

APPROCHE QUANTITATIVE DE L'ACIDOSE CHEZ LES RUMINANTS

QUANTITATIVE APPROACH OF ACIDOSIS IN RUMINANTS

Par Daniel SAUVANT¹ et Sylvie GIGER-REVERDIN²

(Communication présentée le 04 Juin 2015

Manuscrit accepté le 22 Octobre 2015)

RÉSUMÉ

L'acidose du rumen est un trouble fréquent chez le ruminant à niveau élevé de performance et recevant, de ce fait, une ration riche en énergie. Elle est de plus en plus étudiée et de nombreux résultats sont maintenant disponibles. Ceux-ci sont utilisés pour établir des lois de réponse du pH du rumen à différents facteurs, alimentaires ou non, ce qui permet d'en déduire des valeurs de seuils et les zones de valeurs optimales pour ces différents critères. Les résultats disponibles et les modèles établis sont considérés d'abord d'un point de vue statique, puis d'un point de vue dynamique. Sur ce volet, des relations intéressantes sont établies entre les dynamiques d'ingestion et de pH. De plus, les épisodes d'acidose altèrent modérément le fonctionnement du rumen et, plus sévèrement, l'ingestion et la production laitière. Des recherches prometteuses mettent en relation l'acidose avec les caractéristiques du microbiote (l'ensemble des micro-organismes) du rumen et de l'hôte.

Mots-Clés : ruminant, rumen, acidose, modèles.

ABSTRACT

The rumen acidosis is a common disease in high producing ruminants which received, then, a high-energy diet. This pathology is increasingly studied and many results are now available. These data were used to establish rumen pH response laws to various factors, linked with either feeding practices or not, which allow to deduce threshold values and ranges of optimum values for various criteria. The available results and the established models were considered first from a static point of view and then from a dynamic one. On this last aspect, interesting relationships were established between the dynamics of feeding behavior and pH. Moreover, bouts of acidosis altered rumen function only moderately and more severely intake and milk production with a long delay of recovery. Nowadays, promising research focused on acidosis deals with relationships between the characteristics of the rumen microbiota and its host.

Key-Words: ruminant, rumen, acidosis, models.

INTRODUCTION

L'accroissement des potentiels de performance des animaux est associé à l'emploi de régimes de plus en plus énergétiques de manière à pouvoir couvrir les besoins correspondants. Cette évolution représente une des composantes de l'intensification des élevages de ruminants et a entraîné une fréquence accrue des phénomènes d'acidose du rumen et des différents troubles associés. Ainsi, des études de terrain montrent une prévalence importante de l'acidose en élevage laitier moderne avec 15 à 30% des vaches en lactation atteintes, que ce soit aux USA (Kleen *et al.* 2003) ou en Europe (Kleen *et al.* 2004; Morgante *et al.* 2007). Il est difficile d'appréhender précisément l'impact économique de l'acidose car, outre la perte de lait, les autres problèmes physiopathologiques et coûts induits sont difficilement quantifiables (Krause & Oetzel, 2006).

Les troubles liés à l'acidose du rumen sont connus depuis longtemps et ont été l'objet de synthèses écrites parmi lesquelles on peut citer l'excellent point des connaissances d'Espinasse (1969; 1970; 1971). Au cours des dernières décennies, compte tenu de son impact en élevage, l'acidose a fait l'objet de nombreuses recherches qui ont produit une quantité particulièrement importante de publications avec de nombreux résultats. Ainsi, jusqu'en 1995, on recensait une vingtaine de publications scientifiques par an répondant aux mots clefs « rumen and acidosis ». Ce nombre s'est régulièrement accru depuis pour atteindre récemment environ 125/an. De ce fait, une masse considérable d'informations éparses est disponible sur l'acidose. Il importe de chercher à traiter cette information avec les démarches et les méthodes statistiques adéquates afin

(1) Professeur, AgroParistech, UMR 791 Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France.

(2) Chargée de Recherches, AgroParistech, INRA, UMR 791 Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France.

de pouvoir continuer à progresser dans la connaissance de ce trouble et de mieux identifier les facteurs et les mécanismes impliqués. Depuis les années 2000, les synthèses publiées sur l'acidose ont pris un caractère quantitatif plus marqué (Martin *et al.* 2006; Peyraud & Apper-Bossard 2006; Sauvant *et al.* 2006; Sauvant & Peyraud, 2010; Yang & Beauchemin, 2006). En outre, un numéro spécial (numéro 14) de la revue « Le Nouveau Praticien Vétérinaire : élevage & santé » a réalisé en 2010 une synthèse non quantitative, mais fort utile et très bien illustrée, de l'acidose dans la réalité des élevages.

L'objectif de cette communication est de présenter une approche systémique et quantitative de l'acidose du rumen. Ce trouble sera donc abordé à différents niveaux d'échelle d'organisation et selon différentes échelles de temps. Sur les aspects les plus importants, le point sera fait sur les connaissances quantitatives disponibles qui ont été utilisées dans le cadre de modélisations et sur leur intérêt pour progresser dans la compréhension et la prévention de cette pathologie.

DÉFINITION, MÉCANISMES IMPLIQUÉS, CARACTÉRISATION ET MÉTHODE D'APPROCHE DE L'ACIDOSE

Un rumen est considéré en acidose lorsque le pH moyen de ses contenus sur le nyctémère devient inférieur à environ 6, seuil situé entre 5,8 et 6,2. L'acidose latente, ou subaiguë, se rencontre presque systématiquement dans les élevages intensifs lorsque les animaux à niveau élevé de performances reçoivent des rations riches en aliments concentrés. Le mécanisme principal de l'acidification du contenu ruminal est assez simple puisqu'il concerne l'équilibre 'acide ϕ tampon ϕ base' du jus de rumen. L'acidose latente résulte avant tout d'un déséquilibre entre des fermentations ruminales intenses, qui produisent des acides gras volatils (de cinq à huit kg d'acides purs par jour chez un bovin adulte), et leur neutralisation qui est principalement liée au recyclage de substances tampons apportées par la salive, phénomène étroitement lié aux activités masticatoires, ainsi que par l'absorption des acides par la paroi ruminale.

Cependant, en pratique, l'acidose est un phénomène complexe qui dépend en fait de nombreux facteurs étiologiques. Une partie de ceux-ci peut être prise en compte à travers des indicateurs de risque (cf. ci-dessous) dont il convient de respecter les seuils limites.

Compte tenu de l'objectif de ce travail, la question des méthodes de mesure ne sera pas abordée. Deux outils principaux ont été utilisés pour le traitement des informations: la méta-analyse et la modélisation mécaniste. Les démarches de méta-analyse sont appliquées sur de vastes ensembles de données expérimentales rassemblées au sein de bases précisément codées (Sauvant *et al.* 2008a). Ces approches présentent l'intérêt de fournir des modèles empiriques simples des effets des principaux facteurs de variation sur des indicateurs d'acidose. Ces approches ont été pratiquées à la fois sur des données statiques et des données dynamiques (cf. plus loin). La modélisation mécaniste est utilisée depuis longtemps en nutrition (Sauvant, 1992). Son application aux phénomènes biologiques impliqués dans l'acidose permet de construire des modèles qui représentent au mieux les systèmes biologiques impliqués, ainsi que les principales articulations dynamiques entre les différents mécanismes pris en compte dans un modèle.

RÉSULTATS

Les composantes statiques de l'acidose

La majeure partie des résultats produits sur l'acidose concerne des mesures moyennées sur plusieurs heures et sur plusieurs jours, qui sont ensuite rapportées à l'échelle de la journée. Cette information, de nature statique mais largement disponible, permet de disposer d'un riche substrat pour mettre en œuvre des méta-analyses. Les lignes qui suivent rapportent les principaux aspects à retenir de ces études. Une limite majeure liée à l'interprétation de ces données réside dans la façon de les créer, c'est-à-dire dans le fait qu'elles ignorent certaines composantes dynamiques essentielles à connaître pour interpréter au mieux les résultats et évaluer les risques d'acidose.

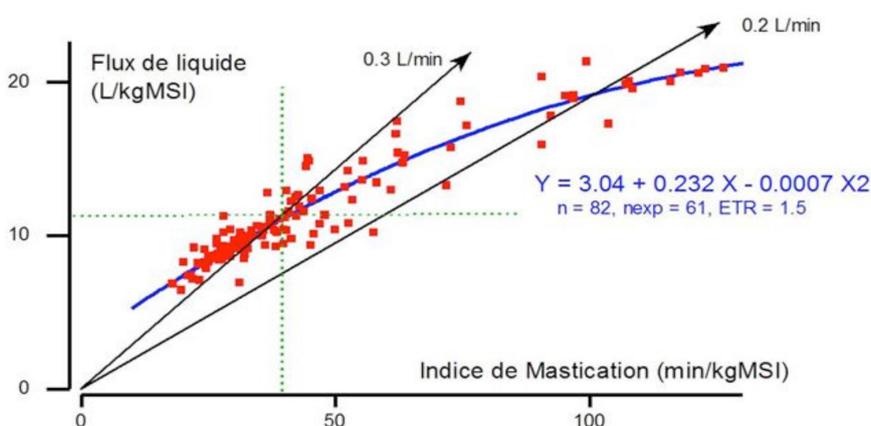


Figure 1 : Influence de l'Indice de Mastication du régime (min de mastication/kg MS ingérée) sur le flux de liquides transitant au duodénum (L/kg MS ingérée) chez les bovins (Sauvant et Mertens, 2006).

Avant d'aborder les causes liées aux rations, il convient de rappeler que les mécanismes de base sont assez bien quantifiés. En effet, chaque minute de mastication induit une sécrétion salivaire de 200 à 250 mL chez un bovin adulte. Ce flux correspond à environ trois à quatre grammes de tampons recyclés par minute de mastication. De ce fait, une relation étroite associe l'Indice de Mastication (IM) exprimé en fonction de la quantité de Matière Sèche Ingérée (IM, min/kgMSI) et d'une part, le flux de liquide sortant du rumen (L/kgMSI) (figure 1) et d'autre part, le pH des contenus ruminiaux

(figure 2). Au pH seuil minimum de 6 correspond un IM d'environ 40 min/kgMSI, un flux salivaire d'environ 10-12 L/kgMSI. Un pH inférieur à 6 est également associé à un rapport acétate/propionate faible (Sauvant & Peyraud, 2010) qui induit une partition des nutriments énergétiques vers les réserves plutôt que vers la mamelle. En conséquence, un IM inférieur à 40 min/kg MSI induit une chute du taux butyreux (TB) du lait (Sauvant *et al.* 2008b).

Les facteurs alimentaires explicatifs de l'acidose

La fibrosité des rations

La fibre chimique ou teneur en paroi végétale des régimes, évaluée par la teneur en NDF (sigle anglais signifiant Fibre au Détergent Neutre) exprimée en % de la matière sèche (MS, peut varier de 25 à plus de 80%). Les fourrages ont en général des valeurs supérieures à 40% de NDF et les concentrés, des valeurs inférieures. Cette teneur joue sur la dureté et la résistance des tissus végétaux et donc, sur le travail masticatoire de l'animal. Un accroissement de 10%MS de paroi nécessite en moyenne une augmentation de trois à quatre minutes de mastication/kg MS ingérée chez le bovin et 10 fois plus chez les petits ruminants (Sauvant *et al.* 2008a). La paroi végétale joue un rôle sécurisant majeur de l'écosystème ruminal car elle est dégradée lentement par les bactéries cellulolytiques du rumen (de 2 à 8%/heure) et qu'elle est inversement corrélée à la quantité de contenus cellulaires qui contiennent les éléments les plus acidogènes. On estime qu'un régime doit contenir au moins 35%MS de NDF pour assurer un état ruminal normal et sécuritaire. En revanche, la teneur en NDF du régime ne peut être trop élevée car elle est inversement liée à la digestibilité de la matière organique (dMO%), donc à la valeur énergétique des régimes. En effet 10%MS de paroi en plus réduit d'environ 2,5 à 3 points de dMO, soit 3 à 5% de la valeur énergétique de la ration. De plus, les régimes riches en paroi végétale possèdent une valeur d'encombrement élevée liée au fait que la durée de mastication journalière est, au maximum, de l'ordre de 1000 min/j (Sauvant *et al.* 2008b). Lorsque cette durée approche ce seuil, le niveau d'ingestion de MS diminue avec des régimes plus riches en parois (Sauvant *et al.* 2014), ainsi la paille nécessite près de deux heures de mastication/kg MS, en conséquence son ingestion de MS/j en distribution seule ne dépassera pas cinq à sept kg.

La fibre physique correspond à la taille et à la longueur des particules qui constituent le régime des animaux. En effet, un accroissement de la taille des particules augmente la durée de mastication, donc l'insalivation. Parmi les méthodes existantes pour l'évaluer, la méthode de référé-

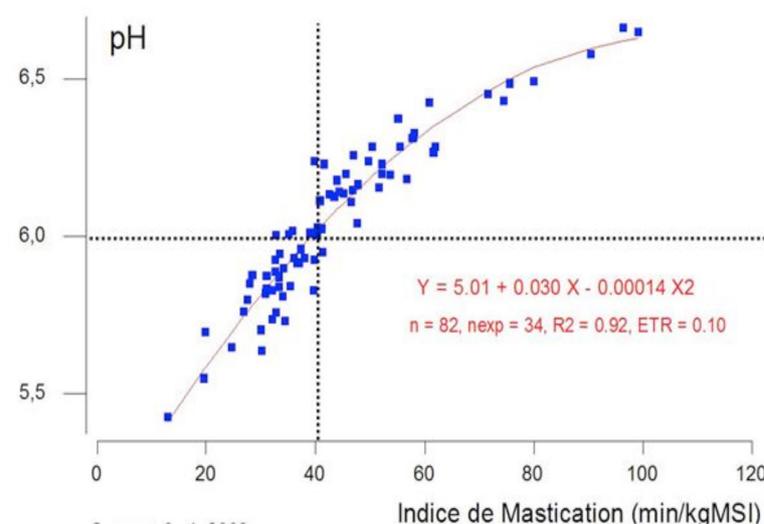


Figure 2 : Influence de l'Indice de Mastication (min/kg MS ingérée) sur le pH moyen du rumen chez les bovins (Sauvant *et al.* 2008a).

rence consiste à faire passer le régime à travers des tamis successifs pour en déduire la taille moyenne des trous d'un tamis théorique qui retiendrait 50% de la masse particulière. Ce critère, appelé à tort « taille particulière moyenne » ou TPM, est, par exemple en moyenne, de six à 12 mm pour des fourrages longs, de trois à huit mm pour de l'ensilage de maïs et en général de moins d'un mm pour des aliments concentrés du commerce. Sur la base de résultats de mesure du pH du rumen et du TB du lait, on estime qu'en dessous d'un seuil de trois à quatre mm un régime devient acidogène (Sauvant & Peyraud, 2010). Cette méthode des tamis est assez lourde à appliquer, bien qu'une variante plus facile à appliquer sur le terrain ait été proposée par l'Université de PennState aux USA (<http://extension.psu.edu/animals/dairy/nutrition/forages/forage-quality-physical/separator>). Cette méthode dite du « tamis secoueur » est parfois utilisée en France. Elle permet de séparer les particules en quatre groupes en fonction de la taille des trous des tamis : $P > 19\text{mm}$, $8 < P < 19\text{mm}$, $1.8 < P < 8\text{mm}$ et $P < 1.8\text{mm}$ (Yang & Beauchemin, 2006)). Une alternative plus simple à appliquer consiste à mesurer la proportion de la MS des particules retenue par un tamis de taille donnée. En général, on considère que le seuil est à deux mm et, sur la base de cette mesure, on estime qu'en dessous du seuil de $P2\text{mm} > 50\%$ MS un régime commence à être acidogène sachant qu'en dessous de 45%MS le risque s'accroît nettement.

La **figure 3** présente la diversité des aliments et des rations des bovins vis-à-vis de leurs teneurs en fibres physiques et chimiques. On y constate notamment que les rations complètes sont souvent en dessous des seuils recommandés et que les fourrages sont susceptibles de varier largement en fonction des traitements de hachage et broyage qui sont appliqués pour les ensilages. Les critères combinant les deux types de fibre permettent de contrôler la durée de la mastication. Il est intéressant de noter que ces deux types sont substituables

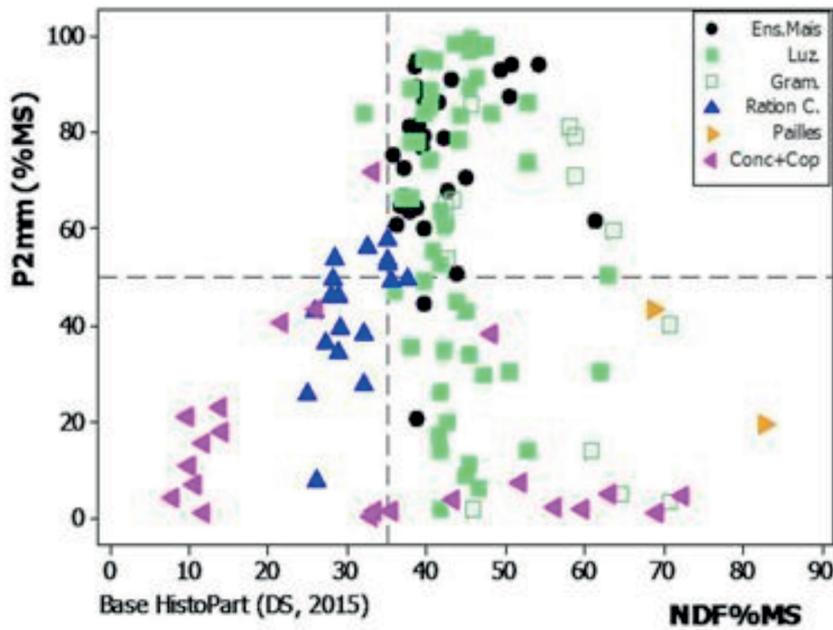


Figure 3 : Exemples de la diversité des teneurs en fibre chimique (NDF%MS) et en fibre physique (P2mm%MS) des aliments et des rations (Sauvant, np.). Ensilage de maïs (ronds noirs), luzerne (carrés verts pleins), graminées autres que le maïs (carrés verts ouverts), pailles broyées (triangles orange), concentrés et coproduits (triangles violets), rations complètes (triangles bleus).

comme le montre la **figure 4** ce qui peut présenter de l'intérêt en formulation des régimes, en particulier si on veut éviter les inconvénients liés à une teneur trop élevée en NDF (faible teneur en énergie...). Ainsi une durée de mastication un peu supérieure à 700 min/j, seuil de gros risque, peut être atteinte soit avec un régime riche en fibre chimique et pauvre en fibre physique (environ 40%NDF et P 2mm = 30%), soit réciproquement avec un régime pauvre en fibre chimique et riche en fibre physique (environ 25%NDF et P2mm = 60%).

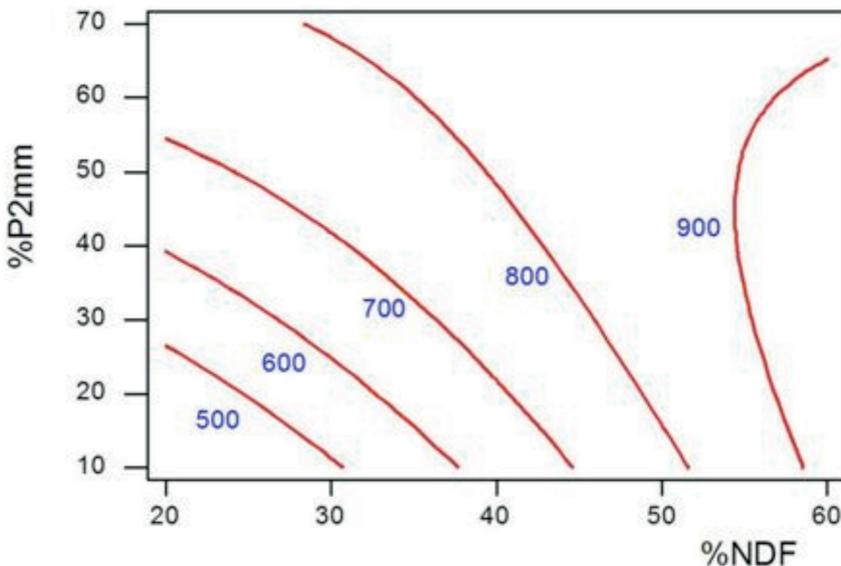


Figure 4 : Relations de substitution entre les teneurs en fibre chimique (NDF%MS) et en fibres physiques (P2mm%MS) vis-à-vis de la durée de mastication représentée par les courbes de niveau (min/j) des bovins.

Le concept de « fibre effective » (peNDF%MS) cherche à combiner les deux types de fibres à travers un critère synthétique. La teneur en NDF est multipliée par la proportion de la MS retenue par une grille de tamis de trous de taille standardisée, par exemple 1,8 mm, dans ce cas on parle de peNDF1.8 exprimé en %MS (Mertens, 1997). En France, pour éviter l'usage d'un tamis nécessitant un travail assez important, on suggère de caractériser simplement un régime par le pourcentage de NDF apporté par le fourrage long dans la ration (NDF%MS) recommandé comme devant représenter plus de 25% MS du régime, sachant par exemple que les troupeaux laitiers exploités de manière intensive présentent des teneurs en NDF généralement situées entre 20 et 30%MS, c'est-à-dire autour de la limite recommandée. La précision du critère NDF%MS est assez comparable à celle de peNDF1,8 comme indicateur préventif de l'acidose. Un

autre critère simple est la proportion d'aliments concentrés car elle joue à la fois sur la fermentescibilité des substrats et sur la taille des particules. Au-delà de 40-50% de la MS de la ration, le risque d'acidose augmente rapidement.

Les facteurs non fibreux du contrôle de l'acidose du rumen

Différents autres facteurs alimentaires sont susceptibles de jouer un rôle dans l'acidose du rumen, on peut en particulier citer :

- le pouvoir tampon des aliments : les tampons jouent un rôle essentiel dans l'homéostasie du pH de l'écosystème ruminal. La mesure du pouvoir tampon du jus de rumen par titrimétrie a été proposée pour mieux évaluer le risque et l'état d'acidose du rumen (Brugère et al. 1990). Parmi les sources de tampon, les aliments possèdent un pouvoir tampon intrinsèque (Giger-Reverdin et al. 2002) susceptible de modifier les variations du pH du rumen s'ils représentent une part majoritaire de la ration. Ce pouvoir tampon est principalement lié aux teneurs en substances minérales et en paroi végétale des aliments ;

- la matière organique fermentescible et l'amidon rapidement dégradable : l'ingestion de rations riches en composés organiques rapidement fermentescibles (sucres solubles, pectines...) ou en amidon rapidement digestible (ARD) dans le rumen peut entraîner une acidose (Peyraud, 2000; Peyraud & Apper-Bossard, 2006). Ainsi, l'orge ou le blé, riches en ARD, sont plus acidogènes que le maïs grain ou le sorgho dont les amidons sont lentement dégradables (Giger-Reverdin & Sauvant, 2001) ;
- les aliments possèdent un pouvoir acidogène intrinsèque qui combine leur pouvoir tampon, leur vitesse de fermentation ainsi que parfois leur acidité (cf. les ensilages). Ce pouvoir acidogène peut se mesurer *in vitro* et permettre ainsi un classement des aliments utilisable en formulation (Giger-Reverdin & Sauvant, 2001; Rustomo *et al.* 2006).
- la balance électrolytique (BE, mEq/kg MS) a été universellement définie comme la somme ionique $BE = [Na+K]-[Cl+0.6S]$, formule parfois simplifiée en ne tenant pas compte de S qui est difficile et cher à mesurer correctement. Une valeur faible, voire négative, de BE indique une ration acidogène et réciproquement une valeur de BE élevée est un critère sécuritaire par rapport à l'acidose (>150-200 mEq/kg MS). La BE concerne principalement le niveau d'acidose métabolique, cependant elle est facilement corrigée par un apport de tampon tel que le bicarbonate (BE d'environ 2000) qui tamponne efficacement le rumen. Les valeurs de BE des aliments s'échelonnent globalement entre 0 et 350 mEq/kg MS. C'est le bicarbonate qui est le principal tampon de la salive : un bovin en recycle d'un à quatre kg/jour. L'apport de tampons par la ration, à raison d'un à deux % de la MS ingérée, constitue un moyen pratique de contrôler les risques d'acidose du rumen (cf la synthèse de Meschy *et al.* 2004).

Les facteurs « microbiens » liés à l'acidose du rumen

Une meilleure connaissance des nombreux micro-organismes du rumen (bactéries à 10¹⁰/L, des protozoaires 10⁶/L, des champignons et des levures à 10⁵/L) est un défi que des chercheurs ont relevé depuis des décennies. Ces études, difficiles et coûteuses, ont permis d'identifier par exemple les bactéries les plus impliquées lorsqu'il y a acidose du rumen (Weimer *et al.* 2010). Depuis quelques années, les progrès de la métagénomique et de la métabolomique ont commencé à faire connaître le microbiote ruminal sous un autre angle et à ouvrir une nouvelle aire de recherches sur le rumen (voir les définitions de Morgavi *et al.* 2013). Il est clair que microbiote et hôte ont eu une co-évolution adaptative qui les rend dépendant mutuellement à un niveau encore plus étroit que ce que l'on pensait (Morgavi *et al.* 2013). Il est clair également que les rations intensives ont remis en cause les résultats de cette co-évolution et qu'il est nécessaire d'étudier la variabilité individuelle, par le phénotypage, permettant d'identifier des individus et des microbiotes les mieux adaptés et les plus robustes vis-à-vis des régimes alimentaires modernes. Cette robustesse concerne en particulier

la capacité de résilience des ruminants à haut potentiel face aux causes de l'acidose.

L'apport de probiotiques

Il y a eu d'assez nombreuses recherches sur l'éventuel intérêt d'apporter des probiotiques tels que des levures pour prévenir les risques d'acidose. Des mécanismes ont été avancés (Jouany, 2006), des synthèses quantitatives ont permis de mettre en évidence des effets significatifs, mais d'ampleur relativement limitée (Desnoyers *et al.* 2009a; Sauvant *et al.* 2004).

Les composantes dynamiques de l'acidose

Variations intra-jour : la dynamique post-prandiale

Cinétique moyenne

Aussitôt après un repas, le pH du rumen diminue rapidement pour atteindre un minimum entre deux et quatre heures, puis remonte un peu plus lentement que lors de la chute, de ce fait, les cinétiques postprandiales du pH sont souvent dissymétriques. Outre la teneur moyenne du pH, d'autres critères ont été créés à partir de ces cinétiques, comme la durée de pH en dessous d'une valeur seuil (par exemple 6,0), la chute de pH durant la période postprandiale proximale, l'aire sous la courbe d'évolution post prandiale du pH etc.... Dans une étude de synthèse quantitative de la littérature (Dragomir *et al.* 2008), nous avons montré que tous ces critères étaient en fait étroitement corrélés entre eux. Aussi la valeur moyenne du pH est-elle la donnée la plus fréquemment utilisée.

Relations entre cinétiques d'ingestion et de pH ruminal

Des études sur les variations individuelles, conduites chez des chèvres laitières ont montré que la vitesse d'ingestion constituait une caractéristique individuelle répétable (Giger-Reverdin *et al.* 2014). De plus, il est apparu que les variations postprandiales du pH étaient concernées par ces variations. En effet, les animaux qui mangent rapidement (« gloutonnes ») présentent une chute de pH plus rapide que celles qui mangent lentement (« grignoteuses »). Compte tenu de l'importance de ces variations, nous avons développé un modèle mathématique dynamique intégrant à la fois les phénomènes d'ingestion et mastication et ceux de digestion, plus précisément d'évolution du pH. Ce modèle a permis de conclure sur la véracité de l'articulation temporelle entre ces différents critères (Giger-Reverdin *et al.* 2010).

Variations inter-jours : les épisodes d'acidose

Il a été montré depuis longtemps que les animaux recevant des régimes acidogènes présentaient un appétit variable d'un jour à l'autre. Plus récemment, Schwartzkopf-Genswein *et al.* (2004) ont montré que des bovins en croissance présentaient des évolutions cycliques sur plusieurs jours et que celles-ci étaient globalement inversement liées au pH du rumen. Une chute de pH induit une chute d'ingestion qui ne retrouve l'état initial

qu'au bout de trois à quatre jours et à mesure de cette remontée, le pH diminue à nouveau etc... Pour mieux caractériser ce phénomène épisodique, nous avons regroupé et modélisé les évolutions de 18 chèvres en production ingérant un régime riche en concentré et repérées comme subissant un épisode d'acidose (Desnoyers *et al.* 2009b). Il apparaît qu'après une chute brutale et imprévisible du pH au jour J0, celui-ci revient à la normale dès J1, pour être à un niveau plus élevé les jours suivants. Par contre, l'ingestion de matière sèche ne chute qu'à J2 et est minimale à J3-J4. D'autre part, la production de lait ne chute qu'à J3 et est minimale à J4-J5. Les deux cinétiques d'ingestion et de production très décalées par rapport à l'acidose ruminale ne reviennent que lentement au niveau initial qui n'est atteint qu'en 15 à 20 jours. Les raisons physiologiques du décalage entre les différentes chutes et du temps que mettent les animaux à récupérer restent à déterminer.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Grâce aux nombreuses recherches des dernières décennies, l'acidose du rumen est de mieux en mieux connue et sa prédiction quantitative en fonction de différents critères a largement progressé. Pour tous ces critères, des seuils ont été précisément définis, les principaux ont été évoqués dans ce travail. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter à la publication de Sauvant et Peyraud (2010). Il est donc possible, en fonction des critères mesurés dans un contexte donné, d'évaluer au mieux l'état d'acidose d'un animal ou d'un groupe d'animaux. Cette approche par modélisation va continuer à progresser tandis que les recherches sur le microbiote du rumen laissent entrevoir de nouveaux espoirs sur les critères animaux explicatifs d'un terrain à risque. Il est vraisemblable que prochainement, il sera possible de définir des types de couples « microbiote x hôte » plus ou moins sensibles à l'acidose et, si ces propriétés sont héréditaires, la sélection génomique pourrait être le meilleur moyen d'atténuer les risques d'acidose dans nos troupeaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Brugère H, Champy R, Polack B, Rousseau Y. Examen du jus de rumen et surveillance de l'alimentation des bovins. Apport de la titrimétrie. *Recl Med Vet.* 1990; 166: 133-42.
- Desnoyers M, Giger-Reverdin S, Bertin G, Duvaux-Ponter C, Sauvant D. Meta-analysis of the influence of *Saccharomyces cerevisiae* supplementation on ruminal parameters and milk production of ruminants. *J Dairy Sci.* 2009a; 92: 1620-32.
- Desnoyers M, Giger-Reverdin S, Duvaux-Ponter C, Sauvant D. Modeling of off-feed periods caused by subacute acidosis in intensive lactating ruminants: Application to goats. *J Dairy Sci.* 2009b; 92: 3894-906.
- Dragomir C, Sauvant D, Peyraud J-L, Giger-Reverdin S, Michalet-Doreau B. Meta-Analysis of 0-8 hours post-prandial kinetics of ruminal pH. *Animal.* 2008; 2: 1437-48.
- Espinasse J. Les indigestions des bovins adultes. 1. Etiologie et Pathogénie. *Rev Med Vet.* 1969; 120: 615-42.
- Espinasse J. Les indigestions des bovins adultes. 2. Traitement et Prophylaxie. *Rev Med Vet.* 1970; 121: 685-703.
- Espinasse J. Les indigestions des bovins adultes. 3. Diagnostic. *Rev Med Vet.* 1971; 122: 137-59.
- Giger-Reverdin S & Sauvant D. Meta analysis of the acidogenicity of ingredients. *J Dairy Sci*, 84 (Suppl 1), *J Anim Sci*, 79 (Suppl 1), *Poult Sci*, 80 (Suppl 1). 2001: 79, (Abst 328).
- Giger-Reverdin S, Duvaux-Ponter C, Sauvant D, Martin O, Nunes do Prado I, Müller R. Intrinsic buffering capacity of feedstuffs. *Anim Feed Sci Technol.* 2002; 96: 83-102.
- Giger-Reverdin S, Desnoyers M, Duvaux-Ponter C, Sauvant D. Modelling within-day variability in feeding behaviour in relation to rumen pH: application to dairy goats receiving an acidogenic diet. In: 7th International Workshop on Modelling Nutrient Digestion and Utilisation in Farm Animals, Paris, France, 10-12 September, 2009. Sauvant D, Van Milgen J, Faverdin P, Friggens N, editors. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands; 2010, pp. 121-9.
- Giger-Reverdin S, Tessier J, Dhumez O, Eymard A, Duvaux-Ponter C. Variations individuelles du comportement d'ingestion d'un ruminant. Application au phénotypage de chèvres laitières. In: 21^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants; 2014. pp. 30.
- Jouany JP. Optimizing rumen functions in the close-up transition period and early lactation to drive dry matter intake and energy balance in cows. *Anim Reprod Sci.* 2006; 96: 250-64.
- Kleen JL, Hooijer GA, Rehage J, Noordhuizen JPTM. Subacute ruminal acidosis (SARA): a review. *J vet Med, Ser A.* 2003; 50: 406-14.
- Kleen JL, Hooijer GA, Rehage J, Noordhuizen JPTM. Rumenocentesis (rumen puncture): a viable instrument in herd health diagnosis. *Dtsch Tierärztl Wochenschr.* 2004; 111: 458-62.
- Krause KM & Oetzel GR. Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: a review. *Anim Feed Sci Technol.* 2006; 126: 215-36.
- Martin C, Brossard L, Doreau M. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale latente et conséquences physiopathologiques et zootecniques. *Prod Anim.* 2006; 19: 93-108.
- Mertens DR. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. *J Dairy Sci.* 1997; 80: 1463-81.
- Meschy F, Bravo D, Sauvant D. Analyse quantitative des réponses des vaches laitières à l'apport de substances tampon. *Prod Anim.* 2004; 17: 11-8.
- Morgante M, Stelletta C, Berzaghi P, Giancesella M, Andrighetto I. Subacute rumen acidosis in lactating cows: an investigation in intensive Italian dairy herds. *J anim Physiol anim Nutr.* 2007; 91: 226-34.
- Morgavi DP, Kelly WJ, Janssen PH, Attwood GT. Rumen microbial (meta)genomics and its application to ruminant production. *Animal.* 2013; 7: 184-201.
- Peyraud JL. La dynamique de dégradation de l'énergie est un élément déterminant de la fibrosité des régimes. In: 7^{èmes} Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants; 2000. pp. 183-6.

- Peyraud J-L & Apper-Bossard E. L'acidose latente chez la vache laitière. *Prod Anim.* 2006; 19: 79-92.
- Rustomo B, Cant JP, Fan MZ, Duffield TF, Odongo NE, McBride BW. Acidogenic value of feeds. I. The relationship between the acidogenic value of feeds and in vitro ruminal pH changes. *Can J Anim Sci.* 2006; 86: 109-17.
- Sauvant D. La modélisation systémique en nutrition. *Reprod Nutr Develop.* 1992; 32: 217-30.
- Sauvant D, Giger-Reverdin S, Schmidely P. Rumen acidosis: modeling ruminant response to yeast culture, In: *Nutritional biotechnology in the feed and food industries. Proceedings of Alltech's 20th Annual Symposium: re-imagining the feed industry, Lexington, Kentucky, USA, 23-26 May 2004.* Nottingham University Press, Stamford UK; 2004, pp. 221-9.
- Sauvant D, Giger-Reverdin S, Meschy F. Le contrôle de l'acidose ruminale latente. *Prod Anim.* 2006; 19: 69-78.
- Sauvant D, Schmidely P, Daudin JJ, St-Pierre NR. Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. *Animal.* 2008a; 2: 1203-14.
- Sauvant D, Giger-Reverdin S, Archimède H, Baumont R. Modélisation des relations entre l'activité masticatoire des ruminants, les caractéristiques du régime et sa digestion. In: *15èmes Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants; 2008b.* pp. 331-4.
- Sauvant D & Peyraud J-L. Calculs de ration et évaluation du risque d'acidose. *Prod Anim.* 2010; 23: 333-42.
- Sauvant D, Nozière P, Baumont R. Development of a mechanistic model of intake, chewing and digestion in cattle in connection with updated feed units. *Anim Prod Sci.* 2014; 54: 2112-20.
- Schwartzkopf-Genswein KS, Beauchemin KA, McAllister TA, Gibb DJ, Streeter M, Kennedy AD. Effect of feed delivery fluctuations and feeding time on ruminal acidosis, growth performance, and feeding behaviour of feedlot cattle. *J Anim Sci.* 2004; 82: 3357-65.
- Weimer PJ, Stevenson DM, Mertens DR. Shifts in bacterial community composition in the rumen of lactating dairy cows under milk fat-depressing conditions. *J Dairy Sci.* 2010; 93: 265-78.
- Yang WZ & Beauchemin KA. Physically effective fiber: method of determination and effects on chewing, ruminal acidosis, and digestion by dairy cows. *J Dairy Sci.* 2006; 89: 2618-33.