

Modélisation des réponses de la digestion des bovins aux variations de la fibrosité des rations

D. SAUVANT (1), D. MERTENS (2)

(1) INAPG Laboratoire de Nutrition et Alimentation (INRA) de l'INAPG, 16 rue Claude Bernard - 75231 PARIS CEDEX 05

(2) UDSA-Madison-USA

RÉSUMÉ – Une base de données expérimentales publiées a été rassemblée avec comme critère de sélection la mesure de durées de mastication et/ou de flux digestifs au duodenum. Ainsi 177 références représentant 232 expériences et 641 modalités expérimentales ont été regroupées. Le volume du rumen ($n = 191$, 74.0 ± 10.6 l) dépend essentiellement des quantités de fourrage ou de NDF ingérées. Le niveau d'explication statistique des variations de ce volume, apprécié par l'écart-type résiduel (etr), est comparable entre les 4 principaux paramètres de fibrosité : NDF (% MS), concentré % MS (%C), indice de mastication (IM min/kg MSI) et densité particulaire (mm^{-1}). Des conclusions très comparables peuvent être faites à propos du flux de liquide sortant du rumen ($n = 187$, 180.1 ± 62.2 l). Les variations du pH ruminal ($n = 362$, 6.2 ± 0.3) sont bien expliquées (etr intra de 0.13 à 0.15) par NDF, % C et IM. Une conclusion analogue peut être tirée à propos du profil des acides gras volatils, ainsi l'etr intra pour le rapport acétate/propionate ($n = 367$, $3.1. \pm 0.75$) est compris entre 0.35 et 0.37 pour ces trois critères. Si on excepte la densité particulaire pour laquelle le nombre d'observations est faible, il apparaît que les trois autres critères de fibrosité possèdent des pouvoirs explicatifs/prédictifs comparables vis-à-vis des caractéristiques digestives considérées.

Modelling the responses of digestion to diet fibrosity in bovine

D. SAUVANT (1), D. MERTENS (2)

(1) INAPG Laboratoire de Nutrition et Alimentation (INRA) de l'INAPG, 16 rue Claude Bernard - 75231 PARIS CEDEX 05

SUMMARY – A base of published data has been pooled with two criteria of choice, either chewing time or digesta flows at duodenum. Thus 177 references, 232 experiments and 641 experimental groups were collected. The rumen volumen ($n = 191$, 74.0 ± 10.6 l) was mainly influenced by the ingested forage or NDF. The level of accuracy to explain this volume was similar between the 4 major parameters of diet fibrosity : NDF (% DM), concentrate (% C, % DM), index of mastication (IM, min/kg DMI) and particular density (mm^{-1}). Similar conclusions were obtained for the liquid outflow from the rumen ($n = 187$, 180.1 ± 62.2 l). The variations of ruminal pH ($n = 362$, $6.2. \pm 0.3$) are satisfactorily explained (residual sd between 0.13 and 0.15) by NDF, % C and IM. A similar conclusion can be drawn for the volatile fatty acid profile. Thus the residual sd of the ratio acetate/propionate ($n = 367$, $3.1. \pm 0.75$) was comprised between 0.35 and 0.37 for these 3 criteria. Excepting the particular density which presented a low number of data, it appeared that the 3 other parameters of diet fibrosity had similar explicative/predictive values for the considered digestive characteristics.

INTRODUCTION

A l'objectif classique de « couvrir les besoins » des animaux pour permettre d'exprimer leur potentiel (Jarrige 1978), succède maintenant celui de formuler le régime alimentaire qui permet d'atteindre une combinaison optimale des réponses des animaux aux variations de l'alimentation (Sauvant, 1992). Ces réponses concernent non seulement l'efficacité de la transformation des aliments mais également la qualité des produits, le contrôle de l'environnement, l'amélioration de l'état de santé et du bien être des animaux...

En recherche cette problématique est « segmentée » en étudiant les réponses des « organes clefs » aux variations des régimes. Parmi ceux ci, le réticulo-rumen joue un rôle essentiel en raison de son volume, et de sa position initiale et influence dans les processus d'utilisation des aliments par l'organisme. Dans le domaine de l'azote le système PDI (Vérité et al, 1987) a déjà intégré les principales réponses quantitatives du réticulo rumen. Pour la fraction amylacée des rations, les propositions de Sauvant (1997) permettent de prévoir les réponses globales de la digestion. Par contre aucun modèle cohérent de la réponse de la digestion du réticulo rumen aux variations de la fibrosité des régimes n'a été publiée à ce jour. Pourtant il est reconnu que la fibrosité est un déterminant essentiel de certaines réponses de l'animal ruminant, en particulier en terme de risques pathologiques et de caractéristiques de composition des produits (Sauvant & Dulphy, 1995). Pour cette raison, des systèmes de fibrosité sont travaillés depuis une dizaine d'années aux USA (Mertens, 1997) et au Danemark (DK, 1995). Ce texte a pour but, d'une part de présenter quelques éléments de la modélisation de réponses du réticulo rumen aux variations de la fibrosité des rations (Sauvant & Mertens, non publié) et, d'autre part, de comparer la pertinence des principaux critères utilisés pour caractériser la fibrosité des régimes des ruminants.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

De nombreuses publications ont été consacrées à la fibrosité des rations des ruminants, cependant aucune d'elles n'a été suffisamment complète dans les mesures effectuées pour pouvoir fournir un ensemble cohérent de réponses de la digestion. En conséquence, il a été décidé de mettre en place une base de données rassemblant le maximum de publications disponibles sur ce sujet, en se limitant dans le cas présent à l'espèce bovine. Cette base regroupe actuellement 177 références, 232 expériences et 641 lots expérimentaux. Pour être retenue dans la base une expérience devait fournir, outre les paramètres classiques (matière sèche ingérée, MSI; proportion de concentré dans la MSI, %C; poids vif, PV; production laitière pour les animaux en lactation, PL; teneurs en paroi végétale, NDF, et en protéines brutes, MAT, du régime...), des résultats sur les durées de mastication, DM, ou/et sur la digestion dans le réticulo-rumen mesurée par des bilans duodénaux.

L'interprétation d'une telle base de données soulève des problèmes méthodologiques. En raison de l'existence de nombreuses données manquantes, cette base correspond à un dispositif non orthogonal et déséquilibré. En outre, pour les mesures difficiles à effectuer, il existe en général des variantes méthodologiques qui aboutissent, à des différences non négligeables entre les résultats. Enfin, au delà de cet aspect, il persiste d'importantes variations inter-expériences, explicables

ou non, qui rendent plus difficile l'établissement de lois générales. En conséquence l'analyse de telles bases de données doit se faire avec précautions: approches univariates préalables à toute approche multivariée, linéarisation des relations, analyse des corrélations globales (Rg) et intra-expériences (Ri), analyse de variance (effet expérience)- covariance (caractère quantitatif explicatif ou prédictif) par la procédure GLM, recherche des données aberrantes à chaque étape...

2. RÉSULTATS

2.1. Les critères permettant d'apprécier la fibrosité des rations ont été la teneur en paroi végétale ($n = 618$, $NDF = 39.3 \pm 12.0$), la taille moyenne des particules ($n = 154$, $TP = 2.72 \pm 1.36$ mm), ou son inverse la densité particulaire qui présente l'intérêt d'aboutir à des relations plus linéaires ($n = 154$, $DENS = 0.48 \pm 0.29$ mm⁻¹), la proportion de concentré ($n = 641$, $\% C = 39.5 \pm 23.7$ % MS) et l'indice de mastication ($n = 389$, $IM = 45.8 \pm 24.1$ min/kg MSI). Dans certains cas, les quantités de fourrages (FI) ou de NDF (NDFI) ingérées ont aussi été utilisées en variable explicative. Les différents critères de fibrosité sont plus ou moins liés entre eux, la meilleure corrélation globale concerne NDF avec IM ($n = 384$, $R_g = 0.82$) et % C ($n = 617$, $R_g = -0.63$). Ces deux derniers paramètres sont aussi liés ($n = 389$, $R_g = -0.57$). Par contre, la densité particulaire n'est pas liée à ces critères, en conséquence elle possède une influence indépendante des autres. Ainsi la précision globale ou intra expérience de IM est significativement accrue quand DENS est prise en compte. L'équation intra obtenue est :

$$IM = 39.1 + 0.63 NDF - 15.8. DENS - 0.77 MSI$$

($n = 151$, $R_i = 0.98$, $etr = 4.1$ min/kg MSI)

Une variation d'un écart type des valeurs de la base pour les paramètres NDF, DENS et MSI correspond aux variations respectives de 7.6, 4.6 et 4.3 min/kg de MS de IM.

2.2. VOLUME, MOTRICITÉ ET TRANSIT DE LA PHASE LIQUIDE

• **Le volume ruminal** ($n = 191$, $VR = 74.0 \pm 10.6$ l) est étroitement dépendant de son contenu en MS ($n=107$, $R_g=0.79$) qui est lui même très lié à son contenu en NDF ($n=56$, $R_g=0.91$) sachant qu'en moyenne, environ les 2/3 de la MS ruminale est sous forme de NDF. VR est un peu plus lié avec la quantité ingérée de NDF ($n=187$, $R_g=0.54$, $etr=15.8$ l) qu'avec celle du fourrage ($n=191$, $R_g=0.44$, $etr=16.7$ l). Les autres caractéristiques ont présenté moins de liaison avec VR. Lorsque l'effet expérience est pris en compte la qualité des relations s'améliore largement. D'autre part lorsque les caractéristiques sont exprimées par rapport au poids vif ($VR/PV = 132.7 \pm 32.6$ ml/kg PV) la hiérarchie entre variables explicatives se maintient, par exemple la meilleure relation obtenue est :

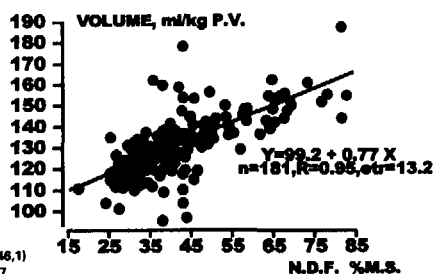
$$VR/PV = 3.73 NDFI/PV + 86.3 (n=108, R_i=0.96, etr=10.6 ml/kg)$$

Il convient de signaler que la teneur en NDF du régime (% MS) est également un bon prédicteur analytique simple du volume ruminal rapporté au PV (Figure 1):

$$VR/PV = 0.74 NDF + 94.0 \quad (n=112, R_i=0.95, etr=11.3 ml/kg)$$

Les autres caractéristiques de fibrosité aboutissent cependant à une précision comparable de prévision (tableau 1). Ces différents résultats permettent de confirmer et surtout de quantifier le rôle d'encombrement ruminal joué par les parois végétales de la ration.

Figure 1
Relation entre le volume
du rumen et la teneur en N.D.F. du régime



Relation intra expérience n=71, s=46,1)
D. SAUVANT & D. MERTENS, 1997

• Le flux de liquide sortant du rumen (n = 187, FLIQ = 180.1 ± 62.2 l/j) dont les variations sont très liées à la sécrétion de salive et, de ce fait, au recyclage des substances tampons dans le rumen, a été mesuré dans 71 expériences. FLIQ est, en intra expérience, linéairement et étroitement lié à VR, l'écoulement des liquides hors rumen suit donc globalement une loi d'action de masse du volume :

$$\text{FLIQ} = 3.31 \text{ VR} - 57.0 \quad (n=159, \text{Ri}=0.96, \text{etr}=23.5 \text{ l})$$

FLIQ est également très lié au taux d'écoulement de la phase liquide hors du rumen (n=167, Rg=0.69, Ri=0.95). Parmi les caractéristiques de fibrosité de la ration FLIQ est globalement principalement lié à NDFI (n=173, Rg=0.69) et à FI (n=187, Rg=0.62). La relation intra expérience entre FLIQ et NDFI est :

$$\text{FLIQ} = 25.3 \text{ NDFI} + 25.3 \quad (n=113, \text{Ri}=0.95, \text{etr}=26.6 \text{ l})$$

D'autre part la durée de rumination (n = 373 DR = 432 ± 118 min/j) est bien liée à FLIQ

$$\text{FLIQ} = 0.168 \text{ DR} + 136.4 \quad (n=57, \text{R}=0.93, \text{etr}=27.8 \text{ l})$$

alors que la durée d'ingestion ne l'est pas. Le coefficient de régression indique que FLIQ augmente de 168 ml par min de rumination, valeur proche de ce qui est estimé pour la sécrétion salivaire. Lorsque FLIQ est exprimé par kg de MSI (FLIQMS = 13.0 ± 4.4 l/kg) les relations globales les plus intéressantes sont observées avec l'indice de mastication, la teneur en NDF, la proportion de concentré et la densité du régime (Tableau 1).

Tableau 1
Comparaison des différents critères de fibrosité
pour expliquer quelques paramètres digestifs

	Unité	Volume du rumen (ml/kg PV)		Flux de liquide (l/kg MSI)		pH		Acétate Propionate	
		n	etr	n	etr	n	etr	n	etr
% CONCENTRE	% MS	181	13,5	186	1,73	267	0,13 (2)	286	0,37
% NDF	% MS	181	13,2	177	1,77	253	0,14 (2)	277	0,38
DENSITE	l/mm	25	11,7	18	1,42	52	0,18	71	0,35
INDICE DE MASTICATION	min/kg MSI	88	12,1	72	1,90	152	0,13	184	0,36

(1) Les écarts-types résiduels (etr) présentés sont calculés en intra-expérience. Nombre total de données = n

(2) Modèle quadratique d'ajustement des données

Il convient de signaler en outre que FLIQ/MSI dépend aussi étroitement de facteurs " animaux " tels que le niveau de MSI (n=187, Rg=-0.61) ou le niveau de production de lait pour les vaches en lactation (n=108, Rg=-0.75). En conséquences les relations les plus précises sont obtenues en incluant ces derniers facteurs dans les régressions.

Par exemple :

$$\text{FLIQ/MSI} = 10.00 + 0.111 \text{ NDF} - 0.100 \text{ MSI}$$

(n = 177, Ri = 0.95, etr = 1.77)

$$\text{et FLIQ/MSI} = 14.4 - 3.56 \text{ DENS} + 0.212 \text{ NDF} - 0.473 \text{ MSI}$$

(n=18, Rg=0.90, etr=1.88 l/kg MSI)

La valeur de l'etr de cette dernière équation est égale à 0.88 lorsque que l'effet expérience (7 dl) y est pris en compte.

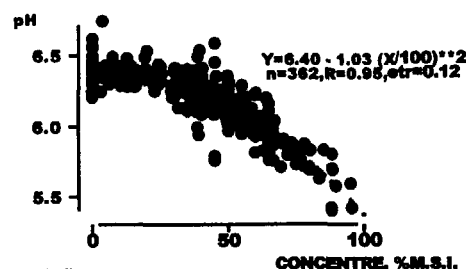
2.3. LE FLUX DIGESTIF DE PAROI VÉGÉTALE

Le flux de NDF transitant au duodenum est, sur la base des 34 résultats disponibles, linéairement dépendant de la quantité présente dans le rumen. Le coefficient de régression révèle un taux d'écoulement moyen apparent des parois hors du rumen de 2.4 %/h. Ce flux duodénal de NDF est lié à celui qui a été ingéré (n=243, Rg=0.74), il en est égal à 50.6 %, indiquant que la moitié des parois ingérées sont en moyenne digérées dans le rumen. Le flux fécal de NDF est également très lié à son flux duodénal (n=205, Rg=0.94). Il est en moyenne égal à 89.0 % de sa valeur ce qui confirme que les parois non digérées dans le rumen sont très largement rejetées dans les fèces. Le CUD des parois dans le rumen ou le tube digestif dépend peu des critères de fibrosité retenus, des critères plus pertinents tels que la teneur en lignine ou la dégradabilité sous l'action de cellulases n'ont pour ainsi dire jamais été cités dans les publications, leur effet ne peut donc être testé.

2.4. pH DU RUMEN

Ce paramètre (n = 362, pH = 6.2 ± 0.3) est considéré comme un bon révélateur du fonctionnement de la digestion ruminale, l'optimum du pH moyen se situant entre 6.5 et 7.0. Le tableau 1 indique les principales relations intra essai obtenues entre les caractéristiques de fibrosité du régime et le pH ruminal. La plupart de ces caractéristiques permet d'aboutir à une prédiction du pH avec une précision comparable et avec un etr situé entre 0.13 et 0.18. La relation entre le pH et la proportion de concentré est indiquée dans la fig. 2. La densité particulière du régime a été moins fréquemment mesurée ou estimée ; en outre, elle aboutit à une moindre précision de prédiction. D'autres paramètres sont également bien liés au pH ruminal, il s'agit en particulier de la variable FLIQ/MSI (fig. 3). Cette relation traduit vraisemblablement le rôle de la sécrétion salivaire comme élément régulateur du pH ruminal.

Figure 2
Relation entre le volume
du rumen et la teneur en N.D.F. du régime



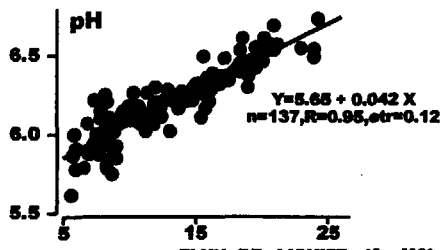
Relation intra expérience n=134, s=0,46)
D. SAUVANT & D. MERTENS, 1997

2.5. PROPORTION DES ACIDES GRAS VOLATILS (AGV)

En se limitant au rapport A/P qui est un bon indicateur du statut énergétique des microbes du rumen (Sauvant et Van Milgen, 1995) et un bon prédicteur des orientations du métabolisme énergétique de l'animal, il apparaît que les principaux critères de fibrosité des rations aboutissent à des modèles d'ajustement de précision assez comparable (Tableau 1).

Cependant le nombre de données disponibles est très différent selon le critère considéré. La figure 4 indique la relation entre ce rapport et la densité particulière de la ration.

Figure 3
Relation entre le pH et le flux de liquide ruminal



Relation Intra expérience n=54, st=0.37)
D. SAUVANT & D. MERTENS, 1997

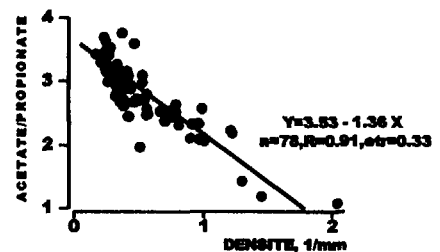
3. DISCUSSION

Malgré le niveau d'approche très intégré et les restrictions méthodologiques liées à la grande diversité des données, cette bibliographie quantitative a permis de dégager différentes lois de réponse de la digestion ruminale aux critères de fibrosité des régimes. Ces paramètres sont globalement liés entre eux et aucun d'eux ne paraît être, en utilisation unique, nettement plus intéressant que les autres. Il paraît important de souligner que la densité particulière du régime constitue souvent un critère explicatif pertinent, malheureusement le nombre des résultats disponibles demeure très insuffisant. Les résultats obtenus sur des paramètres tels que le pH et le rapport acé-

tate/propionate ne font que quantifier des tendances connues. Par contre les relations obtenues avec le volume du rumen et surtout les flux de liquide ruminal sont plus originales. Aucun, ou peu d'effet, n'a été observé sur les transits particuliers et la protéosynthèse dans le rumen.

Ces premiers résultats permettent d'envisager un système pratique de prédiction des principaux paramètres digestifs du rumen à partir d'une ou plusieurs caractéristiques alimentaires. Il aurait été intéressant de chercher à analyser également cette base à travers le système des UE (Dulphy et al., 1987) ; malheureusement, pour une majeure partie des résultats, il est apparu difficile d'obtenir une valeur UE fiable des fourrages utilisés. Enfin, il reste à savoir si ce sont les mesures des paramètres de fibrosité ou bien celles des caractéristiques de la digestion dans le rumen qui sont les meilleurs prédicteurs des réponses zootechniques des animaux.

Figure 4
Relation entre le rapport acetate/propionate du rumen et la densité particulière du régime



Relation Intra expérience n=39, st=0.33)
D. SAUVANT & D. MERTENS, 1997

RÉFÉRENCES

DK 1995, Feed table 1995. Composition and feed values of cattle feed.

DULPHY J.P., FAVERDIN P., MICOL D., BOCQUIER F., 1987. Prédiction du système des unités d'encombrement, Bull. Tech. Theix, CR2V n° 70, 35-48.

JARRIGE R., 1978. Introduction, in " L'alimentation des ruminants ", INRA Editions.

MERTENS D., 1997. Creating a system for meeting the fiber requirement of dairy cows. J. Dairy Sci, 80, 1463-1481.

SAUVANT D., 1992, La modélisation systémique en nutrition, Reprod. Nut. Dév., 32, 217-230

SAUVANT D., DULPHY J.P., 1995. La fibrosité des rations des ruminants, Renc. Rech. Ruminants, 2, 465-468.

SAUVANT D., VAN MILGEN J., 1995. Dynamic aspects of carbohydrate and protein breakdown and the associated matter synthesis, p 71-91, Proc. 8th Int. Symp. on Ruminant Physiology, Ed Engelhart et coll., Verlag, Stuttgart.

SAUVANT D., 1997. Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez le ruminant. Prod. Anim. (sous presse).

VERITE 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, 70, 19-34.