

Rénovation des unités alimentaires des ruminants: les principales relations utilisées pour le calcul des apports alimentaires.

SAUVANT D. (1), NOZIERE P. (2)

(1) INRA-AgroParisTech, UMR MoSAR, 16 rue C.Bernard, 75231 Paris Cedex 05

(2) INRA-VetAgroSup, UMR1213 Herbivores, Theix, 63122 St Genès Champanelle

RESUME

L'actualisation de l'estimation de la valeur nutritive des aliments et des rations nécessite de pouvoir intégrer les résultats les plus récents de la recherche. Pour cela des bases de données sur la digestion et la nutrition des différents types d'animaux ont été construites. Ces bases ont été codées puis traitées par des méta-analyses qui ont permis d'obtenir de nombreuses équations empiriques quantifiant les réponses digestives des animaux aux variations des régimes et des pratiques alimentaires.

L'ensemble des équations a été intégré dans un modèle mécaniste de la digestion (Sauvant et Nozière, 2012). Une partie des équations ainsi obtenues ont été utilisées pour actualiser les systèmes d'unités d'énergie (UFL) et de protéines (PDI). Ces équations concernent en particulier 1) la prévision du transit des particules et des liquides en fonction du niveau d'ingestion (NI) de MSI%PV et de la proportion de concentré ($0 < \text{PCO} < 1$) 2) la prise en compte de ces transits dans le calcul de la digestion ruminale des protéines et amidon des aliments dans le rumen à partir des données de dégradation *in sacco* 3) la prise en compte des interactions digestives liées aux variations de NI, de PCO et de la balance protéique du rumen (BalProRu) 4) le calcul de la matière organique fermentée dans le rumen (MOF) en cherchant à obtenir une MOF vraie 5) la prévision du flux de protéines microbiennes au duodénum.

La prise en compte de l'ensemble de ces équations amène à fournir des tables « indicatives » des valeurs UF et PDI des aliments. Selon les régimes, ces valeurs peuvent changer en fonction de NI, PCO, et BalProRu du régime. Dans les tables, pour les aliments concentrés et co-produits, le NI de référence est fixé à 2; par contre, pour les fourrages, le NI de référence est celui de la mesure de la dMO des tables, qui correspond donc à son ingestibilité sur moutons. Pour ces deux types d'aliments le calcul des valeurs tables supposent que PCO = 0 et BalProRu est ignoré, ces 2 facteurs ne sont intégrés qu'au stade du calcul de la valeur de la ration.

Ce travail permet de prendre en compte les connaissances récentes sur les principaux phénomènes digestifs quantitatifs chez les ruminants, et de les intégrer dans des systèmes UF et PDI renouvelés, tout en conservant l'ossature classique de ces systèmes. 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 énergie x protéines, et donc de mieux prédire les apports et les réponses aux régimes.

Updating feed unit systems: major equations applied to calculate feeding supplies

SAUVANT D. (1), NOZIERE P.

(1) INRA-AgroParisTech, UMR MoSAR, 16 rue C.Bernard, 75231 Paris Cedex 05, France

SUMMARY

Updating feed unit systems and diet evaluation requires integrating the most recent research results. To do this, databases were built on digestion and nutrition of different types of animals. These databases were coded and treated by meta-analyses providing numerous empirical equations quantifying the digestive responses of animals to changes in diets and feeding practices.

The set of equations extracted from the data bases has been integrated into a mechanistic model of digestion (Sauvant and Nozière, 2012). A part of these equations were used to update the systems of units of energy (UFL) and protein (PDI). These equations relate in particular to the following: 1) the prediction of particle and liquid transit depending on the level of DM intake%LW (FI) and the proportion of concentrate ($0 < \text{PCO} < 1$) 2) taking into account these transits in the calculation of ruminal digestion of protein and starch feeds from the *in sacco* degradation data 3) taking into account changes in the three parameters involved in digestive interactions: FI, PCO and rumen protein balance (RPB) 4) calculation of the fermented organic matter in the rumen (FOM) by approaching a true FOM 5) providing the flow of microbial protein to the duodenum.

Considering all these equations provides "indicative" UF and PDI values in feed tables; these values may change depending on FI, PCO and RPB in the diet. In the tables for feed concentrates and by-products, the FI is set to 2. In contrast, for fodders, the FI values are those obtained at the time of measurement of the OMD, which corresponds to its ingestibility by sheep. For these two types of feeds, table values assume that PCO = 0 and RPB is ignored; these two factors are included later in the calculation of the value of the final diet.

This work allows taking into account the latest knowledge on the main digestive quantitative phenomena in ruminants, and integrating them into renewed UF and PDI units, while retaining the initial structure of these systems. It is now possible to more accurately predict nutrient supplies on a wider range of feeding systems, in particular to better address energy x protein interactions, and therefore better predict the dietary supplies.

INTRODUCTION

Les systèmes d'unités alimentaires constituent un facteur essentiel du progrès en matière d'alimentation des animaux. Ils doivent être capables d'évoluer vers plus de précision et d'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 pour aider les éleveurs dans leurs prises de décision : transformer efficacement les ressources, minimiser les rejets de certains éléments susceptibles d'altérer le milieu (N, P, CH₄...), fournir des produits dont la composition s'adapte à la demande, respecter la santé et le bien-être des animaux, etc... En conséquence, un nouveau concept a été développé, il s'agit de la prévision des réponses multiples des animaux aux variations des régimes et des pratiques alimentaires (Sauvant, 1999). Cette évolution interpelle les systèmes d'unités alimentaires qui étaient essentiellement conçus jusqu'alors pour permettre l'expression du potentiel génétique des animaux. Ils doivent donc être désormais capables non seulement de s'assurer que les besoins sont globalement satisfaits, mais également de prévoir les principales réponses aux variations plausibles des caractéristiques des régimes et aux pratiques alimentaires mises en œuvre.

Un tel objectif passe par une large révision des prédicteurs et indicateurs de la digestion quantitative des aliments, et de l'utilisation des nutriments, objectifs du projet Systali de rénovation des unités alimentaires des ruminants. Ce projet a déjà été en partie présenté dans des communications 3R antérieures (Sauvant et Nozière, 2011 et 2012). Ce texte a pour but de présenter les principales équations utilisées pour prédire les apports nutritifs énergétiques et protéiques. Un texte plus détaillé sur ce sujet a été rédigé pour la revue INRA-Productions Animales (Sauvant et Nozière, 2013). Le lecteur désireux de connaître plus de détails peut le consulter.

1. METHODES

La démarche est articulée en étapes successives dont la première consiste à revisiter les principaux mécanismes de la digestion pris en compte et à les actualiser tout en cherchant à mieux les quantifier grâce à la prise en compte de davantage de données et à de nouvelles régressions à la fois plus précises et représentatives des variations liées aux pratiques alimentaires observées. Les équations citées dans ce texte ne concernent que la prévision des valeurs énergétiques (UF) et protéiques (PDI) des aliments et des rations sans prendre en compte les autres équations obtenues sur différentes réponses biologiques (Sauvant et Nozière, 2012). Les étapes suivantes, concernant l'évaluation des besoins et des réponses ainsi que la mise en œuvre des nouveaux systèmes pour les principales espèces, ne sont pas abordées dans cet article.

Pour établir ces nouvelles relations, la démarche a consisté à rassembler des bases de données expérimentales à partir de publications de la bibliographie ou de résultats obtenus dans des laboratoires de l'INRA. Les principales bases utilisées ont été, d'une part, 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., UMRH-Theix) et, d'autre part, une base de mesures calorimétriques sur différents types de ruminants (« Rumener », 188 pub., 273 exp. et 1193 trt., UMR MoSAR). D'autre part, 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 considérées dans cette base, toutes les rations ont été recalculées à l'aide du système 2007 des unités d'alimentation PDI et UF.

Ces bases ont été attentivement codées par facteur expérimental, puis elles ont été traitées statistiquement par méta-analyses selon les recommandations de Sauvant et al. (2006 et 2008), notamment pour séparer les variations intra- et inter-expériences, sachant que les variations intra-expériences sont privilégiées pour obtenir des réponses digestives génériques aux pratiques alimentaires. Pour chaque relation intra-expérience, les nombre d'expériences et de traitements pris en compte sont indiqués, ainsi que l'écart-type résiduel attaché à la régression. Les nombreuses équations empiriques ainsi produites à partir d'ensembles divers de données (publications et expériences différentes, types d'animaux différents, nombres de traitements différents...) n'ont 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 et à en explorer les réponses aux variations de composition des rations ingérées (Sauvant et Nozière, 2012). D'autre part, pour pouvoir évaluer les apports, les besoins et les réponses des animaux à travers de nombreuses rations expérimentales, il a été nécessaire de construire un outil de calcul des rations, appelé « SysTool » (Chapoutot et al., 2013a). Enfin, de manière à pouvoir simuler de grands nombres de régimes en testant la sensibilité de l'ensemble en fonction des différents paramètres sous-jacents, un outil de simulation, appelé « Sirar » a été développé (Delagarde et Buonocore, non publié). L'intégration de ces équations et leur évaluation à l'aide de ces outils ne seront pas présentées ici.

Dans cet article, les principaux aspects abordés concernent 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 d'excrétion d'énergie liés à la digestion.

2. PRINCIPALES EQUATIONS

2.1. LE TRANSIT DES ALIMENTS DANS LE TUBE DIGESTIF

Chez les ruminants, le transit joue un rôle déterminant vis-à-vis de la digestion car il détermine la partition des substrats entre la digestion microbienne dans le rumen et le passage des substrats non digérés dans la suite du tube digestif. Dans la version précédente du système PDI, le taux de transit de toutes les particules était fixé à 6%/heure quel que soit l'aliment considéré, en outre le taux de passage des liquides était ignoré. Enfin, les fractions solubles étaient supposées être immédiatement dégradées à 100% par les microorganismes du rumen.

Pour établir des équations de prévision des taux de transits (%/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 les transits avaient été mesurés à l'aide de marqueurs adaptés. Les critères prédictifs significatifs des transits ont été le niveau d'ingestion de matière sèche (NI exprimé en MSI%Poids Vif) et la proportion de concentré dans la ration ($0 < \text{PCO} < 1$). Celle-ci a été définie dans les rations comme étant la proportion des aliments « autres que le fourrage », en cohérence avec nos définitions (INRA-AFZ, 2004 et INRA, 2007).

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

(n=236, nexp=95, ETR=0,41) [1]

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

(n=115, nexp=46, ETR=0,51) [2]

Pour les particules d'une ration (kpt) les critères kft et kct sont combinés à proportion du concentré (PCO) et du fourrage (1-PCO) dans la ration selon la relation :

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

Pour la phase liquide l'équation calculée est :

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

(n=582, nexp=236, ETR=0,87) [4]

D'après ces équations, kpt reste presque toujours inférieur à la valeur précédente de 6%/h, ce qui indique que le transit des particules est le plus souvent nettement plus lent que ce qui était supposé jusqu'à présent. Pour calculer les valeurs de la dégradation ruminale des aliments dans les tables on attribue désormais à chaque aliment un NI de référence (NIref). Pour les fourrages, le NI retenu est celui de la mesure de digestibilité et ingestibilité sur moutons standard, appelé niveau de référence (NIref). La PCO est égale à 0. Ces résultats d'ingestibilité et digestibilité des fourrages ont été obtenus à l'INRA et publiés et actualisés depuis plusieurs décennies (INRA, 2007). Pour les concentrés et co-produits, on considère que NIref = 2 et que PCO = 0, soit kct = 4,97 et klt = 9,71%/h. Ces hypothèses de calcul avec PCO = 0 impliquent que l'effet de PCO n'est pris en compte qu'au niveau des calculs des rations. Ces principes montrent que les aliments ne présentent pas une valeur nutritive fixe mais que celle-ci varie notamment en fonction des valeurs de NI et PCO de la ration dans laquelle ils se trouvent. Ce principe, déjà appliqué dans d'autres systèmes d'unités alimentaires à l'étranger (Volden et al., 2010), fait que les valeurs des tables alimentaires ne sont qu'indicatives.

2.2 LA DIGESTION DES PROTEINES ET DE L'AMIDON DANS LE RUMEN

2.2.1 La digestion des protéines

Le principe expérimental appliqué pour prédire la digestion de l'azote est le même que précédemment (INRA, 1978, 1988 et 2007). Les aliments sont mis à incuber au sein de sachets de nylon (*in sacco*) placés dans le milieu ruminal et retirés après différents temps (Michalet-Doreau et al., 1987), ce qui permet de déterminer une dégradabilité théorique (DTN, %) à partir, d'une part, de la cinétique de dégradation et, d'autre part, des taux de transit des particules et des liquides. Le modèle d'ajustement est désormais le suivant :

$$\text{DTN} = \text{aN} [100 / (100 + \text{klt})] + \text{bN} [\text{cN} / (\text{cN} + \text{kpt})]$$
 [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 avec le temps est le coefficient cN (%/h),

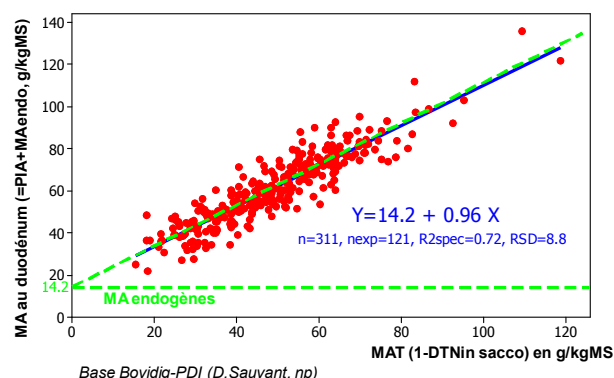
les paramètres klt et kpt (ou kft ou kct) ont été définis plus haut. Par rapport à sa version préalable, cette équation suppose qu'une partie de la fraction aN, dont le taux de dégradation est supposé être de 100%/h, s'écoule hors du rumen avec la phase liquide. Pour les tables, les valeurs de transit retenues ont été indiquées plus haut pour les concentrés et co-produits, pour les fourrages kft prend la place de kpt dans l'équation [5]. Pour les rations, les valeurs de kft, kct et klt sont déterminées en fonction de ses valeurs de NI et de PCO. Le calcul doit alors se faire à partir des valeurs de DTN des différents aliments, en prenant soin de passer par les quantités d'N dégradables ($N * \text{DTN}$) qui sont les seules à être additives. Lorsque les valeurs de aN, bN et cN ne sont pas connues, il est possible d'utiliser des relations de passage calculées entre les anciennes valeurs de DTN, soit DTN6, et les nouvelles valeurs de DTN des aliments dans la ration (Sauvant et Nozière, 2013).

Dans une seconde étape, la base Bovidig-PDI a été utilisée pour relier le flux de protéines alimentaires non digérées dans le rumen (PIA), et de matières azotées (MA) endogènes *in vivo* (PIA+MAendo_duo en g/kgMS) à la quantité de matières azotées totales du régime (MAT) non dégradée *in sacco* : MAT (1- 0.01 DTN%). La régression intra-expérience obtenue est (figure 1) :

$$\text{PIA} + \text{MAendo_duo} = 14,2 + 0,96 \text{ MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN}\%)$$
 [6]

(n=311, nexp=121, ETR=8,8)

Figure 1. Prévision des MA au duodénum à partir des mesures de dégradabilité de l'azote *in sacco*



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

$$\text{MAA} + \text{endo_duo} / \text{g/kgMS} = 14,2 + \text{MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN}\%)$$
 [6bis]

et on a

$$\text{PIA} / \text{g/kgMS} = \text{MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN}\%)$$
 [7]

2.2.2. La digestion de l'amidon

La quantité et surtout la qualité de l'amidon dans les rations des ruminants constituent le principal levier pour modifier la répartition de la MO digérée entre les différents compartiments digestifs du ruminant (Offner et Sauvant, 2004). Le principe de l'approche proposée pour l'amidon est très comparable à la proposition de ces auteurs et suit une démarche parallèle à celle de l'azote avec une équation générique similaire pour ajuster les cinétiques de dégradation *in sacco* de l'amidon (DTAM en %).

$$\text{DTAM} = \text{aAM} [100 / (100 + \text{klt})] + \text{bAM} [\text{cAM} / (\text{cAM} + \text{kpt})]$$
 [8]

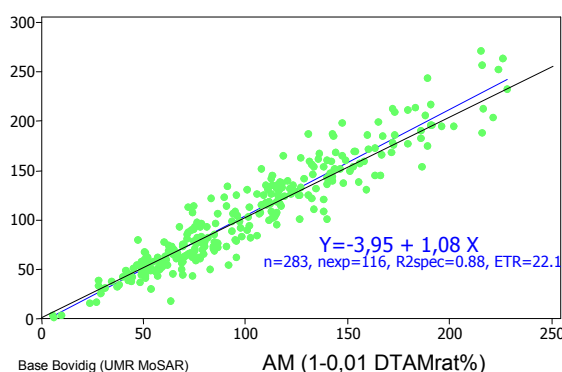
Les paramètres aAM, bAM et cAM sont comparables en signification aux critères aN, bN et cN évoqués pour N. Pour une ration les valeurs de klt, kpt sont calculées à partir des équations [1] à [4] en fonction de ses valeurs de NI et PCO. Le calcul doit alors se faire à partir des valeurs de DTAM des différents aliments, en prenant soin de passer par les quantités d'amidon dégradables (AM DTAM) qui sont les seules à être additives. Le même principe s'applique pour aAM et bAM. Lorsque les valeurs de aAM, bAM et cAM ne sont pas disponibles, et que les valeurs de DTAM6 le sont, il est possible, pour calculer la DTAM de la ration (DTAMrat%), d'appliquer des relations de passage (Sauvant et Nozière, 2013).

Pour calculer la relation de prédiction du flux amidon qui transite au duodénum, nous avons utilisé une sous base de Bovidig, 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. L'équation de prédiction extraite est :

$$\mathbf{AM_{duo} = 0.432 + 1,00 AM (1-0,01 DTAMrat\%)} \quad (n=289, R^2=0.45, ETR=5,1) \quad [9]$$

La constante n'est pas différente de 0 et la pente est égale à 1. La figure 2 montre l'allure de cette relation.

Figure 2. Relation intra-expérience entre le flux d'amidon au duodénum et l'amidon non dégradé *in sacco*
Flux d'amidon au duodénum (g/kgMS)



Selon cette régression, le flux d'amidon au duodénum est donc égal en moyenne à ce qui est prédit par les mesures *in sacco* en tenant compte de l'influence de NI et PCO sur les transits :

$$\mathbf{AM_{duo} = AM (1 - 0,01 DTAMrat)} \quad [10]$$

2.3 LES INTERACTIONS DIGESTIVES

2.3.1 Principes généraux

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, d'énergie en particulier. En outre ils conduisent en général à une surestimation de la valeur énergétique des rations. L'origine de ces phénomènes se situe principalement au sein du rumen avec trois causes majeures: un passage rapide des substrats alimentaires lorsque le niveau d'ingestion est élevé et un pH du jus de rumen inférieur à 6 (Sauvant et Peyraud, 2011), associé à des inhibitions des microorganismes cellulolytiques au profit de ceux qui utilisent les glucides facilement dégradables (bactéries amylolytiques...) lorsque PCO est élevé. Enfin, les interactions digestives peuvent aussi être dues aux 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 des mêmes rations :

$$\mathbf{\Delta dMO = dMO_{cal} - dMO_{mes}}$$

Jusqu'à présent le système français des UF s'appuyait sur une relation globale au niveau des UF (et non de la dMO) extraite d'essais d'alimentation, sans mesure de digestibilité, sur vaches laitières (Vermorel et al., 1987). Cette relation avait été simplifiée et déclinée au sein des principales espèces productrices de lait sous forme d'un accroissement des besoins en énergie, ou d'une diminution globale des apports ce qui revient au même (INRA, 2007). Dans l'optique de pouvoir prédire les flux des différents produits terminaux de la digestion, il a été décidé de suivre une démarche permettant de prendre en compte plus précisément ces phénomènes au niveau digestif ainsi que leurs causes majeures. Les équations présentées ci-dessous ont été établies essentiellement sur des bovins, pour les ovins et caprins des évaluations sont en cours (Nozière et al., 2013).

2.3.2 Influence du niveau d'ingestion

Le niveau d'ingestion NI est le principal facteur d'interaction digestive rencontré en pratique. Le regroupement, à partir des bases Bovidig et Rumener, d'un ensemble de 400 résultats de lots issus de 152 expérimentations, où le facteur étudié était le niveau d'ingestion d'un même régime, a permis de calculer une relation intra-expérience spécifique générique de l'influence du NI sur la digestibilité de la MO (dMO, en %) :

$$\mathbf{dMO = 76,0 - 2,74 NI} \quad (n=400, nexp=152, RSD=1,6) \quad [11]$$

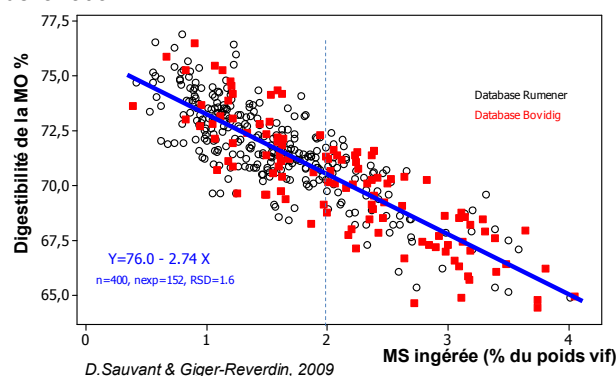
La figure 3 montre cette relation qui est précise vu la faible valeur de l'écart type résiduel. Cette équation avait été publiée sous une forme très proche par Sauvant et Giger-Reverdin (2009).

Si on suppose l'existence d'un niveau d'ingestion de référence (NIref), l'équation de correction appliquée correspond donc à :

$$\mathbf{\Delta dMO_{ni} = 2,74 (NI - NI_{ref})} \quad [12]$$

Les valeurs tables de la dMO surestimaient donc la dMO des régimes ingérés en quantité importante par les ruminants, surtout lorsque le NI est plus élevé que le NIref. Pour les fourrages, NIref correspond au NI de la mesure de dMO des tables. Pour les aliments concentrés et co-produits on suppose que NIref = 2, en conséquence pour réaliser une conversion entre les tables antérieures et Systali on a appliqué -1,37 (= 2,74 * (1,5-2) points de dMO en moins car elles ont été évaluées avec un NI se situant en moyenne à 1,5%PV.

Figure 3. Influence du niveau d'ingestion de MS sur la dMO de la ration.



2.3.3. Influence de la proportion de concentré (PCO)

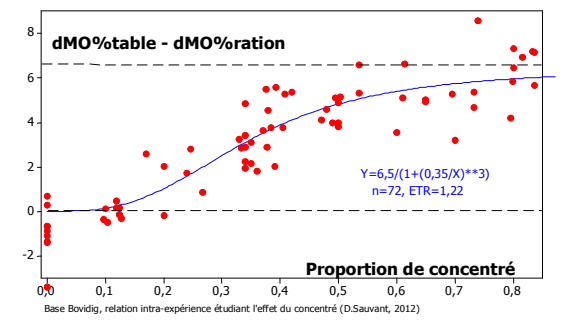
L'influence de PCO sur les interactions a été calculée sur la base Bovidig-PDI avec les 30 expériences où la proportion de concentré variait largement. L'ajustement intra calculé est :

$$\Delta dMO_{co} = 6,5 / (1 + (0,35/PCO)^3) \quad [13]$$

(n=72, nexp = 30, ETR= 1,2)

Les valeurs tables de dMO surestimaient donc la dMO des rations contenant des aliments concentrés. Cette équation de correction est précise compte tenu de la faible valeur de l'écart-type résiduel. La figure 4 ci-dessous montre cette relation qui traduit un effet non linéaire de PCO.

Figure 4. Influence de la proportion de concentré sur l'écart dMO%tables – dMO%ration



2.3.4. Influence de la balance protéique du rumen

La différence entre les MAT ingérées et celles passant au duodénum (MAduo), en excluant la fraction NH₃ de ces dernières, a été appelée « Balance protéique du rumen » (BalProRu, g/kgMS). Compte tenu de la représentation que l'on a des flux azotés au sein du rumen, BalProRu représente a priori la résultante des échanges d'NH₃ absorbés et d'urée recyclée au niveau de la paroi du rumen. Des relations intra-expérience étroites associent BalProRu à la teneur en N-NH₃ du jus de rumen ainsi que les rejets d'N urinaire (Sauvant et Nozière, 2013). BalProRu est, par définition, fonction des flux de MA endogènes (MAendo), des protéines alimentaires qui entrent dans les intestins (PIA), des MA fermentescibles (MAFerm) et des MA microbiennes (MAMic) selon la relation suivante :

$$BalProRu = MAT - PIA - MAendo - MAMic = MAFerm - MAendo - MAMic \quad [14]$$

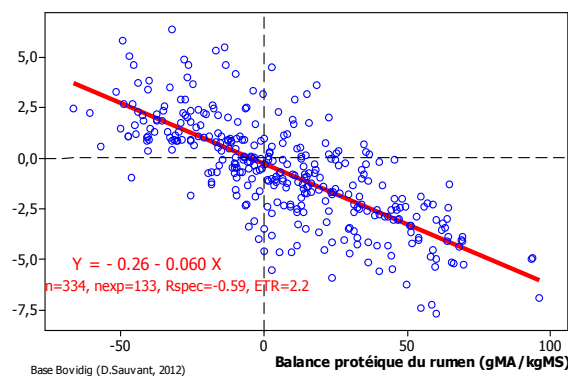
Cette relation montre au passage que BalProRu et la production de protéines microbiennes (voir plus loin) sont négativement reliées au sein de ce modèle relationnel. MAFerm – MAMic correspond en fait à la différence (PIMN – PIME)/0,8, le coefficient 0,8 est lié au fait qu'on considère que les MA microbiennes contiennent 80% d'acides aminés, comme c'était le cas dans la version PDI précédente. On a donc l'expression suivante pour relier les valeurs de BalProRu au système PDI :

$$BalProRu = -14,2 + (PIMN - PIME)/0,8 \quad [15]$$

Le coefficient de -14,2 permet de tenir compte des MAendo (cf équation [6]). BalProRu est a priori l'indicateur de l'équilibre azote-énergie de l'écosystème ruminal, cependant, en raison de la fraction 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 de la panse. Environ 60% des variations de BalProRu sont expliquées par les MAT ingérées. D'autre part, le critère BalProRu est bien corrélé au critère utilisé antérieurement pour évaluer l'équilibre énergie/azote du rumen : Rmic = (PDIN – PDIE)/UF (Agabriel

et al., 2007). L'avantage du choix de BalProRu, par rapport à Rmic, est qu'il correspond plus directement à des phénomènes digestifs ruminiaux, qu'il est fréquemment mesurée expérimentalement, qu'il est additif par construction et s'exprime, comme les autres critères protéiques, en g/kgMS. En outre, il est très comparable aux critères « Rumen protein balance » utilisés dans les systèmes étrangers. L'écart de dMO entre les valeurs calculées avec les tables (corrigées des interactions digestives liées à NI et PCO présentées ci-dessus) et les valeurs mesurées *in vivo* est très lié à la valeur BalProRu de cette ration comme le montre la figure 5 ci-dessous.

Figure 5. Influence de la balance protéique du rumen sur les interactions digestives dMO%table – dMO%mesurée



La régression intra-expérience est :

$$\Delta dMO_{BalProRu} = -0,26 - 0,060 BalProRu \quad [16]$$

(n=334, nexp=133, ETR=2,2)

La constante n'est pas différente de 0 pour BalProRu = 0. Les valeurs de dMO calculées avec les tables 2007 sous estiment donc, en moyenne, la dMO des régimes lorsque BalProRu > 0 (situation d'excédent azoté ruminal) alors que c'est l'inverse pour les régimes avec BalProRu < 0 (carencés en azote fermentescible). En pratique, les valeurs UF et PDI indiquées pour les aliments dans les tables ignorent cette relation, celle-ci n'est prise en compte de façon explicite que pour le calcul de la ration à travers un processus de calcul itératif basé sur l'écart entre la valeur BalProRu de la ration et celle des fourrages dans la table. Dans le système PDI précédent, Rmic n'était utilisé que comme un indicateur de l'équilibre Azote/Energie du rumen et devait présenter une valeur supérieure à 0 ou à un seuil légèrement négatif. Dans le nouveau système BalProRu intervient dans les calculs ce qui permet, par exemple, de prévoir la dMO de régimes pauvres en azote ainsi que son amélioration suite à un apport alimentaire azoté, urée par exemple (Chapoutot et al., 2013b), ce qui n'était pas le cas précédemment.

2.3.5. L'additivité des effets d'interaction digestive

L'additivité des effets liés à l'application des équations [12], [13] et [16] a été validée sur l'ensemble des données de la base Bovidig-PDI, ainsi qu'avec le modèle mécaniste intégré du rumen qui assure l'agrégation et évalue la cohérence de l'ensemble des équations. Cela garantit que les interactions peuvent être calculées et appliquées séparément. On a donc au final l'expression suivante pour prédire la dMO d'une ration :

$$dMO_{ration} = dMO_{table} - \Delta dMO_{ni} - \Delta dMO_{co} - \Delta dMO_{BalProRu} \quad [17]$$

A notre connaissance, à ce jour seul le système d'unité d'énergie finlandais appliquait ces 3 types de corrections (<http://www.mtt.fi/rehutaulukot/>). Nos résultats de correction sont très corrélés aux leurs (Sauvant, non publié) malgré des approches et démarches calculatoires indépendantes.

2.4 LA MATIERE ORGANIQUE FERMENTESCIBLE DANS LE RUMEN

Dès la première version du système PDI, il avait été proposé d'utiliser un critère mesurable simplement et qui soit proportionnel à la MO fermentée (MOF) par les microbes dans le rumen. En effet, c'est la MOF, donc l'énergie, qui limite le plus souvent la production de protéines microbiennes dans le rumen. En 1978 c'est la MO digestible dans l'ensemble du tube digestif qui avait été prise comme indicateur prédictif de la MOF (Jarrige et al., 1978). En 1987, le calcul de la MOF (MOF₁₉₈₇) tenait compte, non seulement de la MOD, mais également des teneurs en produits de fermentation des ensilages (PF), en matières grasses brute (MG, extrait étheré) et en MA non dégradables *in sacco* : MAT (1 - 0,01 DTN6) (Vérité et al., 1987).

$$\text{MOF}_{1987} = \text{MOD} - \text{MG} - \text{PF} - \text{MAT} (1 - 0,01 \text{ DTN6}) \quad [18]$$

En outre, des facteurs correctifs ont été proposés pour tenir compte des différents types d'amidon. Les limites et biais induits de cette expression ont été décrits par Sauvant et Nozière (2011, 2013). 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. Sur le principe, la relation générique considère que la MOF est la différence entre la MOD dans l'ensemble du tractus et la MOD dans les intestins (MOD_{int}). Il a été décidé d'appliquer les interactions digestives uniquement sur le terme MOD, ce qui devient alors à MOD_c « MOD corrigée » selon la formule :

$$\text{MOD}_c = \text{MO} - 0,01 \text{ dMOration}\% \quad [19]$$

Pour les fractions digérées dans les intestins à soustraire de la MOD_c, 4 constituants digestibles dans les intestins ont été retenus : les protéines d'origine alimentaire (PDIA), l'amidon (AMD_{int}), les parois végétales (NDFD_{int}) et les acides gras (AGD_{int}). Les équations de prévision de ces fractions digérées dans les intestins ont été présentées en détail par Sauvant et Nozière (2013). L'équation finale proposée tient compte comme précédemment des produits de fermentation des ensilages (PF) :

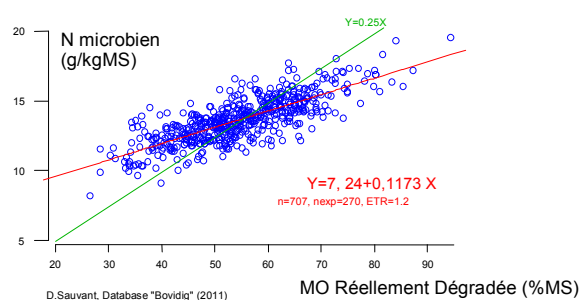
$$\text{MOF} = \text{MOD}_c - \text{PDIA} - \text{AMD}_{int} - \text{NDFD}_{int} - \text{AGD}_{int} - \text{PF} \quad [20]$$

2.5 LA PRODUCTION DES PROTEINES MICROBIENNES

La prédiction de la production des matières azotées microbiennes (MAMic) dans le rumen a toujours été un point délicat 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 des PDI, cette production était considérée comme égale à 120 gMAMic/kg MOD (Jarrige et al., 1978). Ultérieurement elle a été calculée à partir de l'équation MOF₁₉₈₇ (Vérité et al., 1987), en supposant une production de 145 g MAMic/kgMOF. Les systèmes proposés dans les autres pays s'appuient sur des relations du même type.

La nouvelle démarche a consisté à dégager, à partir de plus de 600 traitements expérimentaux rassemblés dans Bovidig, les principaux facteurs de variation de la production de MAMic, à les quantifier, puis à envisager la meilleure façon de les combiner au sein d'une équation intégrative globale. Certains facteurs connus ont déjà été présentés par Sauvant et Nozière (2011). Différentes équations candidates, utilisant différents critères, pouvaient être appliquées pour prédire les MAMic (Sauvant et Nozière, 2013), sachant qu'elles considéraient toutes que MOF est le critère majeur. La figure 6 présente la relation globale entre la teneur en MOF mesurée d'un régime et la production d'N microbien (=MAMic/6,25). Par rapport aux relations antérieures notons que la proportionnalité admise jusqu'alors entre MOF et MAMic, n'est en fait pas directe puisque la relation est affine, ceci signifie que l'efficacité de la croissance microbienne diminue pour les régimes riches en MOF. Réciproquement, cette efficacité est plus élevée pour les rations pauvres apportant peu de MOF.

Figure 6. Influence de la MO réellement dégradée dans le rumen (MOF) sur la production d'azote microbien dans le rumen.



Les différentes régressions intra-expérience calculées et testées aboutissent à des niveaux de précision comparable vis-à-vis d'une prévision globale moyenne des MAMic, le choix s'est donc porté sur l'équation la plus simple à mettre en œuvre. Parmi les équations comparées, celle s'appuyant sur la MOF et deux critères déjà utilisés dans les calculs, BalProRu et PCO, a été retenue :

$$\text{MAMic} = 40,7 + 75,6 \cdot 10^{-3} \text{ MOF} - 0,114 \text{ BalProRu} + 8,07 \text{ PCO} \quad (n=637, \text{ nexp}=245, \text{ ETR}=6,7) \quad [21]$$

Pour les tables alimentaires, cette équation est appliquée aux valeurs des aliments en considérant BalProRu=0 et PCO=0. Les variations de MAMic expliquées par les étendues plausibles des trois variables explicatives, considérées séparément, sont d'environ 40, 15 et 5 g MAMic/kgMS pour MOF, BalProRu et PCO respectivement. Ces valeurs confirment le rôle essentiel de la MOF vis-à-vis de la production microbienne ruminale.

2.6 LA DIGESTION DANS LES INTESTINS

Pour les protéines, les principes du calcul des PDI ont été maintenus, la digestibilité réelle (dr) des PIM 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 PIA 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 protéines alimentaires non digestibles dans l'intestin grêle, ou PANDI.

On a alors $dr = (PIA - PANDI)/PIA$. La méthode actualisée proposée a été décrite par Sauviant et Nozière (2013). Pour les fractions AM, NDF et AG digérées dans les intestins les équations ont été indiquées dans cette même référence.

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. Cette fraction est assez faible et représente en moyenne 10% de la MOD dans l'ensemble du tube digestif.

2.7 LES FLUX D'EXCRETION D'ENERGIE LIES A LA DIGESTION

La prévision de la teneur en énergie brute (EB) des aliments reste identique aux propositions antérieures (Baumont et al., 2007). Par contre, les lois de passage de l'EB à l'énergie métabolisable ($EM = EB - E_{féc} - E_{CH_4} - E_{urine}$) a été l'objet d'actualisations.

2.7.1 Passage de la dMO à la dE

La teneur en énergie digestible ($ED = EB - E_{féc} = EB \cdot dE$) des rations est la principale cause de variation de sa teneur en énergie nette. La prévision de la digestibilité de l'énergie (dE) se fait de façon précise à partir du moment où on connaît la dMO. Pour les fourrages les équations proposées en 2007 continuent de pouvoir être appliquées (Baumont et al., 2007). Pour les concentrés et co-produits, il a été proposé d'appliquer les régressions génériques de passage suivante pour calculer la dE à partir de la dMO (Sauviant et al., 2002), par exemple:

$$dE = dMO - 3,94 + 0,104 \text{ MAT}\%MS + 0,149 \text{ MG}\%MS - 0,022 \text{ NDF}\%MS - 0,244 \text{ MM}\%MS \quad [22]$$

MM%MS représente la teneur en matières minérales.

2.7.2 L'énergie du méthane

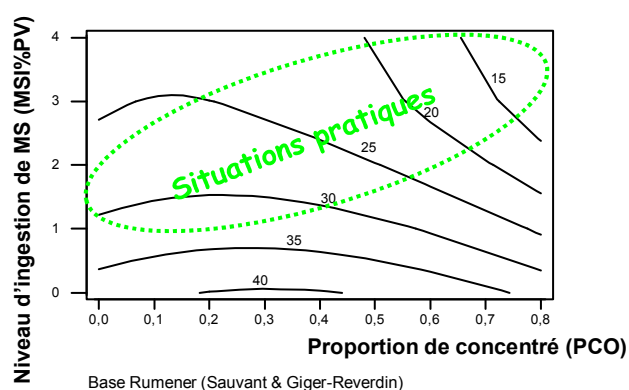
Compte tenu du fait que la production de CH_4 est très liée aux phénomènes d'interactions digestives (Sauviant et Giger-Reverdin, 2009), il est nécessaire d'utiliser des termes de prédiction qui soient mesurés assez précisément et, si possible, les critères prédictifs des interactions déjà utilisés pour les autres aspects digestifs. Il a donc été décidé de travailler sur la production de CH_4 ramenée à la MOD, critère pivot des équations Systali, et d'en modifier les valeurs en fonction de NI et PCO selon la relation suivante extraite de résultats de mesures calorimétriques de la base Rumener (Sauviant et al., 2011).

$$CH_4 \text{ (g/kgMODc)} = 45,42 - 6,66 \text{ NI} + 0,75 \text{ NI}^2 + 19,65 \text{ PCO} - 35,0 \text{ PCO}^2 - 2,69 \text{ NI PCO}$$

$$(n = 450, n_{exp} = 158, ETR = 2,3) \quad [23]$$

Dans cette équation, il s'agit du méthane émis par kilo de MOD corrigée des interactions digestives selon la relation [19]. La figure 7 présente la trace de cette équation, la production y apparaît plus faible pour les rations contenant beaucoup de concentré et ingérées en grande quantité, d'autre part les interactions entre NI et PCO y apparaissent nettement sur les formes des courbes d'iso-production.

Figure 7. Réponses de la production de CH_4 (g/kgMOD) en fonction du niveau d'ingestion et de la proportion de concentré



La production d'énergie sous forme de CH_4 est alors calculée de la façon suivante à partir de l'apport MOD de la ration (MODrat):

$$ECH_4 \text{ (kcal/kgMS)} = 12,5 \text{ MOD (CH}_4\text{/MOD)} \quad [24]$$

et

$$ECH_4\%EB = 100 \text{ ECH}_4\text{/EB} \quad [25]$$

Pour les tables, les relations [23, 24, 25] s'appliquent avec $NI=NI_{ref}$ et $PCO=0$. Pour les rations, elles s'appliquent avec leurs propres valeurs de NI et PCO.

2.7.3 L'énergie urinaire (EU)

Dans la base Rumener, en sélectionnant les essais où la teneur en MAT était le facteur étudié, le rapport $EU\%EB$ est très dépendant de la teneur en MAT des régimes. Cependant, au-delà de cet effet majeur de MAT, les critères NI et PCO présentent également une influence:

$$EU\%EB = 2,9 + 0,17 \text{ MAT}\%MS - 0,47 \text{ NI} - 1,64 \text{ PCO} \quad [26]$$

($n=337, n_{exp}=109, ETR=0,56$)
Pour les tables, la relation s'applique avec $NI=NI_{ref}$ et $PCO=0$. Pour les rations, elle s'applique avec leurs propres valeurs de NI et PCO.

2.7.4 Bilan comparatif des corrections

Les corrections appliquées mettent en œuvre NI et PCO qui sont impliqués dans les calculs d'interaction digestive 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 de production (INRA, 1978). Les deux approches ont été comparées sur des données communes. Les nouveaux calculs aboutissent à soustraire une quantité d'énergie un peu plus faible à l'ED pour aboutir à l'EM dès que $ED-EM > 400 \text{ kcal/kgMS}$ (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. De ce fait les valeurs UF Systali sont un peu plus élevées (de 10-15%) dès que $UFL > 0,83$, l'inverse se produisant dès que $UFL < 0,83$ (seuil à 0,81 pour les UFV).

CONCLUSION

Ce travail a permis de présenter et de justifier les principales équations digestives utilisées pour réviser les apports dans les systèmes PDI et UF des animaux ruminants. La plupart de ces régressions intra-expérience s'appuient sur plusieurs centaines de traitements expérimentaux ce qui est bien plus important que dans les approches précédentes. Tous les aspects quantitatifs connus de la digestion de l'énergie et des protéines ont été revisités en cette occasion et n'ont été retenues que les équations les plus probantes.

Il est donc actuellement possible de prédire avec une précision satisfaisante les variations des taux de transit des particules et des liquides. Ces nouvelles données ont été mises à profit pour mieux adapter à chaque contexte les équations de prévision de la dégradabilité dans le rumen des fractions protéiques et amylacées des aliments.

La question des interactions digestives a été complètement revisitée et l'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 reconsidérée avec une proposition de calcul 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. D'autre part, il a été montré que la production de protéines microbiennes n'est pas directement proportionnelle à la MOF et que d'autres facteurs pouvaient en expliquer les variations. Différentes équations, de précision comparable ont été obtenues; il est suggéré d'utiliser de préférence celle qui s'appuie sur les critères BalProRu et PCO déjà utilisés plusieurs fois dans les différents calculs. A ce propos le critère BalProRu, qui est impliqué dans plusieurs calculs, prend plus d'importance que le Rmic précédent qui n'était qu'un repère qualitatif des rations.

Toutes ces relations ont été essentiellement construites sur des données bovines, un travail de validation sur des données de petits ruminants est en cours (Nozière et al., 2013).

Ce travail, qui exige des phases importantes d'évaluation à travers différents jeux de données et de simulations, est un socle pour prévoir, à terme, les quantités de nutriments absorbables et les rejets pour les différents régimes, et donc pour adosser à ces systèmes une évaluation multicritère des régimes.

Agabriel J., Pomiès D., Nozières M.O., Faverdin P., 2007. In INRA 2007. Ed. Quae, 9-22

Baumont R., Dulphy J.P., Sauvant D., Tran G., Meschy F., Aufrère J., Peyraud J.L., Champciaux P., 2007. In INRA 2007. Ed. Quae, 181-275

Chapoutot P., Nozière P., Sauvant D., 2013a. 64th EAAP, 138

Chapoutot P., Nozière P., Sauvant D., 2013b. Renc. Rech. Ruminants, 20 (sous presse)

INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et valeur nutritive multi-espèces, Ed INRA

INRA, 2007. Alimentation des bovins, ovins et caprins, Ed. Quae

Jarrige et al., 1978. Alimentation des ruminants. Ed INRA

Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P., 1987. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 69, 5-7.

Nozière P., Giger-Reverdin S., Chapoutot P., Sauvant D., 2013. Renc. Rech. Ruminants, 20 (sous presse)

Offner A., Sauvant D., 2004. Anim. Feed. Sci. Technol., 112, 107-130.

Sauvant D., 1999. Renc. Rech. Ruminants, 6 ;11-17.

Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., St Pierre N., 2008. Animal, 2, 1203-1214

Sauvant D., Giger-Reverdin S., 2009. Inra Prod. Anim., 22, 375-384.

Sauvant D., Peyraud J.L., 2011. INRA Prod. Anim., 23, 333-342

Sauvant D., Nozière P., 2011. Renc. Rech. Ruminants, 18, 113-116

Sauvant D., Nozière P., 2012. Renc. Rech Ruminants, 19, 181-184.

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Serment A., Broudiscou L., 2011. Inra Prod. Anim., 24, 433-446.

Sauvant D., Nozière P., 2013. INRA Prod. Anim. (accepté)

Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 69, 19-34.

Vermorel M., Coulon J.B., Journet M., 1987. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 69, 9-18.

Volden H., 2010. NorFor -. The Nordic feed evaluation

system. EAAP Publications, Vol. 30, 240 p.