen et du gros intestin. En effet, l'ambition de prévoir les réponses multiples des ruminants aux pratiques alimentaires exige de pouvoir distinguer à terme les principaux nutriments en raison de leurs effets physiologiques et zootechniques propres. La figure 1 résume le contenu du projet Systali dont la première étape, la prévision des valeurs UF et PDI des aliments et des rations, est présentée dans cet article.

1 / Principes de la démarche appliquée

1.1 / Problématique globale

La démarche est articulée en étapes successives dont la première consiste à revisiter les principaux mécanismes de la digestion pour améliorer et actualiser leur prise en compte. En particulier, on cherche à quantifier ces mécanismes avec plus de précision grâce à un accroissement important du nombre de données expérimentales utilisées, à des nouvelles régressions à la fois plus précises et plus intégratives, donc représentatives des variations liées aux pratiques alimentaires courantes. Les mécanismes digestifs majeurs étant déjà pris en compte dans les versions actuelles des systèmes d'unités, la question était de savoir dans quelle mesure les équations correspondantes devaient être actualisées. D'autres mécanismes, nombreux, n'avaient pas été pris en compte et il importait d'évaluer l'opportunité et l'intérêt de les intégrer pour améliorer la précision et la mise en œuvre pratique de ces systèmes. Les étapes suivantes, non abordées dans cet article, concernent l'évaluation des besoins et des réponses, puis la mise en œuvre des nouveaux systèmes pour les principales espèces.

1.2 / Traitement des données et choix des équations

Pour établir les relations entre critères explicatifs et réponses, nous avons rassemblé des bases de données expérimentales à partir de publications de la littérature ou de résultats obtenus dans des laboratoires de l'INRA. Les principales bases de données utilisées ont été :

- Deux bases sur la digestion quantitative, chez les bovins (*Bovidig*, 496 publications - pub -, 811 expériences - exp - et 2136 traitements - trt - UMR MoSAR-Paris) et chez les ovins (*Ovidig*, 110 pub, 170 exp, 510 trt, UMR Herbivores-Theix).
- Une base de mesures calorimétriques sur différents types de ruminants (« *Rumener* », 188 pub, 273 exp et 1193 trt, UMR MoSAR).

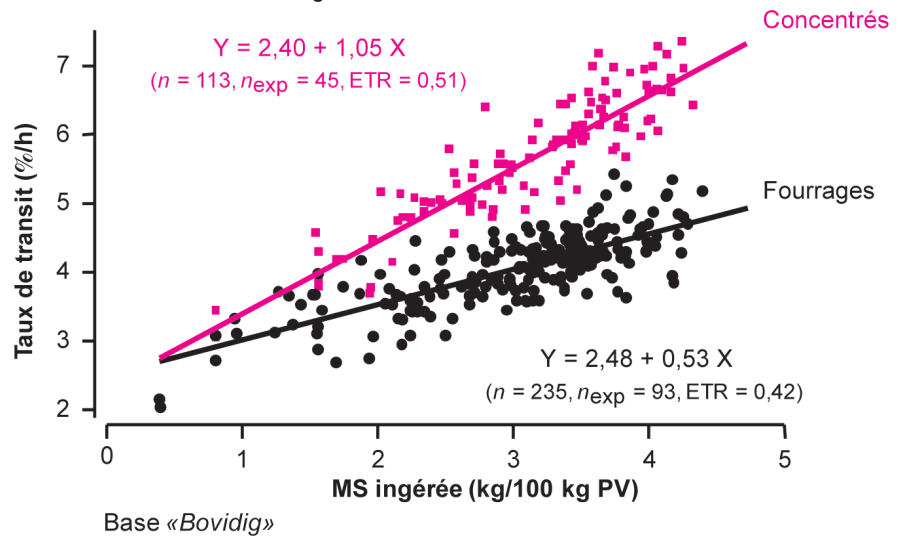
Par ailleurs, une sous-base de « *Bovidig* », « *Bovidig-PDI* », a rassemblé tous les essais portant sur l'influence quantitative ou qualitative de l'azote (161 exp, 423 trt). A partir des publications de cette base de données, toutes les rations ont été calculées à l'aide des systèmes d'unités publiés en 2007 (INRA 2007). D'autres bases de données ont été accessoirement mobilisées pour aborder certaines questions spécifiques, elles sont citées au fil du texte.

Dans toutes ces bases de données les facteurs de variation étudiés ont été identifiés et codés avec un soin particulier pour permettre toutes les analyses envisageables pour ce travail, en particulier pour pouvoir bien dégager les effets spécifiques des principales pratiques alimentaires. Ensuite les données ont été traitées statistiquement par méta-analyses selon les recommandations de Sauvant *et al* (2005 et 2008) pour séparer les variations intra- et inter-expériences, sachant que les variations et relations intra-expérience sont privilégiées pour quantifier les réponses digestives génériques aux pratiques alimentaires. Pour chaque relation intra-expérience retenue, les nombres d'expériences (n_{exp}) et de traitements (n) pris en compte sont indiqués, ainsi que l'Ecart-Type Résiduel (ETR) attaché à la régression. Ensuite, il a été nécessaire d'effectuer un tri parmi les nombreuses équations ainsi calculées, d'abord pour sélectionner les plus pertinentes en termes de qualité statistique et de signification biologique. Nous ne présentons ici que les relations utilisées dans les nouveaux calculs des valeurs nutritives des rations (UF et PDI)¹, sans aborder les équations relatives aux durées de mastication et leurs conséquences sur la comminution des particules et les recyclages, à l'encombrement du rumen, aux productions des AGV dans le rumen et le gros intestin, à la production de glucose dans les intestins, etc. Dans cet article les principaux aspects abordés concernent donc les transits, la digestion des fractions azotées et amylacées, les interactions digestives, la matière organique fermentescible dans le rumen, la production des protéines microbiennes, la digestion dans les intestins et les flux de rejets d'énergie liés à la digestion. Pour chacune de ces parties, nous présenterons les évolutions qui résultent de ces propositions par rapport aux anciennes versions des systèmes INRA ou aux propositions récentes des autres pays.

1.3 / Les outils d'intégration, de calcul et d'évaluation

Les nombreuses équations empiriques ainsi produites à partir d'ensembles divers de données (publications et expériences différents, types d'animaux différents, nombres d'observations différents...) n'avaient pas de raison d'être d'emblée cohérentes entre elles, il a donc été nécessaire de mettre en œuvre une démarche pour les intégrer et s'assurer de cette cohérence. Cette démarche a consisté à développer un modèle mécaniste du tube digestif, structuré

Figure 2. Relation intra-expérience entre le niveau de MS ingérée par les bovins et les taux de transit des fourrages et des concentrés dans le rumen.



autour de 12 compartiments, et à en explorer les réponses aux variations de composition des rations ingérées (Sauvant et Nozière 2012). Cette approche combine de la modélisation mécaniste et des méta-analyses (Sauvant et Mertens 2009), elle n'est pas présentée dans ce texte. De plus, pour pouvoir évaluer les apports nutritifs permis par les rations ainsi que les besoins et les réponses des animaux à travers de nombreuses rations expérimentales, il a été nécessaire de construire un outil de calcul (« SysTool ») des valeurs nutritives des rations (Chapoutot *et al* 2013) à partir des valeurs « tables » renouvelées des aliments ingérés. Enfin, de manière à pouvoir simuler un grand nombre de régimes en testant la sensibilité de l'ensemble aux variations des différents paramètres, un outil de simulation, appelé « Sirar » (Simulateur des rations des ruminants) a été développé (Delagarde et Buonocore, non publié). Ces différents outils ne seront pas détaillés dans ce texte, mais sont indispensables au développement, à l'évaluation et à la validation de l'ensemble des équations présentées.

2 / Le transit des aliments dans le rumen

Chez les ruminants, le transit joue un rôle déterminant vis-à-vis de la digestion car il détermine la partition des substrats alimentaires entre leur digestion microbienne dans le rumen et leur passage dans la suite du tube digestif. Dans la version précédente du système PDI, le taux de transit, ou taux de passage, de toutes les particules dans le rumen était fixé à 6%/heure quel que soit l'aliment

considéré. Par ailleurs, les fractions solubles étaient supposées être immédiatement dégradées et utilisées à 100% par les microorganismes du rumen, ce qui évitait de considérer les transits des liquides. D'autres systèmes équivalents avaient retenu 4,5%/h pour les fourrages et 6%/h pour les concentrés (Tamminga *et al* 1994). D'autres systèmes encore, comme celui de Cornell, avaient cherché à être plus mécaniste en reliant le transit au niveau d'ingestion (Sniffen *et al* 1992). Récemment, le système NorFor (Volden 2011) s'est appuyé sur des relations entre l'ingestion de Matière Sèche (MS) et de parois (NDF), et a différencié le transit des fourrages et des concentrés. Dans l'actualisation récente du système néerlandais (van Duinkerken *et al* 2011), les taux de passage dépendent du type d'aliments (fourrages vs concentrés), de leurs taux de dégradation et de leurs constituants selon une approche assez compliquée qui demanderait à être validée.

Pour établir des équations de prévision des taux de passage (exprimés en %/h) des particules des fourrages (kft), des concentrés (kct) et de la phase liquide (klt) nous nous sommes appuyés sur la base « Bovidig » en sélectionnant les expériences où ces taux avaient été mesurés à l'aide de marqueurs des aliments. Le critère prédictif le plus important est le niveau d'ingestion de matière sèche (NI, exprimé en kg de MSI/100 kg de poids vif, ou MSI %PV) qui varie de moins de 1% à plus de 4%. La figure 2 montre, en conditions comparables, les réponses moyennes de kft et kct à NI. Cette figure montre clairement que, au sein d'une même ration,

¹ Les abréviations utilisées dans les équations et les figures sont présentées dans le glossaire situé à la fin de l'article.

les particules de concentré passent plus rapidement que celles des fourrages car elles nécessitent moins de mastication préalable avant de pouvoir transiter. Outre NI, la proportion de concentré dans la ration ($0 < \text{PCO} < 1$) a aussi une influence significative sur les transits si bien que les relations complètes suivantes ont été obtenues :

$$\text{kft} = 2,02 + 0,88 \text{ NI} - 3,13 \text{ PCO}^2$$

($n = 236, n_{\text{exp}} = 95, \text{ETR} = 0,41$) [1]

$$\text{kct} = 2,53 + 1,22 \text{ NI} - 2,61 \text{ PCO}^2$$

($n = 115, n_{\text{exp}} = 46, \text{ETR} = 0,51$) [2]

Pour le taux de passage moyen des particules d'une ration (kpt) les taux kft et kct sont combinés à proportion du concentré (PCO) et du fourrage (1-PCO) dans cette ration.

$$\text{kpt} = \text{kft} (1 - \text{PCO}) + \text{kct} \text{ PCO} [3]$$

Pour la phase liquide l'équation calculée est :

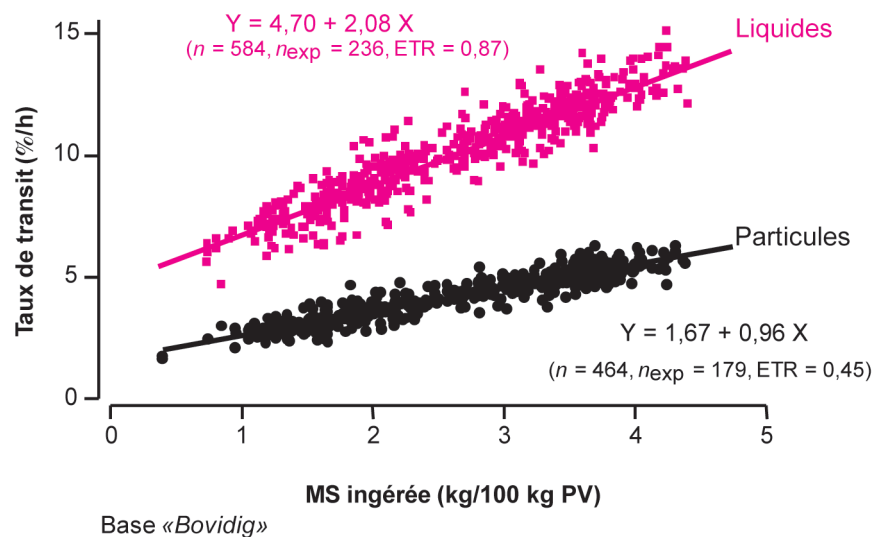
$$\text{klt} = 5,35 + 2,18 \text{ NI} - 3,71 \text{ PCO}^2$$

($n = 582, n_{\text{exp}} = 236, \text{ETR} = 0,87$) [4]

La figure 3 présente l'allure des équations moyennes de prévision de kpt et klt. Donc, selon ces relations, les taux de passage sont proportionnels au niveau de MSI %PV et ils sont ralentis lorsque la proportion de concentré augmente dans le régime. Par exemple, une ration avec $\text{PCO} = 0,6$ présente un taux de passage inférieur d'environ 1%/h par rapport à la même ration qui serait distribuée sans concentré ($\text{PCO} = 0$). Ceci est la conséquence d'une baisse de motricité du tube digestif lorsque les apports de concentrés augmentent. Ce principe avait déjà été intégré dans les équations de prévision des taux de passage d'Owens et Goetsch (1986). Ces nouvelles relations permettent de constater que kft n'atteint jamais l'ancienne valeur du système PDI, de 6%/h, et que kct ne l'atteint que pour un niveau élevé de MSI, proche de $\text{NI} = 3,5$. Cela signifie que, par rapport aux systèmes d'unités antérieurs, les fractions azotées et amylacées des aliments dans les rations sont maintenant supposées rester plus longtemps dans le rumen pour y subir la digestion microbienne, les fractions alimentaires échappant à la dégradation microbienne sont donc moins importantes qu'avant pour les rations moyennes. Des calculs comparatifs, réalisés avec notre modèle mécaniste du tube digestif, montrent que ces équations fournissent des valeurs de taux de transit très proches de celles proposées dans les systèmes d'unités les plus récents, en particulier le système NorFor (Volden 2011).

Pour calculer les valeurs de la dégradation ruminale des constituants azotés

Figure 3. Relation intra-expérience entre le niveau de MS ingérée par les bovins et les taux de transit des liquides et des particules dans le rumen.



et amylacés des aliments (voir § 3) dans les tables de valeur alimentaire actualisées qui seront publiées, on attribue désormais à chaque aliment un NI de référence (NIref). Pour les fourrages, le NIref retenu découle directement de l'ingestibilité du fourrage mesurée sur moutons standard conjointement à la mesure de sa digestibilité (à l'exception de l'ensilage de maïs pour lequel les mesures sont réalisées avec un NIref constant de 1,44), et on considère que $\text{PCO} = 0$. Ces résultats d'ingestibilité et digestibilité des fourrages ont été obtenus à l'INRA depuis plusieurs décennies (Demarquilly et Weiss 1970, Andrieu *et al* 1988, Baumont *et al* 2007). Pour les concentrés et co-produits, on considère que $\text{NIref} = 2$ et que $\text{PCO} = 0$, soit $\text{kct} = 4,97$ et $\text{klt} = 9,71\%/h$. Les hypothèses de calcul, avec $\text{PCO} = 0$, impliquent que l'effet de PCO n'est pris en compte qu'au niveau des calculs des rations. Ces principes constituent une première justification du fait que les aliments ne présentent pas une valeur nutritive fixe, mais que celle-ci varie en fonction de la ration dans laquelle ils se trouvent.

3 / La digestion des protéines et de l'amidon dans le rumen

Ces deux constituants des aliments, les protéines et l'amidon, ont fait l'objet d'une approche expérimentale quantitative analogue, utilisant la méthode des sachets de nylon (*in sacco* ou *in situ*) placés dans le milieu ruminal et retirés après différents temps d'incubation pour pouvoir disposer d'une cinétique de dégradation (D) fonction du temps (t) (Michalet-Doreau *et al* 1987) :

$$D(t) = a + b (1 - \exp^{-ct})$$

Dans cette relation a et b représentent respectivement les proportions des fractions soluble et insoluble, mais dégradables, du constituant considéré, et c est le taux fractionnaire de dégradation de la fraction b. Cette cinétique est ensuite combinée aux valeurs des taux de passage (kft, kct et klt) pour déterminer la dégradabilité théorique du constituant i (DTi) qui est exprimée en %. Cette méthode n'a pas pu être appliquée aux constituants pariétaux en raison, d'une part, du faible nombre de données publiées, et d'autre part, de la grande sensibilité de leur dégradation *in sacco* aux phénomènes d'interaction digestive, celle-ci étant d'ailleurs souvent utilisée pour détecter les interactions microbiennes dans le rumen (Nozière *et al* 1996, Archimède *et al* 1997).

3.1 / L'azote et les protéines

a) La dégradabilité dans le rumen

L'équation de prévision de la dégradabilité théorique (DTN, %) des protéines à partir, d'une part, de la cinétique de dégradation et, d'autre part, des taux de passage des particules et des liquides, qui sont désormais variables (cf. § 2), est la suivante :

$$\text{DTN} = aN [100/(100 + \text{klt})] + bN [cN/(cN + \text{kpt})] [5]$$

Dans ce modèle, aN et bN représentent respectivement les pourcentages des fractions soluble et insoluble, mais dégradables, de la protéine. Le taux fractionnaire de dégradation de bN est le coefficient cN, les paramètres klt et kpt ont été définis plus haut (§ 2). Par rapport à la version préalablement utilisée, cette équation suppose qu'une partie de aN, dont le taux d'utilisation par les microorganismes est supposé être de 100%/h, s'écoule hors du rumen avec

la fraction liquide. Les valeurs de DTN des aliments des tables sont calculées avec les valeurs de kct (concentrés et co-produits) kft (fourrages) et klt (liquides) qui correspondent à N_{lref}, avec PCO = 0. En revanche, au sein des rations, les valeurs de kft, kct et klt sont déterminées en fonction de ses valeurs de NI et de PCO.

Lorsque les valeurs de aN, bN et cN ne sont pas connues mais que les DTN6 le sont, ou sont estimées comme pour les fourrages à partir de leurs caractéristiques et de leur teneur en MAT (Nozières *et al* 2007), il est possible d'utiliser des relations de passage, calculées par simulation, entre les anciennes valeurs de DTN, soit DTN6, et les nouvelles valeurs de DTN dans la ration. Pour les fourrages on a alors (DTNFrat %) :

$$\text{DTNFrat} = 27,6 + 0,760 \text{ DTN6} - 0,000468 \text{ DTN6}^2 - 5,45 \text{ NI} + 0,0312 \text{ NI} \times \text{DTN6} + 10,6 \text{ PCO}^2 \text{ [6]}$$

et, pour les concentrés et co-produit, dans cette même ration (DTNCrat, %) :

$$\text{DTNCrat} = 17,9 + 0,888 \text{ DTN6} - 0,000811 \text{ DTN6}^2 - 5,49 \text{ NI} + 0,0285 \text{ NI} \times \text{DTN6} + 7,42 \text{ PCO}^2 \text{ [7]}$$

Ces deux dernières équations peuvent aussi être utilisées pour calculer les valeurs des tables de valeur alimentaire en prenant PCO = 0 et NI = N_{lref}. Il est ainsi possible de transférer facilement des anciennes valeurs de DTN6 dans le nouveau système.

b) Le flux duodénal

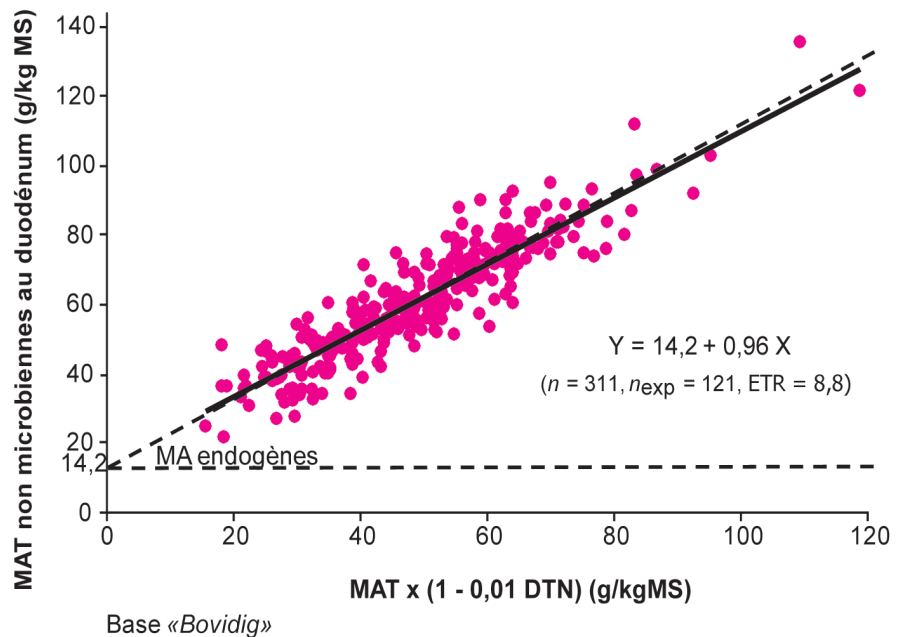
Dans une seconde étape, la base « Bovidig-PDI » a été utilisée pour relier le flux duodénal de protéines non microbiennes (somme des protéines alimentaires non dégradées dans le rumen et des MA endogènes *in vivo*) : MAEduo = MAduo - MAmicrobiennes, en g/kg MS) à la quantité de MAT non dégradée *in sacco*. La régression intra-expérience obtenue est présentée en figure 4, elle montre que les valeurs des rations pour ces paramètres varient entre moins de 20 à plus de 100g/kg MS :

$$\text{MAEduo} = 14,2 + 0,96 \text{ MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN}) \text{ (n = 311, n}_{\text{exp}} = 121, \text{ ETR} = 8,8) \text{ [8]}$$

Dans cette régression, le coefficient 0,96 n'est pas significativement différent de 1 et l'ordonnée à l'origine, 14,2 g MAT g/kg MS, est significativement différente de 0 et représente la fraction protéique endogène passant au duodénum. Lorsque la pente est considérée comme égale 1, l'équation de calcul devient :

$$\text{MAEduo} = 14,2 + \text{MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN}) \text{ [9]}$$

Figure 4. Relation intra-expérience entre les matières azotées (MAT) non dégradables *in sacco* et le flux de MAT non microbiennes au duodénum.



Le deuxième membre de cette équation correspond aux protéines d'origine alimentaire arrivant au duodénum (PIA, en g/kg MS) :

$$\text{PIA} = \text{MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN}) \text{ [10]}$$

L'ancien coefficient multiplicatif de 1,11 n'est plus appliqué avec cette nouvelle approche. La version néerlandaise DVE/OEB du système PDI, qui avait aussi adopté ce coefficient 1,11 (Tamminga *et al* 1994), l'a également abandonné récemment (van Duinkerken *et al* 2011).

3.2 / La digestion de l'amidon

a) Principe

La quantité et surtout la qualité de l'amidon dans les rations des ruminants constituent le principal moyen pour modifier la répartition de la Matière Organique (MO) digérée et des types de nutriments absorbables (glucose vs AGV) entre les différents compartiments digestifs du ruminant (Offner et Sauvante 2004). Il importe donc de pouvoir prédire au mieux la digestion de l'amidon dans le rumen qui conditionne l'ensemble de sa partition digestive entre les organes. Pourtant, jusqu'à récemment, les unités d'alimentation n'ont pas pris en compte cette question, mis à part le système néerlandais (Tamminga *et al* 1994). Le NRC (2001) avait seulement pris en compte les conséquences des différences de dégradabilité ruminale de l'amidon au niveau des TDN («Total Digestible Nutrient») des céréales. Des données de dégradabilité *in sacco* de l'amidon des concentrés et des co-produits dans le rumen ont été proposées dans les tables INRA-AFZ en

2002, y compris pour les aliments traités technologiquement. Dans cet ouvrage, il était recommandé de tenir compte de cette dégradabilité de l'amidon dans le calcul de la MOF des aliments (Sauvante *et al* 2002). L'adaptation proposée consistait à prédire la teneur en amidon non digestible dans le rumen mesuré au duodénum (AMduo, g/kg MS) à partir de la teneur en amidon (AM, g/kg MS) selon la relation :

$$\text{AMduo} = \text{AM} \times (1 - 0,01 \text{ dAMru} \%) \text{ [11]}$$

dAMru étant la digestibilité *in vivo* de l'amidon dans le rumen qui est prédite à partir de DTAM6 et MSI %PV selon une équation proposée par Offner et Sauvante (2004).

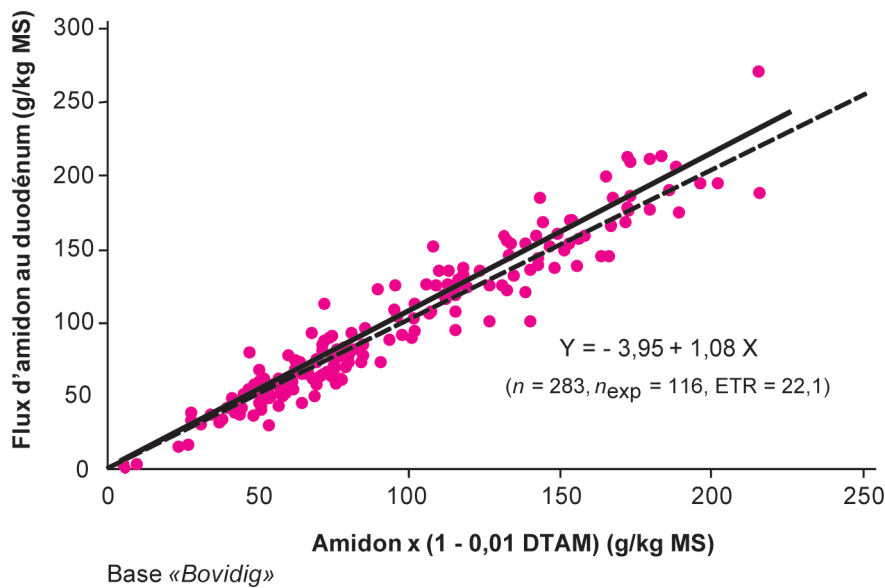
b) La dégradabilité dans le rumen

Le principe de l'approche proposée pour l'amidon est très comparable à cette première proposition et suit une démarche parallèle à celle suivie pour l'azote avec une équation générique similaire pour ajuster les cinétiques de dégradation *in sacco* de l'amidon.

$$\text{DTAM} = \text{aAM} [100/(100 + \text{klt})] + \text{bAM} [\text{cAM}/(\text{cAM} + \text{kpt})] \text{ [12]}$$

La signification des paramètres aAM, bAM et cAM est comparable à celle des paramètres aN, bN et cN présentés pour l'azote. Les valeurs de DTAM des aliments des tables sont calculées avec les valeurs de kct (concentrés et co-produits) kft (fourrages) et klt (liquides) qui correspondent à N_{lref}, avec PCO = 0. Pour une ration les valeurs de klt, kpt sont calculées à partir des équations [1] à [4] en fonction de ses valeurs de NI

Figure 5. Relation intra-expérience entre l'amidon non dégradé in sacco et le flux d'amidon au duodénum.



et PCO. Lorsque les valeurs de aAM, bAM et cAM ne sont pas disponibles, et que les valeurs de DTAM6 des aliments le sont, il est possible, pour calculer la DTAM de la ration (DTAM en %), d'appliquer la relation de passage suivante obtenue à partir d'une sous-base de « Bovidig », « Bovidig-Amidon » focalisée sur la digestion de l'amidon chez les bovins (Offner et Sauvant 2004) dans laquelle, pour chacun des 303 traitements (122 expériences, 80 publications), on disposait de mesures de digestibilité *in vivo* de l'amidon dans le rumen :

$$\begin{aligned} \text{DTAMrat} = & 18,8 + 1,30 \text{ DTAM6} \\ & - 0,00575 \text{ DTAM6}^2 - 9,42 \text{ NI} \\ & + 9,14 \text{ PCO}^2 + 0,0897 \text{ NI} \times \text{DTAM6} \\ & - 1,97 \text{ NI} \times \text{PCO} \\ (n = 303, \text{ ETR} = 1,6) \quad [13] \end{aligned}$$

Cette équation peut aussi s'appliquer au calcul des valeurs des tables pour les fourrages (NIref et PCO = 0) et les concentrés et co-produits (NIref = 2, PCO = 0). Des travaux en cours permettront d'actualiser en profondeur les valeurs de DTAM des fourrages et des concentrés et co-produits à l'occasion de la publication et de la diffusion des nouveaux systèmes d'unités.

c) Le flux duodénil

Dans une seconde étape, pour calculer la relation de prédiction du flux d'amidon qui transite au duodénum, nous avons utilisé la sous-base « Bovidig-Amidon ». Le flux mesuré d'amidon au duodénum (AMduo, g/kg MS) est prédit à partir des teneurs en AM de la ration (g/kg MS) et de sa dégradabilité *in sacco* DTAM (%) selon l'expression :

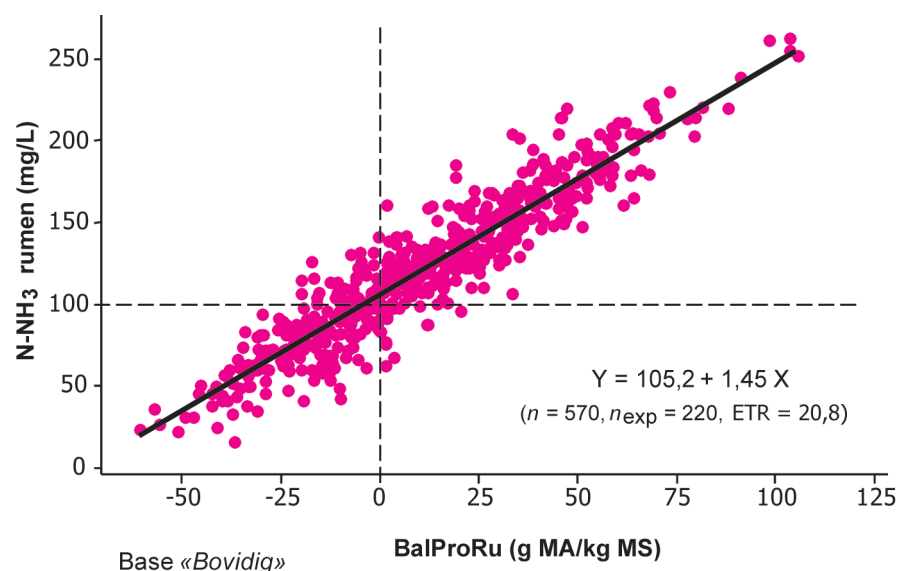
$$\text{AMduo} = \text{AM} \times (1 - 0,01 \text{ DTAM}) \quad [14]$$

D'après les données considérées, le flux d'amidon au duodénum est nettement inférieur (3 fois moins environ) au flux d'amidon digéré dans le rumen. La figure 5 présente cette relation, les valeurs de flux d'amidon pour les 283 rations d'origines diverses qui ont été considérées s'échelonnent entre 0 et plus de 200g/kg MS d'amidon transitant au duodénum. L'équation de prédiction intra-expérience, après retrait des valeurs aberrantes, est :

$$\begin{aligned} \text{AMduo} = & -3,95 + 1,08 \text{ AM} \times (1 - 0,01 \text{ DTAMrat}) \\ (n = 283, n_{\text{exp}} = 116, \text{ ETR} = 22,1) \quad [15] \end{aligned}$$

Dans cette équation la constante n'est pas différente de 0 et la pente est égale à 1, en outre il n'y a pas d'influence du NI et de PCO au sein des variations résiduelles de cette équation. Cela signifie

Figure 6. Relation intra-expérience entre la balance protéique du rumen (BalProRu) et la teneur en N-NH₃ du jus de rumen.



que la prise en compte des facteurs d'interaction digestive NI et PCO au niveau des calculs de base des taux de passage (pour le calcul de DTAM) ou de l'équation [13] a été effective. Selon cette équation qui ne diffère pas de la première bissectrice, le flux d'amidon au duodénum peut donc être considéré comme égal en moyenne à ce qui est prédit par les mesures *in sacco* en tenant compte, dans l'équation [12], de l'influence de NI et PCO sur les transits. L'équation [14] est applicable telle quelle. Simultanément, cette relation permet aussi de prédire, par différence, les quantités d'amidon digérées dans le rumen (AMDru) :

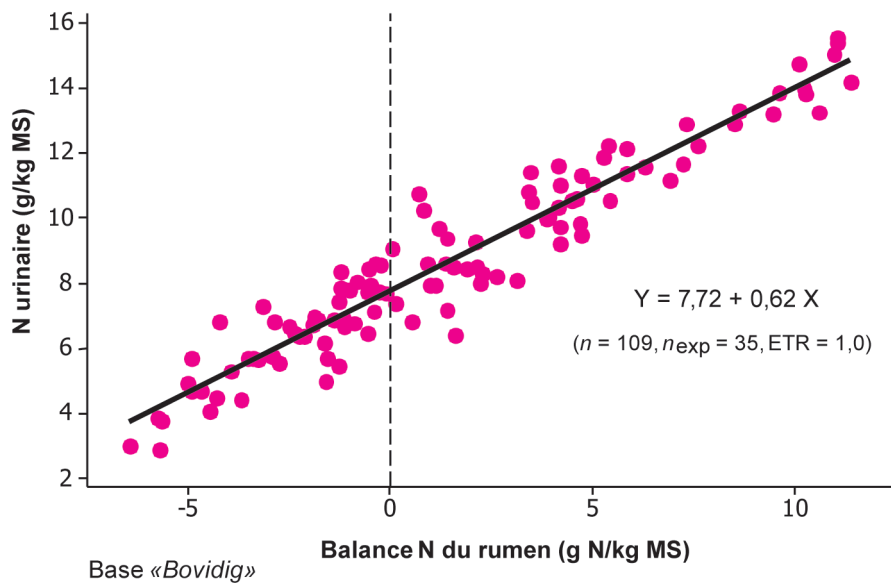
$$\text{AMDru} = \text{AM} - \text{AMduo} \quad [16]$$

4 / La balance protéique du rumen

4.1 / Définition et signification biologique

L'ambition de la révision des systèmes étant de mieux prendre en compte les interactions énergie × azote au niveau du rumen, un soin particulier a été apporté à la modélisation des principaux flux azotés associés à cet organe. En particulier, chez les ruminants, la quantité d'azote, donc de protéines brutes, ou MAT (6,25 × N), qui sort du réticulo-rumen, évaluée par des mesures effectuées au niveau du duodénum, peut être inférieure ou supérieure à celle qui est ingérée par la ration. Cette différence entre MAT ingérées (g/kg MS) et MAT au duodénum (MAduo, g/kg MS, en excluant la fraction NH₃) représente le bilan digestif azoté apparent du rumen et a été appelé « Balance protéique du rumen » (BalProRu, g/kg MS) pour se rapprocher de l'expression « Rumen

Figure 7. Relation intra-expérience entre la balance azotée du rumen (N ingéré – N non ammoniacal au duodénum) et les rejets azotés urinaires.



« Protein Balance » déjà utilisée dans les systèmes étrangers récents. En pratique, en intra-expérience, BalProRu mesurée *in vivo* varie étroitement en fonction de la teneur en MAT du régime comme le montre cette régression calculée à partir des 285 expériences et 735 traitements de l'ensemble de la base « Bovidig » :

$$\text{BalProRu} = - 84,5 + 0,61 \text{ MAT} \\ (n = 735, n_{\text{exp}} = 285, \text{ETR} = 8,6) \text{ [17]}$$

Cette relation, qui s'appuie sur des teneurs en MAT des rations allant de moins de 50 à plus de 250g/kg MS, montre qu'environ 60% des variations des MAT ingérées se retrouvent dans celles de BalProRu. La teneur en MAT correspondant à BalProRu = 0 est d'environ 140 g/kg MS. Par ailleurs, compte tenu de la représentation que l'on se fait des flux azotés au niveau du rumen (entrée, passage au duodénum, échanges au niveau de la paroi du rumen), BalProRu représente la résultante des échanges d' NH_3 et d'urée au niveau de la paroi du rumen :

$$\text{BalProRu} = \\ \text{MAT} - \text{MA}_{\text{duo}} = 6,25 \times (\text{NNH}_3 \\ \text{absorbé} - \text{Nurée recyclé}) \text{ [18]}$$

Cette relation explique la relation intra-expérience étroite qui associe BalProRu à la teneur en N-NH_3 du jus de rumen (figure 6) ainsi qu'aux rejets d' N urinaire (figure 7). BalProRu, dont les valeurs mesurées sur plusieurs centaines de rations diverses varient entre moins de - 50 et plus de 100 g/kg MS, permet donc de prévoir les excès d'azote par rapport aux besoins des microbes et le gâchis d'azote qui en découle. En effet, d'après la figure 7, près des deux tiers de l'azote en excès de BalProRu sont rejetés par la voie urinaire. Des relations comparables s'observent chez

les petits ruminants, les chèvres en particulier (Nozière *et al* 2013).

4.2 / Prévision

Il importe de relier BalProRu aux critères du système PDI. Ainsi, une autre expression possible de BalProRu en fonction des flux de MA endogènes (MA_{endo}), des PIA, des MA Fermentescibles (MAF) et des MA microbiennes (MAMIC) est :

$$\text{BalProRu} = \\ \text{MAT} - \text{PIA} - \text{MA}_{\text{endo}} - \text{MAMIC} \\ = \text{MAF} - \text{MA}_{\text{endo}} - \text{MAMIC} \text{ [19]}$$

Cette relation montre également que BalProRu et la production de protéines microbiennes (MAMIC) sont négativement reliées au sein de ce modèle rela-

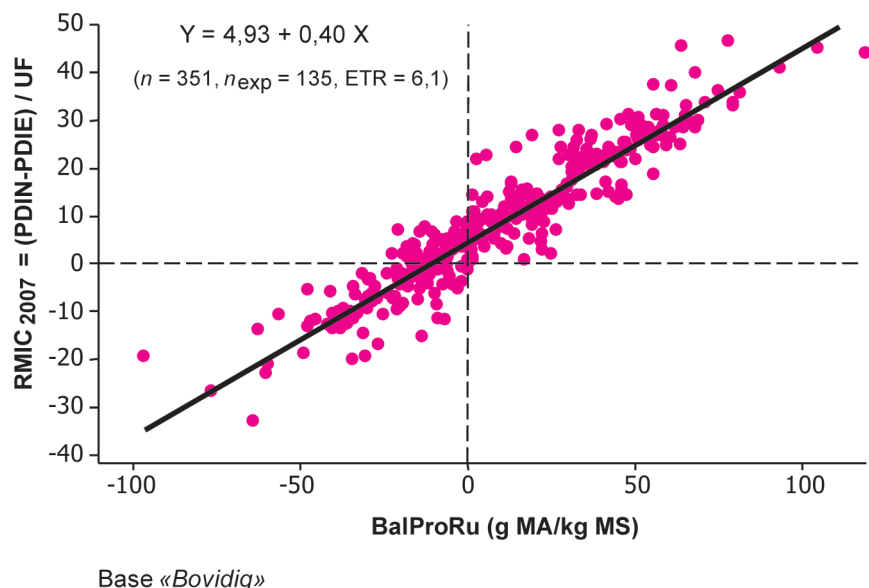
tionnel. Or, $\text{MAF} - \text{MAMIC}$ correspond à la différence $(\text{PIMN} - \text{PIME})/0,8$, le coefficient 0,8 étant lié au fait qu'on considère que les MA microbiennes contiennent 80% d'acides aminés. C'était déjà le cas dans la version précédente du système des PDI. On a donc l'expression suivante pour relier les valeurs de BalProRu apparente au système PDI, le coefficient de 14,2 permettant de tenir compte de l'endogène (cf. équations [8 et 9]) :

$$\text{BalProRu} = - 14,2 \\ + (\text{PIMN} - \text{PIME})/0,8 \text{ [20]}$$

Ainsi, BalProRu est l'indicateur de l'équilibre azote/énergie de l'écosystème ruminal ; cependant, en raison de la fraction protéique endogène, on n'a pas BalProRu = 0 mais = - 14,2 lorsqu'il y a un équilibre strict entre les apports d'énergie et d'azote aux microbes du rumen.

Par ailleurs, le critère BalProRu est très corrélé au critère utilisé antérieurement pour évaluer l'équilibre azote/énergie du rumen : $\text{Rmic} = (\text{PDIN} - \text{PDIE})/\text{UF}$ (Agabriel *et al* 2007). La figure 8 montre la relation intra-expérience liant ces deux critères. L'avantage du choix de BalProRu est que ce critère correspond plus directement à des phénomènes digestifs dans le rumen, qu'il est mesuré expérimentalement et qu'il est additif par construction. Notons que l'application des valeurs de BalProRu des aliments aux rations permet de prédire avec une bonne précision les 102 mesures de BalProRu de la base «Ovidig», effectuées sur des ovins porteurs de canule duodénales (Nozière *et al* 2013). Les systèmes NRC (2001) et néerlandais (van Duinkerken *et al* 2011) recommandent de s'assurer que BalProRu est positive, indication d'un bon fonctionnement du

Figure 8. Relation intra-expérience entre la balance protéique du rumen (BalProRu) et le critère Rmic_{2007} ($(\text{PDIN}-\text{PDIE})/\text{UF}$).



rumen, cependant ces systèmes ne vont pas au-delà de cette recommandation. En revanche, nous en tiendrons compte pour contribuer à expliquer et prédire les interactions digestives et la croissance microbienne (cf. § 5.5).

5 / Les interactions digestives

5.1 / Définition et critère d'évaluation

Les phénomènes d'interactions digestives sont connus depuis longtemps chez les ruminants. Ils constituent une difficulté dans la mesure où ils infirment l'hypothèse d'additivité des unités, pour l'énergie en particulier (Vermorel *et al* 1987, Sauvant et Giger-Reverdin 2009). En effet, si on combine des fourrages et des concentrés dans les proportions PFO₀ et PCO₀ de la MO (PFO₀ + PCO₀ = 1) et si leur dMO de référence dans les tables est respectivement dMO_f et dMO_c, la dMO de la ration (dMOration) est :

$$\text{dMOration} = \text{PFO}_0 \times \text{dMO}_f + \text{PCO}_0 \times \text{dMO}_c - \Delta \text{dMO} \quad [21]$$

Si l'y a pas d'interaction digestive les dMO sont additives selon les proportions PFO₀ et PCO₀ et on a $\Delta \text{dMO} = 0$. En revanche, si $\Delta \text{dMO} < 0$ ou $\Delta \text{dMO} > 0$, on aura un phénomène d'interaction digestive, respectivement positive ou négative. L'enjeu est donc d'identifier les facteurs en cause et de les modéliser au mieux pour les prendre en compte dans les nouvelles unités. L'origine de ces phénomènes d'interaction se situe principalement au sein du rumen avec trois causes majeures : *i*) un passage rapide des substrats alimentaires dans le rumen lorsque le niveau d'ingestion est élevé ; *ii*) un pH du jus de rumen inférieur à 6 (Savant et Peyraud 2010) et associé à des inhibitions des microorganismes cellulolytiques au profit de ceux dégradant les glucides rapides (amylolytiques...) lorsque les rations contiennent des quantités élevées d'aliments concentrés ; *iii*) des variations de l'activité de l'écosystème du rumen en fonction de la disponibilité en azote. Le principe de l'approche a été d'étudier la différence entre des valeurs de dMO mesurées *in vivo* (dMOMes) et celles qui sont calculées par additivité à partir des tables INRA 2007 (dMOcal) pour les mêmes rations :

$$\Delta \text{dMO} = \text{dMOcal} - \text{dMOMes} \quad [22]$$

5.2 / Les propositions antérieures et des autres pays

Les systèmes actuels d'unités d'alimentation des ruminants ont suggéré différentes façons de prendre en compte ces interactions digestives. Ainsi le

NRC utilise une relation permettant de réduire par un coefficient multiplicatif « *discount factor* » la digestibilité du régime TDN en fonction du niveau de production et donc de NI (NRC 2001). Le système NorFor s'appuie sur une modélisation de la digestion des parois dans le rumen qui repose sur un faible nombre de données (Volden 2011). Le système d'unités utilisé en Finlande propose la modélisation la plus aboutie avec la prise en compte des influences du niveau d'ingestion, de la teneur en énergie des constituants de la ration, de la proportion de concentré et de la teneur en MAT de la ration (<http://www.mtt.fi/rehutaulukot/>). En outre, ces relations ont été construites à partir de méta-analyses de nombreuses données de la littérature (Nousiainen *et al* 2009, Huhtanen *et al* 2009).

Jusqu'à présent le système français des UF s'est appuyé sur une correction globale des valeurs UF des rations (et non de la dMO), extraite d'essais d'alimentation, sans mesure de digestibilité, pour les vaches laitières (Vermorel *et al* 1987, Vermorel et Coulon 1998). Cette relation a été simplifiée et déclinée au sein des principales espèces productrices de lait sous forme d'un accroissement des besoins en énergie, ou une diminution globale des apports, ce qui revient au même (INRA 2007). Aucune interaction digestive n'a été prise en compte jusqu'à présent au sein du système PDI. Les équations présentées ici ont été établies et validées essentiellement pour des bovins ; pour les ovins et caprins des approches spécifiques sont en cours de construction (Nozière *et al* 2013).

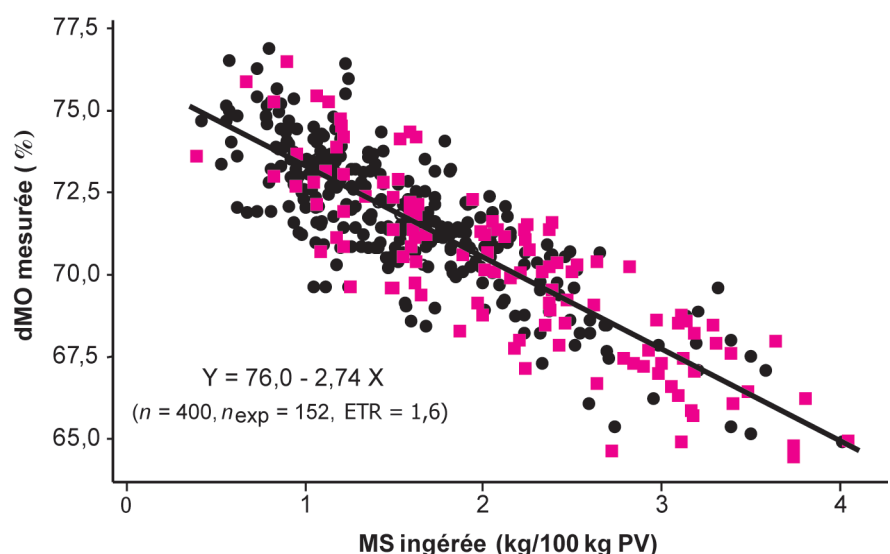
5.3 / Influence du niveau d'ingestion

Il s'agit là du principal facteur d'interaction digestive rencontré en pratique. Le niveau d'ingestion est exprimé en % du poids vif de manière à pouvoir s'affranchir des différences entre espèces (Savant *et al* 2006). Le regroupement, à partir des bases « *Bovidig* » et « *Rumener* », d'un ensemble de 400 résultats de 152 expérimentations où le facteur étudié était le niveau d'ingestion d'un même régime, a permis de calculer une relation intra-expérience générique de l'influence de NI sur la digestibilité de la MO mesurée (dMOMes, en %) :

$$\text{dMOMes} = 76,0 - 2,74 \text{ NI} \\ (n = 400, n_{\text{exp}} = 152, \text{ETR} = 1,6) \quad [23]$$

La figure 9 montre cette relation qui est très précise vu la faible valeur de l'écart type résiduel. Cette équation avait été publiée sous une forme très proche par Sauvant et Giger-Reverdin (2009). Les valeurs de dMO des tables surestiment donc la dMO des régimes ingérés en quantité importante par les ruminants. La pente proposée est inférieure à ce qu'avait obtenu Weiss (1998) dans un travail qui a servi à inspirer le NRC (2001). Une exploration plus avant des données utilisées pour établir l'équation [23] a montré que la teneur en MAT du régime et sa dMO moyenne n'avaient pas d'influence significative (= facteur interférent) sur cette pente. Notons que le NRC avait supposé que cette pente augmentait lorsque la dMO du régime (sa valeur TDN en fait) était plus élevée, cependant cette relation n'avait été établie que sur 17 traitements. Si on suppose l'existence d'un niveau d'inges-

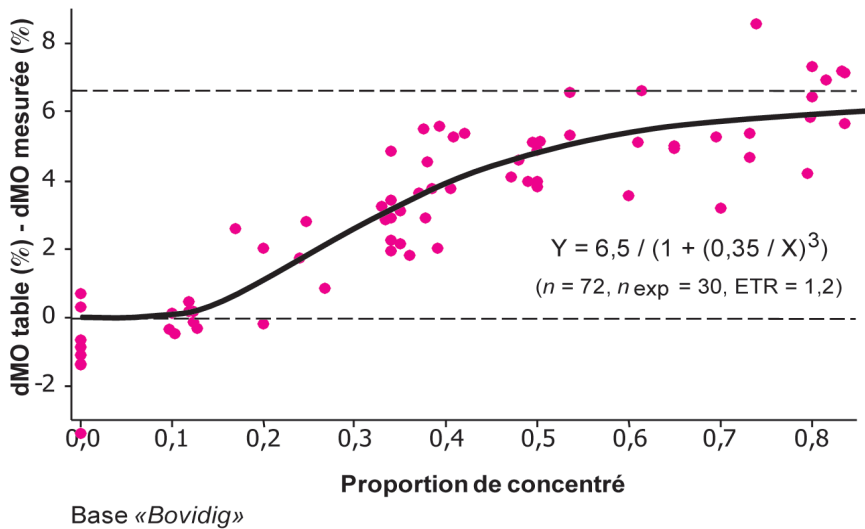
Figure 9. Relation intra-expérience entre le niveau d'ingestion de MS et la digestibilité de la MO de la ration.



Base «*Rumener*»

Base «*Bovidig*»

Figure 10. Relation intra-expérience entre la proportion de concentré de la ration et la différence entre la dMO calculée à partir des tables INRA 2007 et la dMO mesurée de la ration.



tion de référence (N_{lref}), l'équation de correction appliquée correspond donc à :

$$\Delta dMOni = 2,74 (NI - N_{lref}) \quad [24]$$

Pour les fourrages, N_{lref} correspond au NI de la mesure de la dMO des tables (cf. § 2) et les valeurs de dMO demeureront inchangées dans la nouvelle table. Pour les aliments concentrés et coproduits on suppose que N_{lref} = 2 ; en conséquence, pour réaliser une conversion entre les tables antérieures (évaluées avec un NI se situant en moyenne à 1,5%PV) et les tables Systali, on a soustrait 1,37 point de dMO (2,74 x (1,5 - 2) = - 1,37). Pour les rations, les valeurs tables des concentrés et fourrages sont corrigées à l'aide de l'équation [24].

5.4 / Influence de la proportion d'aliments concentrés

La base « *Bovidig-PDI* » regroupe des expériences portant en majorité sur l'influence quantitative ou qualitative de l'azote alimentaire. Les rations distribuées ont été évaluées à travers les systèmes 2007 UF et PDI ce qui a permis de disposer d'une estimation de l'écart entre les valeurs de dMO prédites par ce calcul, sans intégrer d'interactions, et celles mesurées effectivement. Au sein de cette base seules les 30 expériences où la proportion de concentré (PCO) variait largement (de 0 à plus de 0,8/MS) ont été considérées. L'ajustement intra-expérience calculé est :

$$\Delta dMOco = 6,5 / (1 + (0,35 / PCO)^3) \quad (n = 72, n_{exp} = 30, ETR = 1,2) \quad [25]$$

La dMO estimée à partir des valeurs tables surestime donc la dMO des rations les plus riches en aliments concentrés. Cette équation de correction

est précise compte tenu de la faible valeur de l'écart-type résiduel. Le maximum d'effet d'interaction est donc en théorie de 6,5 points lorsque PCO = 1. La figure 10, qui représente cet ajustement, révèle un point d'inflexion dans la zone 0,30 < PCO < 0,40 ; donc, au-delà de PCO = 0,4, l'effet marginal d'un accroissement de PCO s'atténue, vraisemblablement en raison d'une stabilisation du nouvel équilibre de l'écosystème ruminal et parce que la proportion de fourrage dans la ration, qui est le plus affecté par l'interaction et la diminution de digestibilité, diminue. Cette relation n'est pas influencée par les autres facteurs d'interaction qui jouent essentiellement sur des différences expériences avec ce jeu de données compte tenu du modèle d'ajustement.

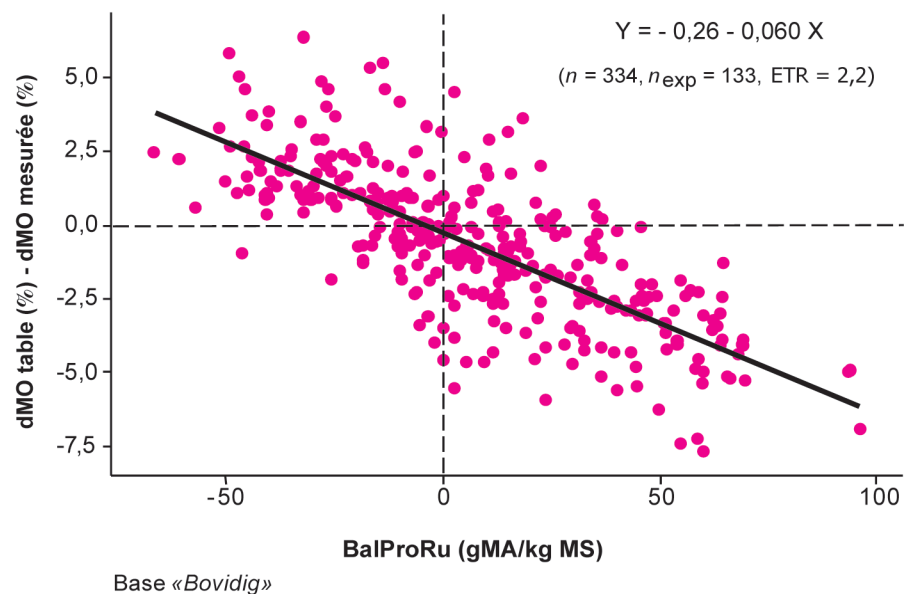
5.5 / Influence de la balance protéique du rumen

Compte tenu du fait que BalProRu est un bon indicateur de l'état nutritionnel et de l'activité de l'écosystème ruminal (cf. § 4), il a semblé important d'étudier son influence sur les autres critères mesurés, en particulier la dMO. Pour cela, 133 expériences de la base « *Bovidig-PDI* » ont été considérées. L'écart de dMO entre les valeurs calculées avec les tables (corrigées des interactions digestives liées à NI et PCO présentées ci-dessus, afin d'assurer l'additivité des 3 effets d'interactions) et mesurées *in vivo* est très significativement expliqué par la valeur BalProRu de la ration correspondante :

$$\Delta dMO_{balproru} = -0,26 - 0,060 \text{ BalProRu} \quad (n = 334, n_{exp} = 133, ETR = 2,2) \quad [26]$$

La constante n'est pas différente de 0. Les valeurs de dMO calculées en moyenne avec les valeurs des tables 2007 sous-estiment donc la dMO des régimes lorsque BalProRu > 0 (excédent d'azote fermentescible) alors que c'est l'inverse pour les régimes avec BalProRu < 0 (carencés en azote fermentescible). Globalement les variations de BalProRu expliquent près de 10 points de variation de ΔdMO (figure 11). La prise en compte de cette relation [26] comme cause d'interaction digestive azote x énergie constitue une des originalités des nouveaux systèmes d'unités. En pratique, les valeurs UF et PDI indiquées pour les aliments dans les tables ignoreront cette relation, celle-ci n'étant prise en compte de façon explicite que pour le calcul de la ration à travers un processus de calcul itératif qui considère

Figure 11. Relation intra-expérience entre la balance protéique du rumen (BalProRu) et la différence entre la dMO calculée à partir des tables INRA 2007 (corrigée des effets de NI et PCO) et la dMO mesurée de la ration.



que la dMO des fourrages dans les tables intègre un effet de BalProRu fonction de leur teneur en MAT et que la dMO des concentrés dans les tables a été obtenue avec BalProRu = 0. Lorsque cette correction pour l'effet de BalProRu est comparée, sur un même jeu de données, avec celle du système finlandais qui s'appuie sur la teneur en MAT du régime, l'impact obtenu sur la correction de la valeur UF de la ration est similaire.

5.6 / L'additivité des différentes interactions digestives

L'additivité des effets liés à l'application des équations [24], [25] et [26] a été validée sur l'ensemble des données de la base « *Bovidig-PDI* » (figure 12), ainsi qu'avec le modèle mécaniste intégré du rumen qui assure l'agrégation et évalue la cohérence de l'ensemble des équations. Cela signifie qu'en pratique les interactions peuvent être calculées et appliquées séparément. On applique donc au final l'expression suivante pour prédire la dMO d'une ration :

$$\text{dMORation} = \text{dMOTable} - \Delta \text{dMONi} - \Delta \text{dMOco} - \Delta \text{dMObalproru} \quad [27]$$

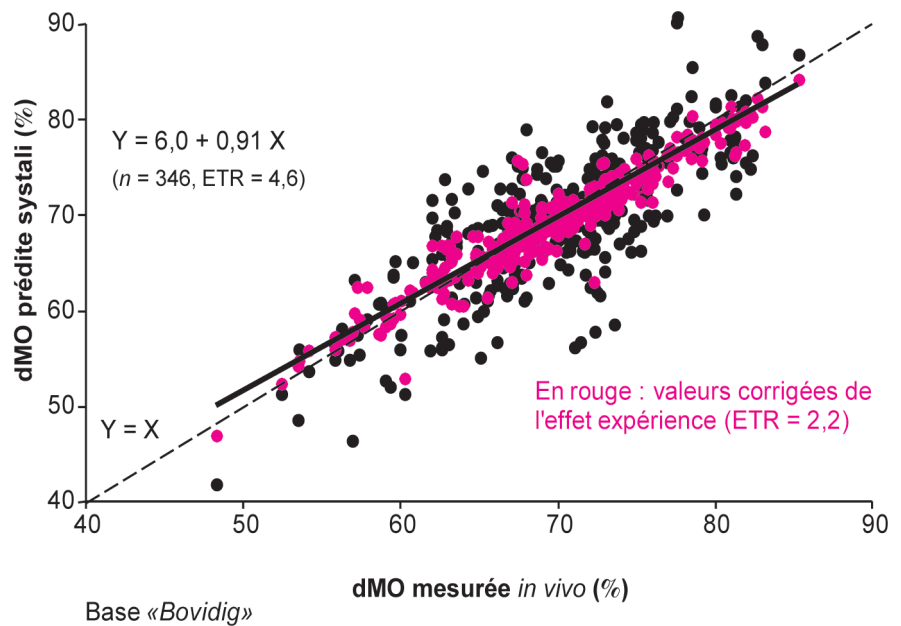
Notons que l'application de ces équations, établies à partir de données mesurées chez des bovins, aboutit également à des dMO prédites très bien reliées aux dMO mesurées chez des ovins (pentes de 0,99, base « *Ovidig* ») et chez des caprins (pente = 1,01, base « *Caprinut* ») (Nozière *et al* 2013).

6 / La matière organique fermentescible dans le rumen

6.1 / Les propositions antérieures et des autres pays, leurs limites

La connaissance de la MO Fermentescible (MOF) par les microbes dans le rumen a toujours été un enjeu majeur et une difficulté de prévision pour les systèmes modernes d'unités alimentaires des ruminants. Dès la première version du système PDI, il avait été nécessaire de trouver un critère mesurable simplement et qui soit proportionnel à la MOF. En effet c'est la MOF, donc l'énergie, qui limite le plus souvent la production de protéines microbiennes dans le rumen. Expérimentalement, c'est la mesure de la MO réellement dégradée *in vivo* dans le rumen (MORDR) qui représente la MOF. En 1978, c'est la MO digestible dans l'ensemble du tube digestif qui avait été prise comme indicateur prédictif de la MOF (INRA 1978), ce principe ayant été repris dans d'autres systèmes, en particulier le NRC (2001). En 1988, le calcul de la MOF

Figure 12. Relation entre la dMO mesurée *in vivo* et la dMO prédite par l'approche systali prenant en compte les trois interactions digestives.



(MOF₁₉₈₈) tenait compte, non seulement de la MOD, mais également des teneurs en produits de fermentation des ensilages (PF), en matières grasses brutes (MG estimées par l'extrait étheré) et en MA non dégradables *in sacco* : MAT (1 - 0,01 DTN6) (Vérité *et al* 1987).

$$\text{MOF}_{1988} = \text{MOD} - \text{MG} - \text{PF} - \text{MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN6}) \quad [28]$$

Cette équation avait été reprise dans le système néerlandais, en tenant compte en plus de la partition de la digestion de l'amidon décrite dans la partie 3.2 (Tamminga *et al* 1994). Ce mode de calcul a constitué un progrès, cependant la MOF₁₉₈₈ était encore éloignée d'une MOF vraie. Les limites majeures de la précision de la MOF₁₉₈₈ viennent des hypothèses simplificatrices suivantes qui avaient été retenues :

- Les MAT non dégradées dans le rumen n'étaient pas corrigées du fait qu'elles sont en partie indigestibles dans l'intestin, fractions en théorie déjà exclues de la MOD.
- Les MG brutes de la ration étaient considérées comme indigestibles à 100% dans le rumen, mais digestibles à 100% dans la suite du tube digestif ce qui ne correspond pas à la réalité.
- Les flux d'amidon au duodénum n'étaient pas considérés en 1988, mais une correction avait été appliquée à la teneur en MOF des aliments (par exemple 0,8 pour le maïs et 0,7 pour le sorgho) pour tenir compte de façon approximative des différences de digestion de l'amidon dans le rumen. Pour gagner en précision, il avait été proposé dans les tables INRA-AFZ (2002) de soustraire de la MOD, l'ami-

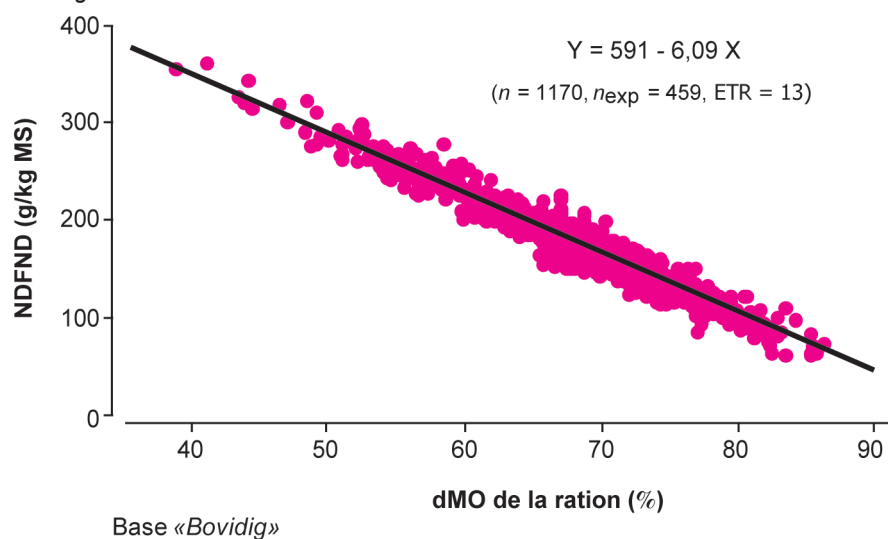
don non dégradé *in sacco* [AM (1 - 0,01 DTAM)] pour se rapprocher de la MOF « vraie » pour les aliments riches en amidon (Offner et Sauvant 2004). Ce principe avait été partiellement proposé auparavant dans la version néerlandaise des PDI (Tamminga *et al* 1994). Dans tous ces cas, l'amidon by-pass était supposé être entièrement digestible dans les intestins, ce qui est inexact (voir § 6.2).

- Le NDF digestible (NDFD), inclus implicitement dans la MOD, était supposé être entièrement digéré dans le rumen alors qu'une partie, de l'ordre de 10%, l'est dans la partie distale du tube digestif.
- Enfin, la MOD non-MAT non-NDF non-amidon non-MG non-PF (« MOD résiduelle ») était considérée comme entièrement fermentée dans le rumen, ce qui n'est pas le cas.

Malgré ces limites, une étude conduite sur la base « *Bovidig* » suggère que le principe de la soustraction de flux digestibles intestinaux de la fraction MOD est la meilleure façon de prédire les teneurs en MOF vraie des rations. Les évolutions ont donc consisté à affiner la quantification de chacune des fractions. Au contraire, d'autres systèmes ont adopté une approche *in sacco* comparable à celle de la dégradation des protéines et de l'amidon (cf § 3), pour prédire le contenu en MOF des aliments (Cornell, NorFor...). Nous n'avons pas adopté cette démarche en raison :

- du faible nombre de données de dégradation *in sacco* des parois végétales (NDF) et du fait que cette dégradation *in sacco* est très sensible à l'état de l'écosystème du rumen (cf. § 3).

Figure 13. Relation intra-expérience entre la dMO de la ration et sa teneur en NDF non digestible.



- de l'intérêt de pouvoir s'appuyer sur la MOD qui est un critère bien documenté à partir des nombreuses mesures de dMO disponibles, et essentiel dans les systèmes PDI et UF.

De plus, les approches *in sacco* ne permettent pas de valoriser les équations assez précises et simples qui peuvent être dégagées des bases de données pour prévoir la digestibilité des principales fractions (MA, AM, AG et NDF) dans les intestins, et qui sont présentées dans le paragraphe suivant.

6.2 / La nouvelle proposition

a) Construction

Afin de se rapprocher au mieux d'une valeur vraie de MOF, étape indispensable pour prédire précisément les quantités d'AGV, de gaz, et de corps microbiens produits dans le rumen, il a été nécessaire de reconsidérer l'ensemble de son calcul, en en conservant les principes. Sur le principe, la relation générique considère que la MOF est la différence entre la MOD dans l'ensemble du tractus digestif et la MOD dans les intestins (MODint). Cette dernière est égale à la somme, pour les différents constituants « i », de la différence entre les flux duodénaux (F_{DUO_i}) et fécaux (FFEC_i) :

$$\text{MOF} = \text{MOD} - \text{MODint} = \text{MOD} - \sum a_i \times (\text{F}_{\text{DUO}_i} - \text{FFEC}_i) \quad [29]$$

Jusqu'à présent l'hypothèse sous-jacente a été que, pour tous les constituants i, on avait $a_i = 1$ et FFEC_i était supposé égal à 0, ce qui revenait à ajouter des matières fécales à la MOD et à biaiser l'estimation de la MOF. Il convient donc, pour les principaux constituants, de chercher à prédire les différences de flux $\text{F}_{\text{DUO}_i} - \text{FFEC}_i$, c'est-à-dire leurs quantités apparemment digestibles dans

les intestins. De plus, il convient d'intégrer les phénomènes d'interaction digestive présentés précédemment. Il a été décidé d'appliquer les interactions de l'équation [27] sur le terme MOD qui devient MODc « corrigée » selon la formule :

$$\text{MODc} = \text{MO} \times 0,01 \text{ dMORation} \quad [30]$$

Pour la fraction des protéines apparemment digestibles dans les intestins, pour rester au plus simple, on a décidé de soustraire le flux de PDIA, l'incertitude liée au fait qu'on soustrait les PDIA et pas les PDIA « apparents » étant très faible.

Pour l'amidon, à partir de la base « Bovidig », il est possible de prédire directement et assez précisément, en intra-expérience, la quantité d'amidon digestible dans les intestins (AMDint, g/kg MS) à partir du flux duodéal calculé par l'équation [14] :

$$\text{AMDint} = (0,21) + 0,826 \text{ AMduo} \quad (n = 375, n_{\text{exp}} = 144, \text{ETR} = 4,4) \quad [31]$$

La constante ne diffère pas de 0.

Pour les parois végétales, mesurées par le résidu NDF, nous avons utilisé les données disponibles de la base « Bovidig ». Les nombreuses données disponibles, montrent que le flux duodéal du NDF (NDFduo, g/kg MS) ne peut pas être prédit précisément à partir de données sur la digestion dans le rumen. En revanche, il est possible d'utiliser des relations assez précises qui partent de la valeur de la dMO de la ration. En effet, le regroupement de plus de 1000 rations, mixtes pour la plupart, permet d'obtenir la régression intra-expérience suivante entre la dMO mesurée (de moins de 40 à plus de 85%) et la fraction paroi indigestible (NDFND, de moins de 100 à plus de 300g/kg MS), principale cause de variation de la dMO (figure 13) :

$$\text{NDFND} = 591 - 6,09 \text{ dMO} \quad (n = 1170, n_{\text{exp}} = 459, \text{ETR} = 13) \quad [32]$$

Les relations obtenues avec les fourrages possèdent un coefficient de pente un peu plus fort, donc une teneur en NDFND un peu plus élevée pour les fourrages les moins digestibles. Trois séries indépendantes de données sur fourrages ont été comparées : les 91 données utilisées pour les tables INRA des fourrages tempérés (Baumont *et al* 2007), les 118 traitements de la base « Bovidig-fourrages » ne contenant que 100% de fourrages dans la ration et les 752 traitements de la base de données développée à l'INRA de Guadeloupe (Assoumaya *et al* 2007). La figure 14 traduit la bonne homogénéité entre ces 3 ensembles de données avec des pentes respectives de -8,63, -7,03 et -8,45. Compte tenu de ce résultat, nous avons décidé pour les calculs des tables des fourrages, de conserver l'usage de l'équation suivante qui était proposée dans le livre INRA 2007 (Baumont *et al* 2007).

$$\text{NDFND} = 785 - 8,63 \text{ dMO} \quad (n = 91, R^2 = 0,92, \text{ETR} = 17) \quad [33]$$

L'étendue des teneurs en NDFND des fourrages se situe selon ces nombreuses données entre moins de 50 et plus de 500 g/kg MS. Enfin, dans la base « Bovidig », une relation intra-expérience assez étroite lie les flux de NDF mesurés aux niveaux duodéal et fécal :

$$\text{NDFduo} = 11,4 + 1,079 \text{ NDFND} \quad (n = 591, n_{\text{exp}} = 225, \text{ETR} = 13) \quad [34]$$

Le calcul de la fraction NDF digestible dans les intestins des rations (NDFDint) se fait par différence à partir des équations [33] et [34].

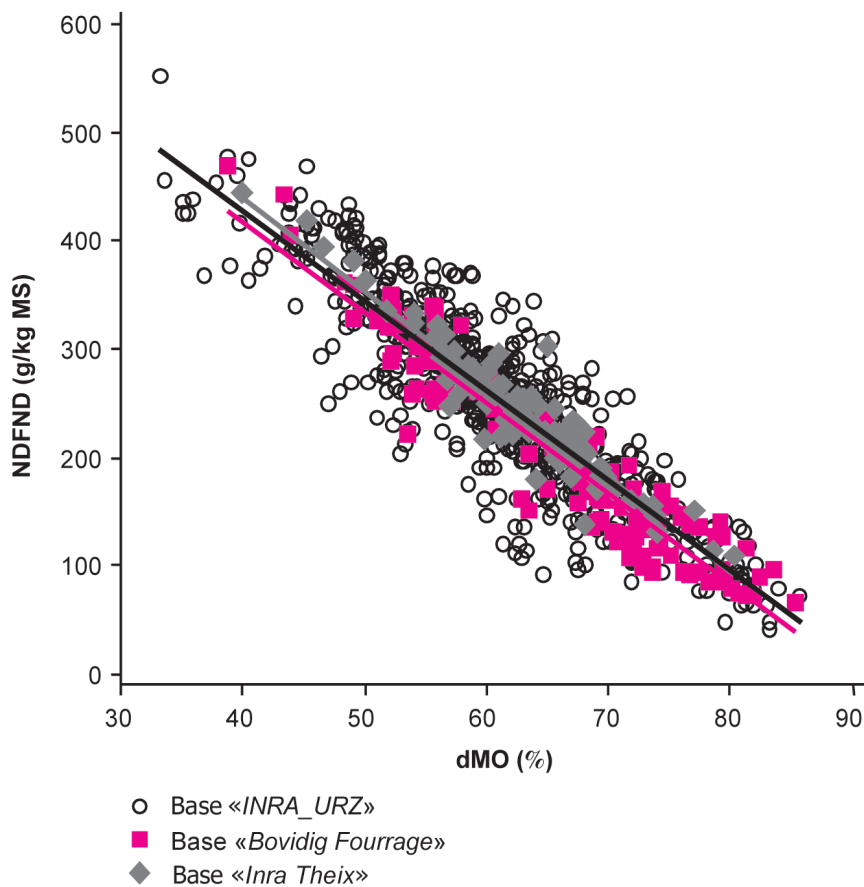
$$\text{NDFDint} = \text{NDFduo} - \text{NDFND} \quad [35]$$

La prévision de la teneur en Acides Gras Totaux (AG) des concentrés et co-produits se fait à partir de l'Extrait Ethéré (EE) en considérant $\text{AG} = a \text{ EE}$, avec $0,45 < a < 0,90$ selon les aliments (INRA-AFZ, 2002). Pour les fourrages, les AG totaux sont prédits à partir de la MAT, selon les équations proposées par Maxin *et al* (2013) à partir de la base de données exploitée par Glasser *et al* (2013). Ensuite, la teneur en AGduo (g/kg MS) des rations est prédite à partir de celle en AG ingérés de la ration (AG, g/kg MS) selon la relation proposée par Schmidely *et al* (2008), obtenue avec des régimes dont la teneur en AG varie de moins de 10 à plus de 100g d'AG/kg MS, c'est-à-dire incluant des rations complémentées ou pas avec des matières grasses.

$$\text{AGduo} = 9,7 + 0,75 \text{ AG} \quad (n = 194, n_{\text{exp}} = 60, \text{ETR} = 3,6) \quad [36]$$

La prévision des AG digestibles dans les intestins (AGDint, g/kg MS) à partir du flux au duodénum se fait selon la

Figure 14. Comparaison pour trois bases de données de la relation intra-expérience entre la dMO des fourrages et leur teneur en NDF non digestible.



régression intra-expérience suivante extraite de la base « Bovidig » :

$$\text{AGDint} = 6,0 + 0,599 \text{ AGduo}$$

($n = 136$, $n_{\text{exp}} = 40$, ETR = 3,0) [37]

b) Evaluation

Pour les 4 fractions digestibles dans les intestins (FractDint), soit PDIA, AMDint, NDFDint et AGDint, il a été vérifié que la régression entre, d'une part, la différence des valeurs mesurées de MOD dans tout le tube digestif et de MO réellement digérées dans le rumen et, d'autre part, chacune de ces fractions :

$$\text{MODmes} - \text{MOrDRmes} = a + b \text{ FractDint}$$

présentait une pente non différente de 1 en se plaçant au sein d'ensembles d'expériences focalisées sur des facteurs liés à des variations de ces éléments. Ainsi les régressions obtenues sont :

- pour 74 expériences portant sur la quantité ou qualité de l'azote :

$$\text{MODmes} - \text{MOrDRmes} = 90,0 + 1,04 \text{ PDIA}$$

($n_{\text{exp}} = 74$, $n = 179$, ETR = 29,7) [38]

- pour 66 expériences portant sur la quantité ou qualité de l'amidon :

$$\text{MODmes} - \text{MOrDRmes} = 14,1 + 1,11 \text{ AMDint}$$

($n_{\text{exp}} = 66$, $n = 145$, ETR = 27,0) [39]

- pour 170 expériences avec des mesures de NDFDint et portant pour la plupart sur l'étude de l'apport de concentré ou sur l'effet du NDF de la ration :

$$\text{MODmes} - \text{MOrDRmes} = 74,9 + 0,96 \text{ NDFDint}$$

($n_{\text{exp}} = 170$, $n = 418$, ETR = 26,7) [40]

- pour 17 expériences portant sur la quantité ou qualité des lipides :

$$\text{MODmes} - \text{MOrDRmes} = 129,8 + 1,18 \text{ AGDint}$$

($n_{\text{exp}} = 17$, $n = 38$, ETR = 20,3) [41]

Ces différents résultats, en particulier le fait que les coefficients des pentes de régression des équations [38] à [41] ne sont pas différents de 1, permettent d'appliquer l'équation de prédiction suivante de la MOF à partir des équations [30], [10], [31], [35] et [37] :

$$\text{MOF} = \text{MODc} - \text{PDIA} - \text{AMDint} - \text{NDFDint} - \text{AGDint} - \text{PF} \quad [42]$$

Les nouvelles teneurs en MOF des rations ainsi obtenues sont en moyenne inférieures aux teneurs en MOF₂₀₀₇, surtout si la correction pour l'amidon

n'est pas prise en compte dans le calcul de MOF₂₀₀₇.

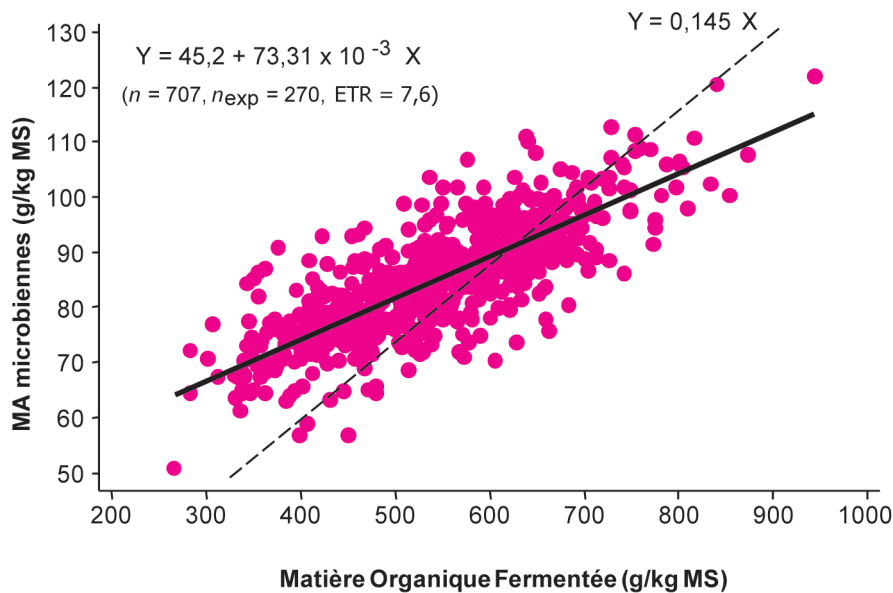
7 / La production des protéines microbiennes

7.1 / Les propositions antérieures et des autres pays

La prédiction de la production des matières azotées microbiennes (MAMIC) dans le rumen a toujours été un des points délicats des systèmes d'unités protéiques en raison de l'incertitude de la mesure et de la difficulté à extraire ses principaux facteurs de variation à partir d'un nombre réduit d'expériences. Dans la proposition initiale du système PDI cette production était considérée comme égale à 120 g MAMIC/kg MOD (INRA 1978). Ultérieurement elle a été calculée à partir de l'équation MOF₁₉₈₈ (Vérité *et al* 1987), en supposant une production de 145 g MAMIC/kg MOF. Les autres systèmes classiques avaient adopté des hypothèses assez comparables : 130 g MAMIC/kg TDN corrigé pour le NRC (2001), 150 g MAMIC/kg MOF pour la version néerlandaise DVE/OEB du système PDI (Tamminga *et al* 1994). Toutes ces estimations correspondent à une valeur moyenne qui, mis à part la MOF, néglige les différents facteurs de variation connus de l'efficacité de la croissance microbienne.

Plus récemment, des propositions plus élaborées, voire compliquées, ont été faites par le système NorFor (Volden 2011) et surtout le nouveau système néerlandais (van Duinkerken *et al* 2011). Dans les deux cas, l'objectif a été de mieux intégrer certains facteurs de variations des MAMIC. Pour le système NorFor, partant de résultats de la méta-analyse d'Archimède *et al* (1997), il est tenu compte des fractions digestibles dans le rumen de l'amidon, du NDF, des protéines et des autres glucides, ces différentes fractions présentant des coefficients d'efficacité de transformation des substrats en MAMIC différents les uns des autres (Volden 2011). Pour le système néerlandais, le calcul est encore plus compliqué car il met en jeu 21 substrats différents distingués par la nature des constituants (protéines, amidon, sucres solubles, NDF), par les aliments considérés (fourrages vs concentrés) et par les types de fractions (soluble vs dégradé vs non dégradé). Pour chacune de ces fractions les taux de transit et les efficacités de transformation du substrat en MAMIC sont différents (Van Duinkerken *et al* 2011). Une des principales limites de ces approches, *a priori* plus mécanistes que les propositions antérieures, semble être leur degré de complication sans avoir pour autant effec-

Figure 15. Relation intra-expérience entre la teneur en MO fermentée dans le rumen et la synthèse de matières azotées microbiennes.



Base «*Bovidig*»

tivement validé et démontré un gain de précision dans la prédiction des MAMIC. Pour notre part, nous avons essayé de construire une prédiction qui soit moins analytique et de type « descendante » en intégrant les principaux facteurs expérimentalement démontrés et en ne retenant que les équations de prédiction les plus précises.

7.2 / Les facteurs de variation de la production de MAMIC

La démarche a donc consisté à dégager les principaux facteurs de variation de la production de MAMIC (variant de moins de 60 à plus de 110 g MAMIC/kg MS), à les quantifier puis à envisager la meilleure façon de les combiner au sein d'une équation intégrative globale.

a) Le rôle majeur de la MOF

Il a été décidé de considérer la teneur en MOF, donc l'énergie utilisée par les microorganismes, comme facteur majeur en considérant son influence comme prioritaire, les autres facteurs intervenant en correction. L'équation intra-expérience proposée à partir de l'interprétation d'un ensemble important d'expériences disponibles avec la base « *Bovidig* » est :

$$\text{MAMIC} = 45,2 + 73,31 \times 10^{-3} \text{MOF} \\ (n = 707, n_{\text{exp}} = 270, \text{ETR} = 7,6) \quad [43]$$

Dans ces données la teneur en MOF a varié entre moins de 300 à plus de 800 g/kg MS (figure 15). Cette relation, dont l'ordonnée à l'origine est différente de 0 (= relation affine), montre que l'hypothèse d'une efficacité constante de la transformation de la MOF en MAMIC par les systèmes « *PDI like* »

de première génération évoqués ci-dessus, aboutit à des surestimations/sous-estimations de la synthèse microbienne pour les régimes présentant des niveaux élevés/faibles de MOF, respectivement. Le bien-fondé de cette équation a été évalué sur d'autres bases indépendantes de « *Bovidig* » : avec la base de données *Ovidig* (Nozière *et al* 2013) et avec la base INRA Guadeloupe-UR Zootechniques (Assoumaya *et al* 2007).

b) Influence des composantes de la matière organique fermentescible

Au-delà de cette influence prédominante de la teneur en MOF, nous avons cherché à savoir si des composantes de la MOF pouvaient influencer les relations comme cela est pris en compte par exemple dans le système PDI néerlandais (van Duinkerken *et al* 2011). L'équation [43] n'est pas modifiée sensiblement lorsqu'elle est calculée sur des sous-bases qui ne comprennent que des expériences focalisées soit sur l'apport de concentré, soit sur la quantité ou la qualité de l'amidon. Pour aller plus loin, lorsque les données le permettaient, la MOF a été séparée en 3 fractions :

- les MA fermentescibles : $\text{MAF} = \text{MAT} - (\text{MA}_{\text{nonMIC}} - \text{MA}_{\text{endo}})$
- le NDF digestible dans le rumen : NDFDru
- la MOF résiduelle : $\text{MOFres} = \text{MOF} - \text{MAF} - \text{NDFDru}$

La fraction MAF est la plus faible et la moins variable (200 ± 60 g/kg MS), la fraction NDFDru est plus importante (350 ± 200) et la fraction MOFres est encore plus conséquente (450 ± 220).

Cette fraction MOFres correspond essentiellement à la fraction glucides facilement fermentescibles dans le rumen, en particulier l'amidon (AMDru) et les sucres. Les fractions MOFres et NDFDru sont étroitement et négativement corrélées en inter- comme en intra-expérience, montrant ainsi à travers les régimes divers considérés, une substitution entre ces deux composants majeurs. Cette relation entre MOFres et NDFDru indique également que les effets des ces deux fractions sur la synthèse microbienne ne peuvent pas être facilement dissociées statistiquement. Lorsque les trois critères MAF, MOFres et NDFDru sont intégrés dans une régression multiple pour prédire les MAMIC, le coefficient de NDFDru est, sans explication évidente, soit nul soit négatif et la MOFres influence plus fortement les synthèses microbiennes que les MAF. Ceci confirme le rôle prépondérant de la MOFres, donc des glucides facilement digestibles dans le rumen, pour soutenir la croissance microbienne et le rôle incertain de la fraction NDFDru vis-à-vis de celle-ci. En revanche, si on considère que la sortie des microbes du rumen est largement permise par leur attachement sur les constituants pariétaux, il est logique de chercher à utiliser le flux de NDFduo (en g/kg MS), plutôt que NDFDru, pour contribuer à expliquer les MAMIC ; la régression intra-expérience obtenue est :

$$\text{MAMIC} = 38,7 + 0,23 \text{MAF} + 55,3 \\ \times 10^{-3} \text{MOFres} + 42,7 \times 10^{-3} \text{NDFduo} \\ (n = 446, n_{\text{exp}} = 174, \text{ETR} = 6,5) \quad [44]$$

Cette relation, dont tous les termes sont calculables avec des équations du système PDI développées dans ce texte, exprime donc un partage entre les caractéristiques qui soutiennent la croissance microbienne (MAF et MOFres) et celles qui permettent d'extraire les microbes du rumen pour les faire passer dans la suite du tube digestif (NDFduo). Biologiquement parlant c'est sans doute la régression la plus fondée pour prédire MAMIC. Les critères NDFDru et NDFduo ne sont pas liés entre eux, mais sont tous les deux positivement liés à la teneur en NDF du régime.

c) Le rôle du transit

Il a été montré que le rumen avait un effet « chémostat » non négligeable vis-à-vis de l'efficacité de la croissance microbienne, très comparable à ce qui a été observé *in vitro* avec une relation positive nette entre l'efficacité de la croissance microbienne et le taux de renouvellement des contenus ruminiaux (Demeyer et Van Nevel 1986). Pour le prendre en compte dans la prédiction des MAMIC, il a été possible de s'appuyer sur des valeurs mesurées de kpt et klt. L'effet de kpt est examiné seul car

l'influence de klt est en limite de signification. Une régression globale curvilinéaire a été ajustée par un modèle de Michaelis :

$$\text{MAMIC} = 152,5 / (1 + (3,0/kpt))$$

(n = 234, ETR = 28,7) [45]

Lorsque les données sont corrigées de l'effet expérience, la variation résiduelle est très fortement atténuée (ETR = 6,9). Cette équation indique, pour le jeu de données considéré, une production maximale théorique de MAMIC égale à 152,5 g/kg MS (figure 16).

d) Principales équations intégratives

Une série de tests a été conduite pour comparer les équations de prédiction de MAMIC qui intègrent les différents facteurs évoqués ci-dessus. En pratique, plusieurs équations candidates peuvent être utilisées avec le même degré de précision, sachant qu'elles possèdent toutes la teneur en MOF comme critère majeur. Par exemple, il est possible d'avoir la même précision avec la variable BalProRu ou avec la teneur en MAF, de plus, des critères « annexes » significatifs peuvent être ajoutés pour améliorer à la marge la précision, tels que la proportion de concentré ou la teneur en NDF du régime. Parmi tous les modèles testés nous en indiquons trois remarquables, dont le premier est l'équation [44] citée plus haut. Les deux autres modèles s'appuient, outre la MOF, soit sur les MAF et sur le transit :

$$\text{MAMIC} = -0,85 + 63,1 \times 10^{-3} \text{ MOF} + 0,22 \text{ MAF} + 11,44 \text{ kpt} - 0,88 \text{ kpt}^2$$

(n = 203, n_{exp} = 83, ETR = 6,8) [46]

soit sur BalProRu, qui présente logiquement une influence partielle négative [19], et sur PCO qui présente un effet positif significatif :

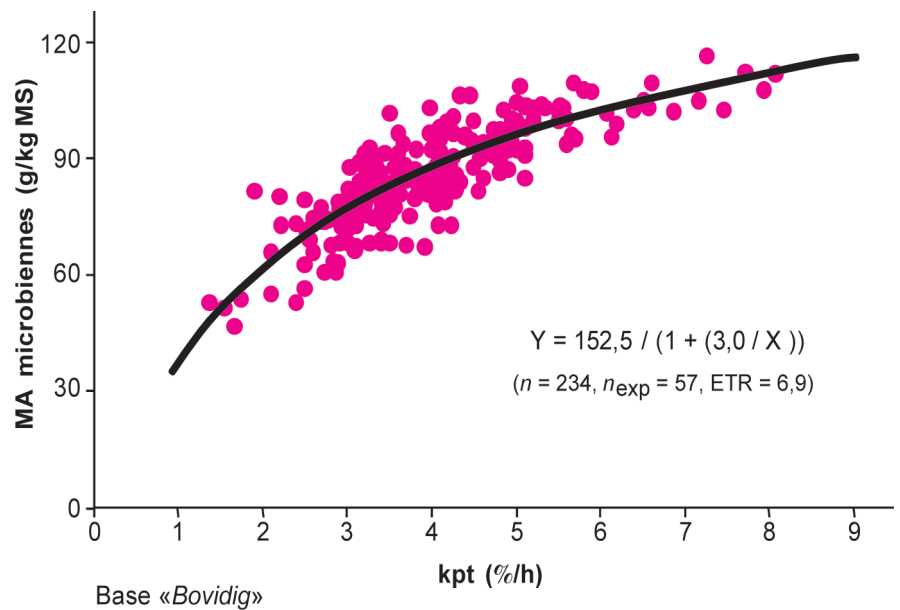
$$\text{MAMIC} = 40,7 - 0,114 \text{ BalProRu} + 75,6 \times 10^{-3} \text{ MOF} + 8,07 \text{ PCO}$$

(n = 637, n_{exp} = 245, ETR = 6,7) [47]

7.3 / La nouvelle proposition

Ces trois équations de calcul [44], [46] et [47] ont été testées sur plusieurs ensembles de données expérimentales, elles présentent globalement des niveaux de précision comparables. Cependant, il apparait que l'équation [47] est, dans l'ensemble des situations testées, un peu plus satisfaisante quant aux résultats obtenus, et plus facile à mettre en œuvre. Elle a donc été retenue pour les calculs de rations dans le nouveau système PDI. Elle est également appliquée pour calculer les valeurs des aliments dans les tables en considérant BalProRu = 0 et PCO = 0 ce qui revient à hiérarchiser les valeurs de MAMIC des aliments des tables en fonction de leur

Figure 16. Relation intra-expérience entre le taux de passage des particules hors du rumen et la synthèse de matières azotées microbiennes.



MOF. Les étendues des variations de MAMIC expliquées par celles des étendues plausibles des 3 variables explicatives, considérées séparément, sont d'environ 40, 15 et 5 g MAMIC/kg MS pour MOF, BalProRu et PCO respectivement, confirmant le rôle prépondérant de la MOF. L'application de l'équation [47] à la base de données Ovidig conduit à une estimation du flux microbien non biaisée :

$$\text{MAMIC mesurée} = -8,1 + 1,01 \text{ MAMIC calculée}$$

(n = 123 ; n_{exp} = 43, ETR = 11,3)

8 / La digestion dans les intestins

Les équations [31], [35] et [37], présentées ci-dessus (§ 6.2), permettent de prévoir la digestion dans l'ensemble des intestins des fractions amidon, NDF et acides gras qui sortent du rumen. Cependant, pour le calcul des PDI d'une part, et pour la prévision des autres nutriments absorbés d'autre part, il est nécessaire d'analyser plus finement la digestion dans l'intestin grêle et le gros intestin.

8.1 / Dans l'intestin grêle

Pour les protéines, les principes du calcul des PDI ont été maintenus, la digestibilité réelle (dr) des protéines microbiennes est de 0,80 et celle des PIA est individualisée à partir de résultats de mesures obtenues avec des sachets de nylon mis à transiter dans les intestins. Les tables des dr des principaux aliments seront actualisées, cependant, lorsqu'aucune donnée n'est disponible, comme précédemment il a été nécessaire, pour calculer les dr, d'évaluer le flux de pro-

téines alimentaires non digestibles dans l'intestin grêle, ou PANDI. On a alors $dr = (PIA - PANDI)/PIA$.

En 1978, on avait considéré que ces PANDI pouvaient être calculées à partir des teneurs en MOD et MOND des rations (INRA 1978). En 1988, le principe de modélisation des PANDI est resté le même (Vérité *et al* 1987) et a été appliqué jusqu'à ce jour. Nous avons cherché à tirer profit du fait que nous disposons avec la base « Bovidig » d'un ensemble beaucoup plus important d'informations avec de nombreuses mesures de flux duodénaux permettant de se rapprocher des phénomènes digestifs intestinaux et de ne plus combiner deux critères (MOD et MOND) qui sont très corrélés entre eux. Plusieurs prédicteurs des teneurs en MA non digestibles (MAND) ont été testés, la prise en compte des teneurs en PIA et en MAMIC au duodénum permettant d'aboutir à un ajustement satisfaisant sur un nombre important d'observations :

$$\text{MAND} = 2,95 + 0,196 \text{ PIA} + 0,109 \text{ MAMIC}$$

(n = 588, ETR = 0,90) [48]

La prise en compte de la fraction NDFND fournit un apport significatif et un ETR un peu plus faible malgré la disparition d'une centaine de traitements :

$$\text{MAND} = 2,69 + 0,193 \text{ PIA} + 0,106 \text{ MAMIC} + 0,022 \text{ NDFND}$$

(n = 484, ETR = 0,83) [49]

et les coefficients des variables restent assez proches de ceux de l'équation précédente. L'intérêt de cette dernière régression est de permettre de prédire

les PANDI avec des variables calculables dans les processus normaux de calculs (MAND, MAMIC, et NDFND prédit à partir de la dMO) et des variables plus indépendantes que MOD et MOND utilisées auparavant :

$$\text{PANDI} = \text{MAND} - 2,69 - 0,106 \text{ MAMIC} - 0,022 \text{ NDFND} \text{ [50]}$$

Pour l'amidon, il est possible d'utiliser la régression intra-expérience proposée par Offiner et Sauvant (2004) pour calculer sa digestibilité dans l'intestin grêle (dAMig, %) à partir du flux d'amidon au duodénum (équations [14] ou [15]) :

$$\text{dAMig} = 74,05 - 0,122 \text{ AMduo} \quad (n = 51, n_{\text{exp}} = 18, \text{ETR} = 10,8) \text{ [51]}$$

Cette relation permet de prédire, à partir de l'équation [14], la quantité d'amidon digérée dans l'intestin grêle qui est le précurseur du glucose absorbé.

Pour les acides gras, une régression intra-expérience, issue d'une méta-analyse de la littérature (Schmidely *et al* 2008), peut être utilisée pour prédire, à partir de la teneur en acides gras du régime et de l'équation [36], les acides gras digérés dans l'intestin grêle (AGDig, g/kg MS) :

$$\text{AGDig} = 0,83 \text{ AGduo} - 0,0011 \text{ AGduo}^2 \quad (n = 61, n_{\text{exp}} = 16, \text{ETR} = 2,80) \text{ [52]}$$

8.2 / Dans le gros intestin

Il y a en général une perte d'N entre l'iléon et les fèces, elle est de l'ordre de 10 gMAT/kg MS. L'étude de cette perte montre qu'elle dépend principalement de l'importance du flux iléal d'entrée des MA dans le gros intestin. Le gros intestin capte l'azote des digesta à proportion d'environ moitié de son flux d'entrée. Ce flux d'absorption n'entre pas dans le calcul des PDI dans la mesure où il s'agit essentiellement de pertes d'NH₃ par absorption. Celles-ci vont rejoindre, après transformation par le foie principalement, le pool d'urée corporel pour être rejetées par l'urine ou bien recyclées.

Dans le but, à terme, de prédire les AGV et gaz produits dans la partie distale du tube digestif, il importe d'avoir aussi une estimation de la MO qui disparaît par fermentation dans cet organe. La base « Bovidig » contient 112 résultats de mesure de MO disparaissant dans le gros intestin. Cette fraction est assez faible (65,1 ± 33,6 g/kg MS) et représente en moyenne 10% de la MOD dans l'ensemble du tube digestif. Cette proportion est cohérente avec des suggestions de la littérature et pourra être à la base d'une prévision des AGV produits localement.

9 / Lois de passage à l'énergie métabolisable

La prévision de la teneur en Energie Brute (EB) des aliments reste identique aux propositions antérieures (Baumont *et al* 2007). En revanche, les lois de passage de l'EB à l'énergie métabolisable (EM = EB - Efèces - ECH₄ - Eurine) ont fait l'objet de quelques actualisations.

9.1 / Passage de la dMO à la dE

La teneur en énergie digestible (ED = EB - Efèces = EB × dE) des rations est la principale cause de variation de leur teneur en énergie nette. La prévision de la digestibilité de l'Energie (dE) se fait de façon précise à partir du moment où on connaît la dMO. Pour les fourrages les équations proposées en 2007 continuent à être appliquées (Baumont *et al* 2007). Pour les concentrés et co-produits, comme en 2007 (INRA 2007) il est proposé d'appliquer la régression générique de passage suivante pour calculer la dE à partir de la dMO (Sauvant *et al* 2002) :

$$\text{dE} = \text{dMO} - 3,94 + 0,0104 \text{ MAT} + 0,0149 \text{ MG} - 0,0022 \text{ NDF} - 0,0244 \text{ MM} \text{ [53]}$$

Cette équation, utilisée dans sa forme complète ou simplifiée selon les critères disponibles (Sauvant *et al* 2002) a été appliquée sans arrondi à l'unité aux valeurs de dMO avec NI = 2. Ces différentes équations de calcul de dE supposent que les interactions digestives qui modifient dMO affectent identiquement dE.

9.2 / L'énergie du méthane

Compte tenu du fait que la production de CH₄ est très liée aux phénomènes d'interactions digestives (Sauvant et Giger-Reverdin 2009), il est nécessaire d'utiliser des termes de prédiction qui soient mesurés assez précisément et les critères prédictifs des interactions déjà utilisés pour les autres aspects digestifs. Il a donc été décidé de travailler sur la production de CH₄ ramenée à la MOD (CH₄/MOD, en g CH₄/kg MOD), critère pivot des équations Systali et première cause de variation de la production de CH₄ par les substrats, et d'en modifier les valeurs en fonction de NI et PCO selon la relation suivante extraite de résultats de mesures calorimétriques dans la base « Rumener » (Sauvant *et al* 2011).

$$\text{CH}_4/\text{MOD} = 45,42 - 6,66 \text{ NI} + 0,75 \text{ NI}^2 + 19,65 \text{ PCO} - 35,0 \text{ PCO}^2 - 2,69 \text{ NI} \times \text{PCO} \quad (n = 450, n_{\text{exp}} = 158, \text{ETR} = 2,3) \text{ [54]}$$

La figure 17, issue de la publication de Sauvant *et al* (2011) présente les valeurs fournies par cette relation, la production de méthane étant plus faible pour les rations contenant beaucoup de concentré et ingérées en grande quantité. Par ailleurs les interactions entre NI et PCO y apparaissent nettement sur les formes des courbes d'iso-production de CH₄/MOD. La production d'énergie sous forme de CH₄ (ECH₄, en kcal/kg MS) est alors calculée de la façon suivante :

$$\text{ECH}_4 = 12,5 \times \text{MOD} \times \text{CH}_4/\text{MOD} \text{ [55]}$$

et

$$\text{ECH}_4\% \text{EB} = 100 \times \text{ECH}_4/\text{EB} \text{ [56]}$$

Pour calculer les valeurs énergétiques des tables des aliments, on prend N_{ref}

Figure 17. Effets combinés de la proportion de concentré dans la ration et du niveau d'ingestion de MS sur la production de CH₄ en g/kg MOD.

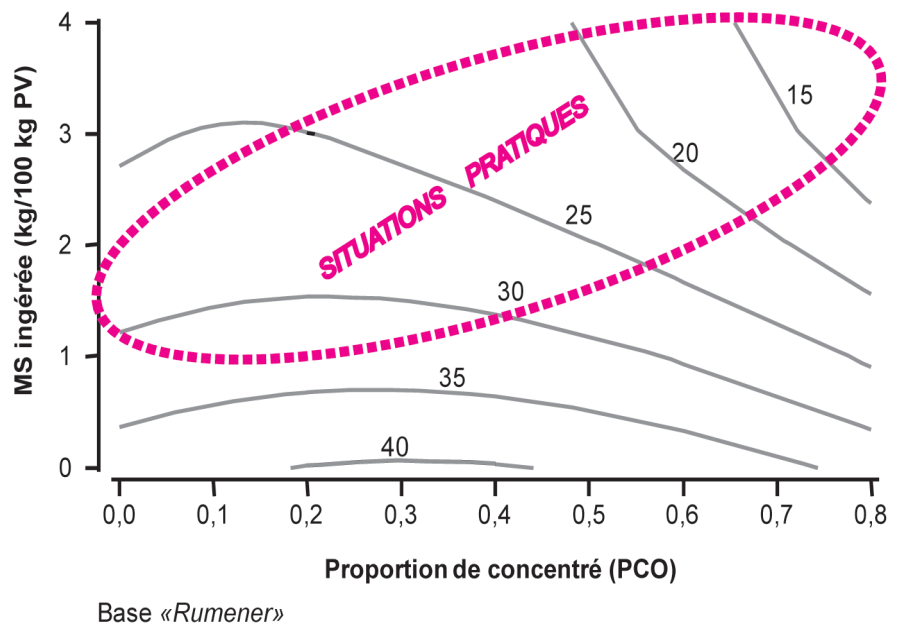
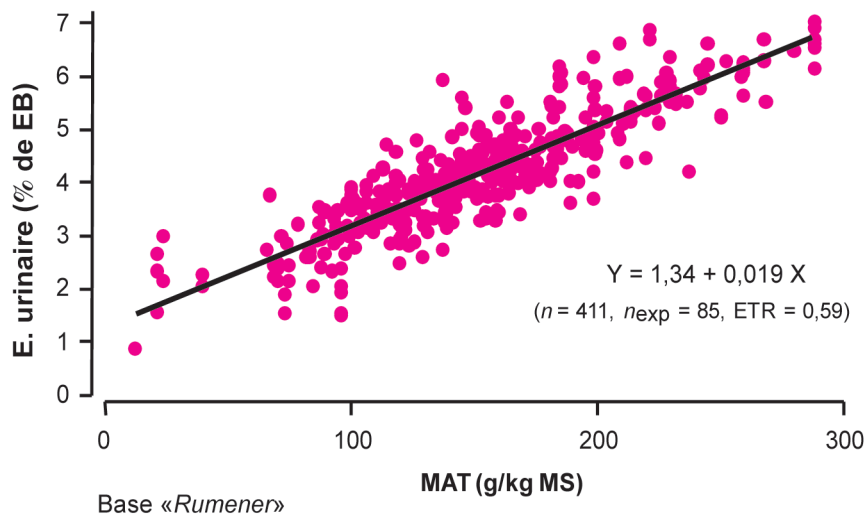


Figure 18. Relation intra-expérience entre la teneur en MAT de la ration et l'énergie urinaire exprimée en pourcent de l'énergie brute.



et PCO = 0 pour les fourrages et NI = 2 et PCO = 0 pour les concentrés et co-produits. Pour les valeurs dans une ration, cette même équation [54] est appliquée pour prédire les modifications en fonction des valeurs de NI et PCO de la ration.

9.3 / L'énergie urinaire

Dans la base « Rumener », en sélectionnant les essais où la teneur en MAT était le facteur étudié, il apparaît que le rapport EU%EB est très dépendant de la teneur en MAT des régimes (figure 18). Cependant, au-delà de cet effet majeur de MAT, les critères NI et PCO présentent également une influence :

$$\text{EU\% EB} = 2,9 + 0,017 \text{ MAT} - 0,47 \text{ NI} - 1,64 \text{ PCO}$$

($n = 337$, $n_{\text{exp}} = 109$, $\text{ETR} = 0,56$) [57]

Pour les calculs des valeurs des tables, on applique cette équation en prenant le NI_{ref}, la teneur en MAT de l'aliment, et PCO = 0. Pour le calcul des valeurs dans la ration, cette même équation est appliquée avec les valeurs NI et PCO de la ration.

9.4 / Bilan comparatif des corrections des flux d'énergie par NI et PCO

Le calcul de la teneur en EM se fait donc en appliquant à l'EB des aliments et des rations l'équation [53] pour le calcul de l'ED et en retranchant les termes calculés par les équations [54 à 56] et [57]. Les corrections appliquées mettent en œuvre NI et PCO qui sont déjà impliqués dans le calcul des interactions digestives sur la dMO. Elles font aussi intervenir les MAT qui sont positivement liées à BalProRu. Du fait de ces

nouvelles relations, les interactions digestives appliquées à la dMO voient leur effet relatif légèrement atténué au niveau du calcul de l'EM. Le passage de l'ED à l'EM utilisait antérieurement une équation de prédiction intégrée du rapport EM/ED fonction des teneurs en MAT et en cellulose brute, et du niveau alimentaire (INRA 1978). Les deux approches ont été comparées sur des mêmes ensembles de données. Les nouveaux calculs aboutissent à soustraire à l'ED une quantité d'énergie un peu plus faible pour aboutir à l'EM dès que ED-EM > 400 kcal/kg MS (ce qui est le cas de la grande majorité des aliments), l'écart étant d'autant plus important qu'on a à faire à des aliments de bonne valeur énergétique. En conséquence, les valeurs UF Systali des concentrés et des co-produits sont un peu plus élevées que les valeurs tables 2007 (de 1 à 5%) quand UFL > 0,83, et un peu plus faibles quand UFL < 0,83.

Conclusion

Cet article a permis de présenter et de justifier les principales équations digestives retenues pour réviser les systèmes PDI et UF des animaux ruminants. Tous les aspects quantitatifs connus de la digestion de l'énergie et des protéines ont ainsi été revisités en cette occasion et n'ont été retenues que les équations les plus probantes, dont la plupart s'appuient sur plusieurs centaines de traitements ce qui est bien plus important que dans les approches précédentes réalisées pour les systèmes français ou étrangers.

Il est actuellement possible de prédire avec une précision satisfaisante les varia-

tions des taux de transit des particules et des liquides. Ces nouvelles données ont été mises à profit pour mieux adapter les équations de prévision de la dégradabilité dans le rumen des fractions protéiques et amylacées des aliments. On utilise donc désormais des équations simples et plus précises pour prédire la digestion dans le rumen de ces deux éléments ; elles vont permettre de tirer profit des nombreuses données de dégradation *in sacco* publiées dans la littérature.

La question des interactions digestives a été complètement revue et on peut maintenant disposer d'un ensemble d'équations précises qui permettent de tenir compte des influences des trois principaux facteurs d'interaction : le niveau d'ingestion, la proportion de concentré et la balance protéique du rumen. La MOF a également été largement revisitée avec une proposition de calcul plus élaborée, mais dont le résultat se rapproche plus d'une MOF vraie, maillon indispensable pour prédire plus précisément les productions de protéines microbiennes, d'AGV et de gaz dans le rumen.

Il a été montré que la production de protéines microbiennes n'est pas directement proportionnelle à la MOF, comme on l'avait jusqu'alors supposé, et que d'autres facteurs pouvaient en expliquer les variations. Différentes équations, de précision comparable, ont été obtenues. Il est proposé d'appliquer de préférence celle qui utilise les critères BalProRu et PCO déjà utilisés plusieurs fois dans les différents calculs.

Toutes ces relations ont été essentiellement construites avec des données obtenues chez des bovins, un travail de validation avec des données obtenues chez les petits ruminants est en cours (Nozière *et al* 2013).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les trois relecteurs anonymes de ce texte ainsi que R. Baumont, rédacteur en chef de la revue. Ils remercient également J.B. Coulon qui a été l'initiateur du projet Systali pour le Département Phase de l'INRA, J.L. Peyraud, co-animateur du projet, ainsi que la quinzaine de collègues des unités INRA impliqués dans le projet (UMR Herbivores [Theix], UMR Mosar [Paris], UMR Pégase [Rennes], UMR Selmet [Montpellier], UR Zootechnie [Petit-Bourg, Guadeloupe]) qui ont eu l'occasion de discuter avec nous des différents aspects abordés dans ce texte.

Références

- Agabriel J., Pomiès D., Nozières M.O., Faverdin P., 2007. Principes de rationnement des ruminants. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeur des aliments - Tables INRA 2007, mise à jour 2010. Editions Quae, Versailles, France, 9-22.
- Andrieu J., Demarquilly C., Sauvant D., 1988. Tables de la valeur nutritive des aliments. In Alimentation des bovins, ovins et caprins. Jarrige R. (Ed). INRA, Paris, France, 351-464.
- Archimède H., Sauvant D., Schmidely P., 1997. Quantitative review of ruminal and total tract digestion of mixed diet organic matter and carbohydrates. *Reprod. Nutr. Dev.* 37, 173-189.
- Assoumaya C., Sauvant D., Archimède H., 2007. Etude comparative de l'ingestion et de la digestion des fourrages tropicaux et tempérés. *INRA Prod. Anim.*, 20, 383-392.
- Baumont R., Champciaux P., Agabriel J., Andrieu J., Aufrère J., Michalet-Doreau B., Demarquilly C., 1999. Une démarche intégrée pour prévoir la valeur des aliments pour les ruminants : PrévAlim pour INRA. *INRA Prod. Anim.*, 12, 183-194.
- Baumont R., Dulphy J.P., Sauvant D., Meschy F., Aufrère J., Peyraud J.L., 2007. Valeur alimentaire des fourrages et des matières premières : tables et prévision. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeur des aliments - Tables INRA 2007, mise à jour 2010. Editions Quae, Versailles, France, 153-290.
- Chapoutot P., Nozière P., Sauvant D., 2013. "Systool", a new calculator for the new French "Systali" project. In: Book of abstracts No 19. 64th Ann. Meet. Eur. Fed. Anim. Sci., Nantes, France, 138.
- Demarquilly C., Weiss P., 1970. Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages. INRA Editions, Versailles, France, 64p.
- Demeyer D., Van Nevel C., 1986. Influence of substrate and microbial interactions on efficiency of microbial growth. *Reprod. Nutr. Dev.* 26, 161-179.
- Glasser F., Doreau M., Maxin G., Baumont R., 2013. Fat and fatty acid content and composition of forages: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 185, 19-34.
- Huhtanen P., Rinne M., Nousiainen J., 2009. A meta-analysis of feed digestion in dairy cows. 2. The effects of feeding level and diet composition on digestibility. *J. Dairy Sci.* 92, 5031-5042.
- Henneberg W., Stohmann F. 1860. Beitrage zur Begründung einer rationellen Fütterung der Wiederkauer. Vol. 1. F.U. Schwetschke and Sohn. M. Bruhn, Braunschweig.
- INRA, 1978. Principes de la nutrition et de l'alimentation des ruminants - Besoins des animaux - Valeur nutritive des aliments. Jarrige R. (Ed). INRA Publications, Versailles, France, 597p.
- INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Jarrige R. (Ed). INRA, Paris, France, 476p.
- INRA, 1989. Ruminant Nutrition - Recommended allowances and feed tables. Jarrige R. (Ed). INRA, John Libbey Eurotext, Paris-London-Rome, 389p.
- INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux - Valeur des aliments - Tables INRA 2007, mise à jour 2010. Editions Quae, Versailles, France, 311p.
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Sauvant D., Perez J.M., Tran G. (Coord.). INRA Editions, Paris, France, 301p.
- Leroy A.M., 1926. Historique des travaux sur l'alimentation du bétail bovin publiés en France, p 1-27. In : Alimentation du bétail bovin et le contrôle laitier ; texte du congrès du même nom. Ed. Roland, 785p.
- Leroy A.M., Sentex J., Delage J., 1950. Equivalents fourragers, Ed. R. Roux., 20-80.
- Maxin G., Glasser F., Doreau M., Baumont R., 2013. PrévAlim : prévision de la teneur en matières grasses et de la composition en acides gras des fourrages. *Renc. Rech. Rum.*, 20, sous presse.
- Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P., 1987. Méthodologie de mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'azote des aliments dans le rumen. *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 69, 5-7.
- Nousiainen J., Rinne M., Huhtanen P., 2009. A meta-analysis of feed digestion in dairy cows. 1. The effects of forage and concentrate factors on total diet digestibility. *J. Dairy Sci.*, 92, 5019-1930.
- Nozière P., Besle J.M., Martin C., Michalet-Doreau B., 1996. Effect of barley supplement on microbial fibrolytic enzyme activities and cell wall degradation rate in the rumen. *J. Sci. Food Agric.*, 72, 235-242.
- Nozière P., Giger-Reverdin S., Chapoutot P., Sauvant D., 2013. Quantification des interactions digestives chez les petits ruminants, résultats préliminaires. *Renc. Rech. Rum.*, 20, sous presse.
- Nozières M.O., Dulphy J.P., Peyraud J.L., Poncet C., Baumont R., 2007. La valeur azotée des fourrages. Nouvelles estimations de la dégradabilité des protéines dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle : conséquences sur les valeurs PDI. In : Alimentation des ruminants. Agabriel J. (Ed). Dossier, INRA Prod. Anim., 20, 109-118.
- NRC, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. Seventh Revised Edition. National Academy Press, Washington, DC, USA, 381p.
- Offner A., Sauvant D., 2004. Prediction of *in vivo* starch digestion in cattle from *in situ* data. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 111, 41-56.
- Owens F.N., Goetsch A.L., 1986. Digesta passage and microbial protein synthesis. In: Control of digestion and metabolism in Ruminants. Milligan L.P., Grovum W.L., Dobson A. (Eds). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 196-223.
- Sauvant D., 1999. Le concept de lois de réponses multiples aux régimes, trait d'union entre les domaines techniques et économiques de l'élevage. *Renc. Rech. Rum.*, 6, 11-17.
- Sauvant D., Giger-Reverdin S., 2009. Modélisation des interactions digestives et de la production de méthane chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 22, 375-384.
- Sauvant D., Mertens D., 2009. Use of meta-analysis to build a mechanistic model of responses of ruminal digestion to dietary fibre in cattle. *Can. J. Anim. Sci.*, 730.
- Sauvant D., Peyraud J.L., 2010. Calculs de ration et évaluation du risque d'acidose. *INRA Prod. Anim.*, 23, 333-342.
- Sauvant D., Nozière P., 2012. Modèle intégrant du tube digestif intégrant les interactions digestives, les flux de nutriments d'intérêt et compatible avec les systèmes UF et PDI. *Renc. Rech. Rum.*, 19, 181-184.
- Sauvant D., Chapoutot P., Peyraud J.L., Meschy F., Doreau B., 2002. Valeurs nutritives pour les ruminants. In : Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Sauvant D., Perez J.M., Tran G. (Coord.). INRA Editions, Paris, France, 43-50.
- Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., 2005. Les Méta-analyses des données expérimentales: applications en nutrition animale. *INRA Prod. Anim.*, 18, 63-73.
- Sauvant D., Assoumaya C., Giger-Reverdin S., Archimède H., 2006. Comparative study of ways of expressing the feeding level in ruminants. *Renc. Rech. Rum.*, 13, 103.
- Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., St-Pierre N.R., 2008. Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. *Animal*, 2, 1203-1214.
- Sauvant D., Giger-Reverdin S., Serment A., Broudiscou L., 2011. Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants In : Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane. Doreau M., Baumont R., Perez J.M. (Eds). Dossier, INRA Prod. Anim., 24, 433-446.
- Schmidely P., Glasser F., Doreau M., Sauvant D., 2008. Digestion of fatty acids in ruminants: a meta-analysis of flows and variation factors. 1. Total fatty acids. *Animal*, 2, 677-690.
- Sniffen C.J., O'Connor J.D., Van Soest P.J., Fox D.G., Russel J.B., 1992. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *J. Anim. Sci.*, 70, 3562-3577.
- Tamminga S., Van Straalen W.M., Subnel A.P.J., Meijer R.G.M., Steg A., Wever C.J.G., Blok M.C., 1994. The Dutch protein evaluation system: the DVE/OEB-system. *Livest. Prod. Sci.*, 40, 139-155.
- van Duinkerken G., Blok M.C., Bannink A., Cone J.W., Dijkstra J., van Vuuren A.M., Tamminga S., 2011. Update of the Dutch protein evaluation system for ruminants: the DVE/OEB₂₀₁₀ system. *J. Agric. Sci.*, 149, 351-367.
- Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Révision du système des Protéines Digestibles dans l'Intestin (PDI). *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 70, 19-34.
- Vermorel M., Coulon J.B., 1998. Comparison of the National Research Council energy system for lactating cows with four European systems. *J. Dairy Sci.*, 81, 846-855.
- Vermorel M., Coulon J.B., Journet M., 1987. Révision du système des unités fourragères (UF). *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 70, 9-18.
- Volden H., 2011. NorFor - The Nordic feed evaluation system. EAAP Publications No 130, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 180p.
- Weiss W.P., 1998. Estimating the available energy content of feeds for dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 81, 830-839.

Résumé

L'évolution des systèmes d'unités d'alimentation des ruminants vers des systèmes de lois de réponses multiples nécessite d'actualiser le calcul des apports nutritifs à l'animal, afin de le rendre plus précis sur les unités agrégées (UF et PDI) et plus évolutif (prédiction des nutriments absorbés). Cette actualisation est basée sur la construction et l'interprétation par méta-analyse, de larges bases de données sur la digestion et la nutrition des ruminants. Les différentes équations utilisées pour le calcul des apports UF et PDI ont ainsi été mises à jour, ce qui permet en particulier : *i*) de prévoir le transit des particules et des liquides en fonction du niveau d'ingestion et de la proportion de concentré, et de prendre en compte les variations de transit dans le calcul des dégradations des protéines et de l'amidon dans le rumen, estimées à partir des données issues de mesures *in situ*; *ii*) de prendre en compte les effets des principaux facteurs d'interactions digestives (niveau d'ingestion, proportion de concentré, balance protéique du rumen) sur la digestibilité de la matière organique, les pertes d'énergie sous forme de méthane et sous forme d'urine ; *iii*) de calculer plus précisément l'énergie disponible dans le rumen et son efficacité d'utilisation pour la synthèse de protéines microbiennes. Ce modèle rénové de la digestion chez les ruminants conduit à considérer que les valeurs UF et PDI des aliments varient en fonction de la ration dans laquelle ils sont incorporés, les valeurs des tables étant indicatives. Il est ainsi possible de prédire plus précisément les apports sur une plus large gamme de régimes, et en particulier de mieux traiter des interactions entre les apports en énergie et en protéines.

Abstract

The quantification of the main digestive processes in ruminants: the equations involved in the renewed energy and protein feed evaluation systems

The evolution of feeding systems for ruminants towards multiple animal response systems requires the updating of the calculation of nutrient supply to the animals to make it more accurate on aggregated units (UF and PDI) and to allow prediction of absorbed nutrients. This updating is based on the building and interpretation through meta-analysis of large databases of digestion and nutrition of ruminants. Different equations involved in the calculation of UF and PDI have been updated, allowing the following: 1) predicting the passage rate of particles and liquid depending on the level of intake and the proportion of concentrate, and taking it into account in order to calculate the ruminal digestion of protein and starch from *in situ* data; 2) taking into account the effects of the main factors of digestive interactions (level of intake, proportion of concentrate, rumen protein balance) on organic matter digestibility, energy losses in methane and urine; 3) calculating in a more accurate way the energy available in the rumen and the efficiency of its use for microbial protein synthesis. This renewed model leads to the conclusion that UF and PDI values of feed vary depending on the diet, the feed table values being only indicative. It is thus possible to predict the nutrient supply on a wider range of diets more accurately and in particular to better address energy x protein interactions.

SAUVANT D., NOZIÈRE P., 2013. La quantification des principaux phénomènes digestifs chez les ruminants : les relations utilisées pour rénover les systèmes d'unités d'alimentation énergétique et protéique. INRA Prod. Anim., 26, 4, 327-346.

GLOSSAIRE

Sigle	Unité	Définition
aAM	%	fraction soluble de l'amidon
AG	g/kg MS	acides gras
AGDig	g/kg MS	acides gras digestibles dans l'intestin grêle
AGDint	g/kg MS	acides gras digestibles dans les intestins
AGduo	g/kg MS	acides gras au duodénum
AM	g/kg MS	amidon
AMDint	g/kg MS	amidon digestible dans les intestins
AMDru	g/kg MS	amidon digestible dans le rumen
AMduo	g/kg MS	amidon au duodénum
aN	%	fraction soluble de l'N
BalProRu	g/kg MS	balance protéique du rumen
bAM	%	fraction insoluble et dégradable de l'amidon
bN	%	fraction insoluble et dégradable de l'N
cAM	%/h	taux fractionnaire de dégradation de bAM
CH4/MOD	g/kg	CH4 en g/kgMOD
cN	%/h	taux fractionnaire de dégradation de bN
dAMig	%	digestibilité de l'amidon dans l'intestin grêle
dAMru	%	digestibilité de l'amidon dans le rumen
dE	%	digestibilité de l'énergie
dMO	%	digestibilité de la MO (expression générique)
dMOc	%	dMO table des concentrés
dMOcal	%	dMO de la ration calculée par additivité des valeurs tables 2007
dMOf	%	dMO table des fourrages
dMOmes	%	dMO de la ration mesurée
dMOration	%	dMO de la ration calculée corrigée des interactions
dMOf	%	dMO de la ration calculée par additivité des valeurs tables
DTAM	%	dégradabilité théorique de l'amidon (expression générique)
DTAM6	%	DTAM calculée avec kpt = 6%/h
DTAMrat	%	DTAM dans la ration
DTN	%	dégradabilité théorique de l'N (expression générique)
DTN6	%	DTN calculée avec kpt = 6%/h
DTNCrat	%	DTN dans la ration des concentrés
DTNFrat	%	DTN dans la ration des fourrages
ECH4	kcal/kg MS	teneur en énergie du CH4
ECH4%EB	kcal/100 kcal	% de l'énergie brute perdue sous forme de CH4
EU%EB	kcal/100 kcal	% de l'énergie brute perdue sous forme d'urine
FDUOi	g/kg MS	flux duodéal du constituant i
FFECi	g/kg MS	flux fécal du constituant i
FractDint	g/kg MS	fraction digestible dans les intestins (s'applique à PDIA, AMDint, NDFDint et AGDint)
kct	%/h	taux de transit des particules des concentrés dans le rumen
kft	%/h	taux de transit des particules des fourrages dans le rumen
klt	%/h	taux de transit des liquides dans le rumen
kpt	%/h	taux de transit des particules dans le rumen
MAAEduo	g/kg MS	matières azotées alimentaires + endogènes au duodénum
MAduo	g/kg MS	matières azotées au duodénum
MAendo	g/kg MS	matières azotées endogènes au duodénum
MAF	g/kg MS	matières azotées fermentescibles dans le rumen

MAMIC	g/kg MS	matières azotées microbiennes au duodénum
MAND	g/kg MS	matières azotées non digestibles
MAnonMIC	g/kg MS	matières azotées non microbiennes au duodénum
MAT	g/kg MS	matières azotées totales N×6.25
MG, ou EE	g/kg MS	matières grasses, ou extrait éthéré
MM	g/kg MS	matières minérales
MO	g/kg MS	matière organique
MOD	g/kg MS	MO digestible (expression générique)
MODc	g/kg MS	MO digestible calculée corrigée des interactions
MODint	g/kg MS	MO digestible dans les intestins
MODmes	g/kg MS	MO digestible mesurée
MOF	g/kg MS	MO fermentescible (expression générique)
MOF ₁₉₈₈	g/kg MS	MO fermentescible selon INRA 1988
MOFres	g/kg MS	MO résiduelle
MORDRmes	g/kg MS	MO réellement dégradée dans le rumen mesuré
MSI%PV, ou NI	kg MSI/100 kg PV	niveau d'ingestion de MS
NDF	g/kg MS	fibres insolubles dans le détergent neutre
NDFDint	g/kg MS	NDF digestible dans les intestins
NDFDru	g/kg MS	NDF digestible dans le rumen
NDFduo	g/kg MS	NDF au duodénum
NDFND	g/kg MS	NDF non digestible
NI, ou MSI%PV	kg MSI/100 kg PV	niveau d'ingestion de MS
NIref	kg MSI/100 kg PV	NI de référence de l'aliment dans les tables
NNH ₃ absorbé	g/kg MS	N ammoniacal absorbé dans le rumen
Nurée recyclé	g/kg MS	N uréique recyclé dans le rumen
PANDI	g/kg MS	protéines alimentaires non digestibles dans l'intestin
PCO	0<PCO<1	proportion de concentré
PCOo	0<PCOo<1	proportion de la MO de la ration provenant des concentrés
PDIA	g/kg MS	protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire
PDIE	g/kg MS	protéines digestibles dans l'intestin quand l'énergie limite la synthèse microbienne
PDIN	g/kg MS	protéines digestibles dans l'intestin quand N fermentescible limite la synthèse microbienne
PF	g/kg MS	produits des fermentations des ensilages
PFOo	0<PFOo<1	proportion de MO de la ration provenant des fourrages
PIA	g/kg MS	protéines alimentaires entrant dans l'intestin
PIME	g/kg MS	protéines microbiennes entrant dans l'intestin quand l'énergie est limitante
PIMN	g/kg MS	protéines microbiennes entrant dans l'intestin quand N fermentescible est limitant
Rmic	g PDI/UF	équilibre azote/énergie dans le rumen
UF	UF/kg MS	unité fourragère
ΔdMO	%	interaction digestive sur la dMO à retrancher à dMO table
ΔdMOalproru	%	interaction digestive sur la dMO liée à BalProRu
ΔdMOco	%	interaction digestive sur la dMO liée à PCO
ΔdMOni	%	interaction digestive sur la dMO liée à NI