

L'acidose latente chez la vache laitière

J.-L. PEYRAUD, E. APPER-BOSSARD

INRA, Agrocampus Rennes, UMR Production du Lait, F-35590, Saint-Gilles,

Courriel : jean-louis.peyraud@rennes.inra.fr

1 / L'acidose «latente»

L'utilisation simultanée de rations à forte densité énergétique visant à satisfaire les besoins d'animaux au potentiel laitier élevé, l'incorporation importante des céréales dans les rations et une finesse de coupe accrue des fourrages pour en accroître l'ingestion sont autant de facteurs accroissant les risques d'acidose latente d'origine ruminale chez la vache laitière et plus généralement chez tout ruminant laitier fort producteur. Les animaux doivent alors traiter des quantités très élevées de matière organique rapidement fermentescible alors que dans le même temps la durée de mastication et l'insalivation par kg de MS ingérée diminuent (Sauvant *et al* 1990). Cela met en péril le contrôle de l'acidité dans le rumen et à terme l'homéostasie de l'animal. Les états d'acidose latente, résultent à la fois d'un effet lié à la production importante d'acidité dans le rumen mais sans doute aussi, de l'activité métabolique intense de ces animaux. Le métabolisme cellulaire est en effet une source de protons : acides cétoniques, acide lactique, et surtout acide carbonique, terme ultime du métabolisme. L'équilibre acido-basique du sang est normalement très finement régulé de manière à n'autoriser que des variations minimales du pH sanguin ; mais les possibilités de régulations peuvent être dépassées et la première réponse de l'animal, face à une situation de crise, sera alors la réduction passagère de l'ingestion.

Les signes les plus couramment cités des états d'acidose latente sont une baisse et surtout une irrégularité de l'ingestion (Enemark et Jorgensen 2001), une moindre efficacité digestive et métabolique qui s'exprime par des pertes de production et une chute du taux butyreux du lait (Espinasse *et al* 1995) ainsi qu'une sensibilité accrue à d'autres troubles de la santé, notamment les troubles digestifs (retournement de

caillette, parakérose) et locomoteurs (Martin *et al* 2006).

En l'absence de critères précis d'objectivation de l'état du troupeau, peu d'enquêtes épidémiologiques ont permis de préciser l'importance de l'acidose latente en élevage. Toutefois, on s'accorde aujourd'hui pour admettre qu'elle constitue une préoccupation majeure de la nutrition des ruminants. Une enquête réalisée au Danemark sur plus de 320 000 vaches a montré que l'acidose latente représentait environ 22 % des troubles diagnostiqués de la digestion (Enemark et Jorgensen 2001). Après avoir rappelé brièvement les paramètres descripteurs de l'acidose ruminale et de l'acidose métabolique latentes et le lien possible entre acidose ruminale et métabolique, l'objectif de ce texte est de faire le point sur l'état actuel des connaissances permettant de dégager les principales causes et phénomènes impliqués dans l'apparition d'acidose latente et de dégager des pistes pour limiter les risques et proposer, à terme, un système d'évaluation des rations.

2 / Evaluation du degré d'acidose ruminale et métabolique

2.1 / Critères d'évaluation de l'équilibre acido-basique du rumen

Le pH est le principal paramètre d'évaluation du degré d'acidose ruminale compte tenu de ses effets multiples sur la digestion ruminale : modification des populations microbiennes et de l'épithélium ruminal, déviations fermentaires, chute de la digestibilité des fibres (Sauvant *et al* 2006, Martin *et al* 2006). Toutefois, il convient de considérer l'intervalle de temps pris en compte dans la mesure du pH car celui-ci varie au cours de la journée. D'autres

critères d'évaluation de l'état d'acidose ruminale que le pH moyen (pH_{moy}) peuvent être considérés. En particulier, la durée pendant laquelle le pH reste inférieur à une valeur seuil traduirait mieux les irrégularités des fermentations au cours du nyctémère mais ne semble pas avoir un pouvoir explicatif et prédictif des perturbations digestives occasionnées par l'acidose latente ruminale plus important que pH_{moy} (Dragomir *et al* 2003). En outre pH_{moy} et $\text{pH}_{<6,0}$ sont assez étroitement corrélés (Sauvant *et al* 1999) et ces auteurs ont proposé de retenir comme seuil minimal du pH moyen admissible pour éviter les risques, la valeur de 6,25 ce qui correspond à un $\text{pH}_{<6,0}$ de 4 heures par jour.

Lorsque le pH s'abaisse, les proportions d'acétate (C2) diminuent généralement au profit du propionate (C3) (Martin *et al* 2006). Le ratio C2/C3 peut donc aussi être utilisé pour apprécier l'état d'acidose ruminale. Un ratio supérieur à 3,0 peut être considéré comme normal alors qu'un ratio de 2,5, ou moins, traduit un état d'acidose latente (Sauvant et van Milgen 1995, Sauvant *et al* 2006).

2.2 / Caractérisation de l'équilibre acido-basique du sang et de l'acidose métabolique

L'homéostasie acido-basique est une fonction vitale pour l'organisme, les paramètres sanguins de l'équilibre acido-basique sont donc très finement régulés. L'évaluation de l'équilibre acido-basique implique la connaissance du pH, de la pression partielle en CO_2 (pCO_2) et des concentrations en bicarbonates (HCO_3^-), ces trois paramètres étant reliés par l'équation d'Henderson-Hasselbach ($\text{pH} = 6,1 + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{0,031 \times \text{pCO}_2} \right)$). Le critère pH doit être utilisé avec précaution car l'échelle logarithmique masque l'ordre de grandeur des concentrations qui est très faible (de l'ordre du nmole/L) et

minimise les variations de concentration en protons qui sont en réalité importantes (Davenport 1971). Ainsi un changement de pH de 7,40 à 7,35 (qui peut être considérée comme une valeur minimale extrême) correspond à une concentration en proton qui varie de 40 à 45 nmoles/L. L'excès de base, constitue la meilleure évaluation de la fraction non respiratoire (ou encore métabolique) de l'équilibre acido-basique (Sharipo *et al* 1992). Son calcul intègre le pH, la pCO₂, ainsi que l'hémoglobine et parfois les protéines plasmatiques qui sont également des vecteurs de protons (cf § 3.2). L'excès de base correspond à une évaluation de la quantité totale de base en excès ou en défaut et indique le nombre de moles d'acide qu'il faut ajouter (ou de base s'il est négatif) pour ramener le pH à sa valeur normale. Chez la vache en condition normale, le pH, la pCO₂ et les bicarbonates sanguins sont voisins de 7,40, 40 mmHg et 24 mEq/L respectivement (Patience 1991, Brugère 2001). Le sang veineux possède des caractéristiques légèrement plus acides que celles du sang artériel (- 0,05 unité pH, + 5 à 10 mmHg de pCO₂, + 3 mmoles/L de HCO₃⁻) du fait de l'activité métabolique des organes. Le tableau 1 résume les caractéristiques du sang artériel qui permettent de conclure à un état d'acidose métabolique.

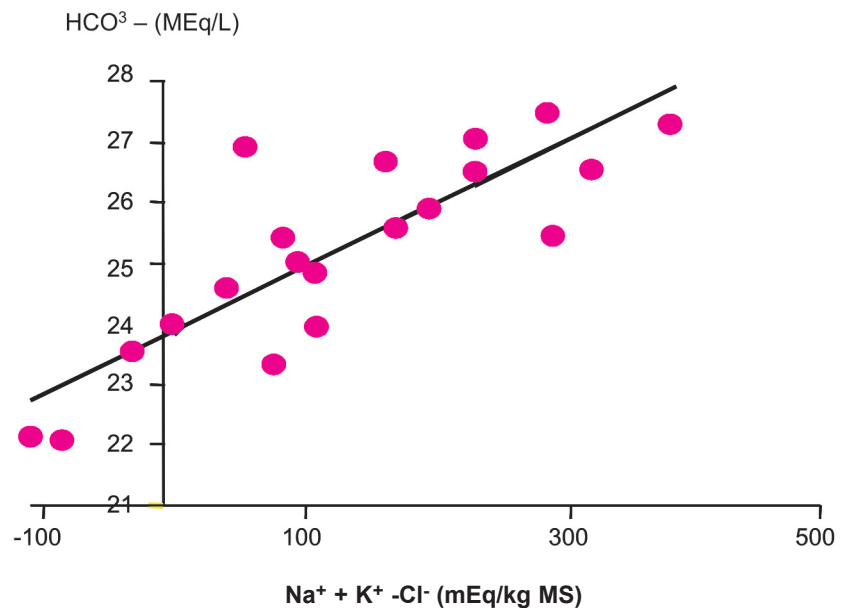
2.3 / Quels liens entre acidose latente ruminale et métabolique ?

L'acidose métabolique n'est pas nécessairement liée à l'acidose ruminale. Ainsi, chez des vaches soumises à des températures élevées (30°C environ) le pH du sang s'accroît car du fait de l'accroissement du rythme respiratoire pour maintenir la température corporelle le rythme d'élimination du CO₂ s'accélère (Schneider *et al* 1988, West *et al* 1991) alors que dans le même temps le pH ruminal et le ratio C2/C3 peuvent diminuer (Niles *et al* 1980). A l'inverse, de nombreux éléments constitutifs de la ration interviennent dans la régulation de l'équilibre acido-basique de l'animal sans avoir toujours des effets sensibles au niveau ruminal.

Tableau 1. Evolution des paramètres d'Henderson-Hasselbach en cas d'acidose métabolique.

	pH	PCO ₂	HCO ₃ ⁻	Excès base
Normal	7,40	40 mm Hg	24 mEq/L	3 mEq/L
Acidose aiguë	↓	Normal	↓	↓ (négatif)
Acidose latente	Normal	↓	↓	↓ (négatif)

Figure 1. Effet du bilan «électrolytique» de la ration sur l'équilibre acido-basique du sang (Apper-Bossard et Peyraud non publié).



C'est notamment le cas des acides faibles, des phosphates et surtout des ions forts de la ration (Constable 1999, Boyle et Lawrence 2003, Story *et al* 2004, Riond 2001).

Les cations sont échangés contre des protons, leur addition dans la ration fait ainsi diminuer la charge en protons, provoquant une augmentation du pH sanguin (ils ont un rôle alcalinisant). A l'inverse, les anions sont échangés contre des bicarbonates. Ils ont un rôle acidifiant. Trois ions (Na⁺, K⁺ et Cl⁻) sont prépondérants car ils sont totalement digestibles et ce sont des constituants essentiels du sang. Le soufre est parfois pris en compte mais son rôle est moins important que celui du chlore car il n'est pas totalement digestible et son pouvoir d'acidification est plus faible. L'équilibre ionique des rations est alors défini par le Bilan en Cations et Anions (BACA_{mEq/Kg MS} = Na⁺ + K⁺ - Cl⁻ - S⁻) ou par le Bilan Electrolytique (BE), qui n'intègre pas le soufre. Une synthèse bibliographique récente (Apper-Bossard et Peyraud 2004) montre bien que la modification de la composition en cations et anions de la ration permet de moduler l'équilibre acido-basique du sang (figure 1). Un déséquilibre en

apport ionique de la ration peut donc créer une situation d'acidose métabolique même chez des animaux ayant des niveaux d'ingestion faibles. Cette action est d'ailleurs recherchée au tarissement et début de lactation où un apport de BE négatif permet de limiter les fréquences d'apparition de fièvres de lait, en stimulant la mobilisation du Ca (Dishington 1975, Tucker *et al* 1992, Goff et Horst 1998).

Toutefois, l'acidose latente ruminale peut entraîner des changements dans l'équilibre acido-basique du sang mais les démonstrations expérimentales demeurent rares. Chez la vache laitière, Faverdin *et al* (1999) ont montré que les teneurs du sang en bicarbonate et l'excès de base étaient négativement corrélés aux concentrations en Acides Gras Volatils (AGV) du rumen lorsque des quantités importantes d'amidon de blé étaient ajoutées dans le rumen. Peyraud (2000) a également rapporté une forte diminution de l'excès de base du sang lorsque le maïs grain d'une ration à base d'ensilage de maïs finement haché était remplacé par du blé qui fermente beaucoup plus vite alors même que l'introduction de blé avait entraîné une chute des quantités ingérées. Goad *et al* (1998) et Brown *et al* (2000) ont également rapporté une diminution du pH sanguin, des teneurs en bicarbonates et de l'excès de base chez des bouvillons soumis à des challenges ruminants d'amidon rapidement fermentescible.

Lors de tests d'acidose latente réalisés sur des moutons, Brossard *et al* (2003) a également mis en évidence

une diminution des bicarbonates sanguins ainsi qu'une latence de plusieurs jours à l'issue du test pour que les niveaux de bicarbonates sanguins retrouvent leur valeur initiale. Ainsi avec des rations riches en concentré qui réduisent en plus le flux de salive, une proportion plus importante de bicarbonates doit être dérivée du sang. Ceci réduit l'excès de base du sang, qui, s'il n'est pas compensé par la respiration ou des mécanismes rénaux (cf § 3.2) peut conduire à l'acidose métabolique.

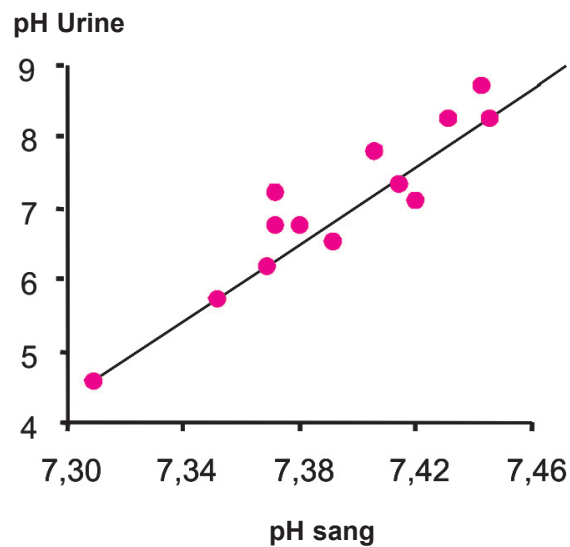
3 / Mécanismes impliqués dans la régulation du pH

3.1 / Régulation des flux de protons au niveau ruminal

Le phénomène acidogène de base est lié à la fermentation de la matière organique qui produit des acides organiques (AGV, lactate), des gaz et des corps microbiens. De Smet *et al* (1995) ont clairement mis en évidence la relation entre la chute du pH ruminal et la vitesse de dégradation *in situ* de la matière organique. Ce sont principalement les glucides des contenus cellulaires (amidon, sucres) qui sont en cause car les glucides pariétaux sont dégradés beaucoup plus lentement, les triglycérides sont hydrolysés mais ils représentent une faible proportion de la ration et les acides gras ne sont eux-mêmes pas hydrolysés. Les protéines quant à elles peuvent aussi produire des acides organiques lorsque la dégradation va jusqu'au stade de la désamination mais cette dégradation produit aussi des bicarbonates (Sauvant *et al* 1999).

Plusieurs mécanismes participent à amortir la production de protons dans le rumen et donc la chute du pH ruminal. En premier lieu, l'amidon peut être stocké au cours des repas par les protozoaires (Jouany et Thivend 1972), ce qui peut retarder le processus de leur fermentation de plusieurs heures. En second lieu, l'absorption des AGV est d'autant plus rapide que le pH s'abaisse car le degré de dissociation des acides diminue et ces acides sont absorbés plus rapidement sous leur forme acide. Ce phénomène est maintenant bien quantifié (Dijkstra *et al* 1993). Enfin, la stochiométrie des AGV, qui est caractérisée par une élongation des chaînes carbonées au fur et à mesure que le pH décroît, permet de stocker une quantité plus importante de carbone d'AGV, donc d'énergie, dans le rumen en minimisant les variations du pH. Sauvant *et al* (1995) ont émis l'hypothèse selon

Figure 2. Relation entre le pH sanguin et le pH urinaire.



laquelle les profils fermentaires seraient dépendants du statut énergétique des microbes et donc du rapport ATP/ADP du milieu. En cas d'excès de glucides rapidement fermentescibles, la partition des carbones entre les différentes voies métaboliques viserait à minimiser la production d'ATP ce qui expliquerait l'accroissement de la production d'acides à longue chaîne (0,12 ATP fourni/C) ou de C3 (0,66 ATP/C) au détriment du C2 (1 ATP/C).

3.2 / Régulation de l'équilibre acido-basique dans le milieu extracellulaire

L'organisme possède deux types de mécanismes pour maintenir l'équilibre acido-basique. Les tampons sanguins ont un effet immédiat de limitation des écarts du pH face à une altération en assurant la captation des protons et du CO₂ mais sans assurer leur élimination. Les sorties d'acides sont réalisées par des régulations physiologiques assurées par les poumons et le rein. De par sa concentration plasmatique importante (24 mmol/L, soit 146 g/L), le principal tampon sanguin est le bicarbonate (CO₂ + H₂O ↔ H₂CO₃). Le pK de la réaction (6,1) étant inférieur au pH sanguin normal, la capacité tampon du système est très forte dans le cas d'une acidification du pH sanguin. Les protéines plasmatiques ont également un rôle de tampon mais beaucoup plus faible que celui du bicarbonate. Leur concentration est en moyenne de 70 g/L et elles peuvent fixer 0,11 mEq de protons/g (Brugère 2001). A ces tampons, il est nécessaire d'ajouter l'hémoglobine. En

effet, elle peut fixer le CO₂ et des protons (Davenport 1971, Even 1983). La concentration en hémoglobine du sang (120 g/L) est supérieure à celle des protéines et l'hémoglobine peut fixer 0,183 mEq de protons/g. L'hémoglobine a une possibilité de fixation des protons environ 3 fois plus élevée que celle des protéines plasmatiques. Les tampons sanguins ont une action immédiate mais leur capacité d'action reste limitée et d'autres mécanismes doivent intervenir pour éliminer les protons.

La respiration, qui a pour fonction de rejeter le CO₂, est le mécanisme de régulation de l'équilibre acido-basique le plus efficace quantitativement. Il permet l'évacuation de 13 000 mEq de CO₂ par jour (Brugère 2001). Toutefois, cette voie ne concerne que l'élimination des acides volatils c'est-à-dire ceux qui sont capables de passer de la forme liquide à la forme gazeuse. C'est en fait le rein qui permet d'évacuer les acides non volatils essentiellement sous forme d'acide titrable ou d'ammonium (Paillard 1995). L'acidogénèse rénale est un mécanisme très efficace puisque le pH urinaire peut varier dans de très larges proportions et être abaissé de 3 unités en dessous du pH sanguin pour maintenir ce dernier dans la zone physiologique (figure 2). Le pH de l'urine ne peut toutefois pas descendre indéfiniment et une valeur seuil d'environ 4,5 est rapportée chez les mammifères (Mc Gilvery 1970, Houpt 1993). L'ammoniogénèse rénale (excrétion de NH₄⁺ formé par fixation d'un proton sur NH₃) est aussi un mécanisme fortement régulateur de l'équilibre acido-basique. La réabsorption des bicarbo-

nates au niveau rénal joue aussi un rôle essentiel dans la régulation du pH sanguin. En cas d'acidose métabolique, ils sont réabsorbés quasi-totalement alors qu'en cas d'alcalose, ils ne sont que partiellement réabsorbés. La teneur en bicarbonate de l'urine est donc également très variable.

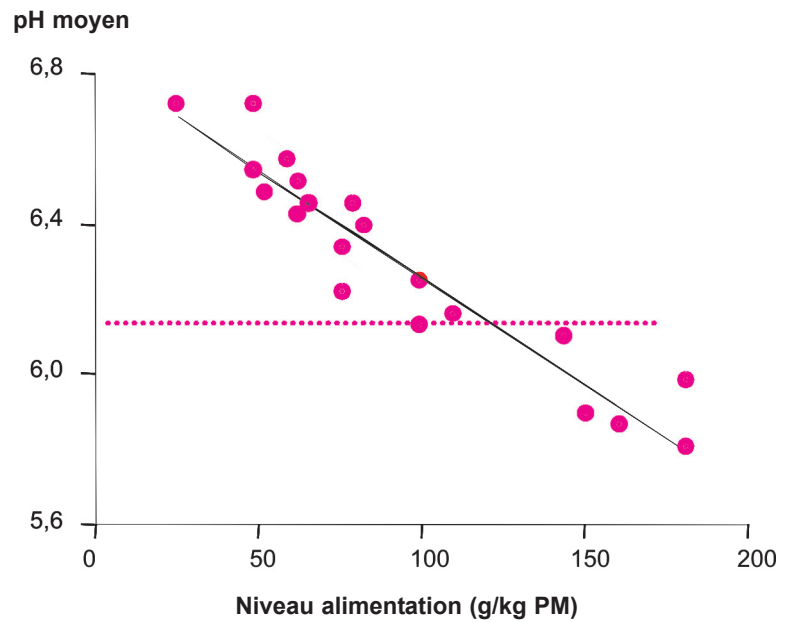
4 / Facteurs favorisant l'apparition d'acidose latente ruminale chez la vache laitière

Dans la suite du texte, les effets acidogènes des rations seront caractérisés à partir des évolutions du pH_{moy} et/ou de $pH_{<6,0}$ et du ratio C2/C3 du rumen ainsi que par l'évolution du taux butyreux du lait qui peut diminuer jusqu'à des valeurs très faibles en cas de rations acidogènes («*low fat milk syndrome*», Chalupa *et al* 1969) est relié positivement au pH du rumen avec des valeurs inférieures à 35 g/kg en moyenne pour des $pH_{moy} < 6,2$ (Sauvant *et al* 1999). L'irrégularité de l'ingestion est sans doute aussi un très bon critère d'état d'acidose latente mais ce paramètre n'est que rarement rapporté dans la littérature. De même à notre connaissance il n'y a pratiquement pas de données sur l'effet de la composition des rations sur les paramètres de l'acidose métabolique. Par souci de clarté nous abordons les facteurs de risques séparément les uns des autres mais il faut garder à l'esprit que l'apparition d'acidose latente résulte souvent de la conjonction de plusieurs facteurs.

4.1 / Niveau d'ingestion des rations

Les études conduites sur vaches laitières où le niveau d'ingestion de la MS a été modulé indépendamment de la nature du régime montrent que le pH du rumen est d'autant plus faible que le niveau d'ingestion est plus élevé (figure 3). L'accroissement du niveau d'ingestion réduit également le ratio C2/C3 (Rumsey 1970). Les risques d'apparition d'acidose latente concernent donc essentiellement les animaux à fort niveau d'ingestion. Ainsi chez la vache laitière, le pH ruminal est minimal (6,0) au second mois de lactation lorsque l'ingestion est maximale et remonte ensuite lentement avec la décroissance des quantités ingérées pour être maximal (6,7) au tarissement (Robinson *et al* 1986). C'est pourquoi les vaches laitières sont plus sensibles aux déséquilibres alimentaires durant les premiers

Figure 3. Effet du niveau d'ingestion sur le pH ruminal chez la vache laitière.



mois de lactation (figure 1, Martin *et al* 2006) ou lorsque les rations sont très ingestibles. Ainsi, les déviations fermentaires sont beaucoup plus marquées pour les rations riches en concentrés (Robinson *et al* 1986) ou pour des fourrages très finement hachés (Le Liboux et Peyraud 1998) lorsque les niveaux d'alimentation sont élevés.

Ces résultats s'expliquent probablement par l'accroissement de la quantité de matières à fermenter, notamment celle des glucides solubles et des amidons alors que dans le même temps, le transit des fibres est accéléré réduisant leur digestion ruminale. Ils peuvent aussi être reliés à une réduction du flux salivaire puisque les durées de mastication par kg de MS ingérée diminuent avec le niveau d'ingestion (Jarrige *et al* 1995).

4.2 / Taux d'incorporation et nature de l'amidon et des autres glucides non structuraux

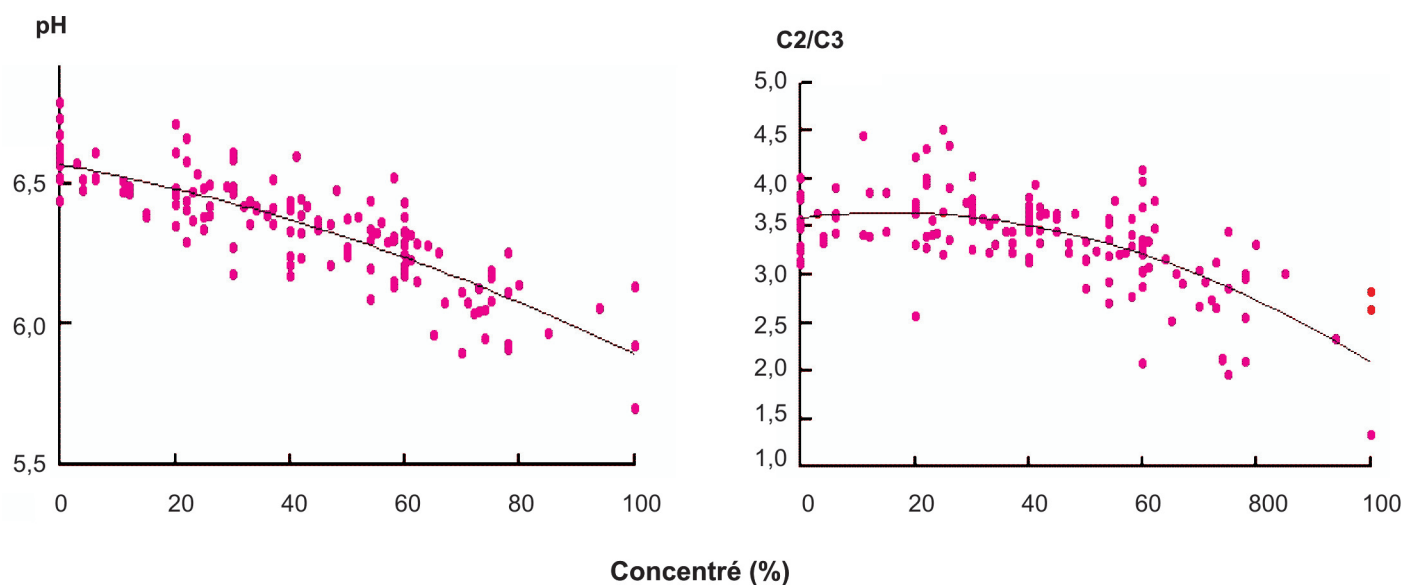
L'accroissement de la proportion de concentré réduit le pH du rumen ainsi que le ratio C2/C3. Toutefois, les effets ne deviennent sensibles que pour des taux d'incorporation supérieurs à 50 % comme le montre la synthèse de 44 publications correspondant à 145 rations rassemblées dans la figure 4.

Il est maintenant bien établi que les amidons des aliments se distinguent par leur dynamique de dégradation dans le rumen (Nocek et Tamminga 1991, INRA-AFZ 2004). On oppose les amidons «rapides» aux amidons «lents».

Les premiers se caractérisent par des fractions solubles très élevées (60 à 90 % de l'amidon) et des rythmes de dégradation rapides (10 à 40 %/h) des fractions insolubles. Leur dégradation dans le rumen est supérieure à 90 %. Il s'agit principalement de l'orge, de l'avoine et du blé et des sous-produits de meunerie. Les amidons lents comportent moins de 20 % de fractions solubles et ont un rythme de dégradation des fractions non solubles inférieur à 5-7 % par heure. Il s'agit principalement du maïs, du sorgho et du millet. Les amidons rapides ont un pouvoir acidogène prononcé. Ils réduisent le pH ruminal, le ratio C2/C3, l'ingestion totale et le taux butyreux du lait (Sauvant 1997). A partir d'une analyse quantitative de la littérature, cet auteur rapporte une chute d'ingestion moyenne de 0,5 à 0,6 kg MS/jour pour des vaches laitières à bon niveau de production et une chute du taux butyreux de 1,5 g/kg comparativement aux amidons lents. Les effets sont cependant très variables selon les essais.

Les effets du type d'amidon sont d'autant plus importants que la proportion de concentré est élevée. Ainsi les amidons rapides n'entraînent pas d'effets délétères sur le fonctionnement du rumen tant qu'ils représentent moins de 25-30 % de la ration (figure 5) mais ils exercent une influence négative très nette pour des taux d'incorporation supérieurs à 50-60 %, la réduction du ratio C2/C3 pouvant alors atteindre une unité. Les effets du type d'amidon sont aussi

Figure 4. Effet de l'accroissement de la proportion de concentré dans la ration sur les chutes de pH et du ratio C2/C3 du rumen (Peyraud non publié).



d'autant plus importants que le fourrage de la ration est haché plus finement. Ainsi, dans un essai conduit à Rennes (Peyraud 2000, non publié) nous avons montré que la substitution du maïs par du blé, incorporés à raison de 40 % de la ration, réduisait l'ingestion de 2 kg/jour pour des rations à base de fourrage grossier (52 % de particules > 4 mm) mais conduisait à des chutes d'ingestion encore plus prononcées (- 3,8 kg/j) et surtout à une ingestion très irrégulière (écart type inter jour de 1,5 kg) lorsque le fourrage était haché finement (27 % de particules > 4 mm). Ce sont des résultats typiques d'animaux en acidose latente. Dans les deux situations, le $\text{pH}_{<6,0}$ après chaque

grand repas s'est accru de 2,5 h avec le maïs à 5,0 h avec le blé malgré les chutes d'ingestion occasionnées par le blé. Le niveau de l'excès de base du sang était alors négatif en fin de repas.

Les glucides solubles et les pectines (pulpes de citrus, pulpes de betterave) sont aussi des aliments fortement acidogènes du fait de leur rythme de dégradation très élevé dans le rumen (Malestein *et al* 1984, De Smet *et al* 1995). Le pouvoir acidogène des pulpes, mesuré *in vitro* est même supérieur à celui du blé ou de l'orge (Giger-Reverdin *et al* 1999). Le critère acidogène des pectines a été vérifié *in vivo* chez les vaches laitières recevant 25 % du glucide expérimental, le

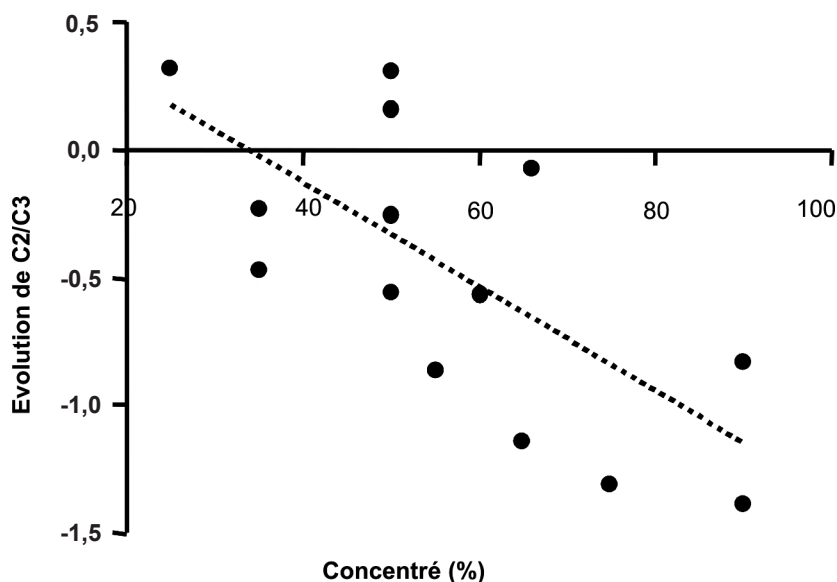
pH_{moy} a été plus faible (6,20 vs 6,31) et la chute postprandiale du pH a été plus marquée avec des pulpes de citrus et de betterave qu'avec du blé (Peyraud et Widjyobroto 1994).

4.3 / Caractéristiques biochimiques des fourrages

Le rythme de dégradation des ensilages de maïs et la dégradabilité théorique de leur MS (DTMS) est très variable (Cabon *et al* 2004). Dans cette étude rassemblant 107 échantillons la DTMS variait de 48 à 70 %. Ces variations peuvent affecter la digestion ruminale. Ainsi en comparant deux hybrides caractérisés par des DTMS différents (61 et 54 %), Fernandez *et al* (2004) ont montré que l'hybride le plus dégradé conduisait à des pH ruminiaux plus faibles (6,29 vs 6,43) et une durée de $\text{pH} < 6,2$ plus élevée (6,2 vs 3,6 h). De même, la chute postprandiale du pH ruminal a été plus importante (0,93 vs 0,83, Peyraud non publié) pour un ensilage de maïs «stay green» plus riche en amidon (363 vs 327 g/kg MS) et plus pauvre en cellulose (151 vs 180 g/kg MS) qu'un maïs témoin récolté à même teneur en MS (37 %).

Il est bien établi que les teneurs en sucres de l'herbe vert peuvent varier dans de très larges proportions, notamment en fonction de la fertilisation azotée (Peyraud et Astigarraga 1998), et de l'âge des repousses (Delagarde *et al* 2000). En comparant deux ray-gras anglais ayant la même digestibilité (0,80), Réarté *et al* (2003) ont montré que la chute postprandiale du pH était d'autant plus marquée que le ray-gras était plus riche en sucre (1,5 vs

Figure 5. Effet de la substitution d'amidons lents par des amidons rapides sur la réduction du ratio C2/C3 en fonction du taux de concentré dans la ration (Peyraud et al non publié).



1,1 unité pH pour des ray-gras contenant 246 vs 137 g sucres /kg MS respectivement).

4.4 / Finesse de présentation des fourrages

La réduction de la longueur des particules des fourrages les moins digestibles permet d'accroître l'ingestibilité sans doute du fait de la réduction des durées unitaires de mastication puisque le ruminant ne peut qu'exceptionnellement dépasser 1100 mn de mastication/jour (Jarrige *et al* 1995). En extrapolant ce résultat en dehors de sa zone de validité, il est aujourd'hui souvent conseillé de hacher très finement les ensilages de maïs, mais cette pratique peut conduire à l'apparition de troubles surtout si le dispositif de reprise au silo et de distribution réduit encore la longueur des brins.

La réduction de la longueur des particules des fourrages a des effets qui vont dans le même sens que ceux de l'accroissement de la teneur en amidon rapide. Elle réduit le pH moyen du rumen ainsi que le ratio C2/C3 (Sauvant 2000) et accroît le $\text{pH}_{<6,0}$ (de plus de 2h/jour, Le Liboux et Peyraud 1998). Elle peut conduire à des réductions importantes du taux butyreux (Sauvant 2000). Pour les rations les plus fines, les déviations fermentaires peuvent être importantes. Dans les essais conduits à Rennes, le $\text{pH}_{<6,0}$ a atteint 10 h par jour et le ratio C2/C3 a diminué de 3,5 à 2,5 pour des rations comportant respectivement 30 et 16 % de particules supérieures à 4 mm.

Les effets de la réduction de la longueur des particules sur le pH du rumen sont le plus souvent expliqués par la

réduction des durées de mastication qui l'accompagne, la durée de mastication affectant directement le flux de salive et donc le recyclage de tampons dans le rumen (Erdmann 1988). Mais, de plus, la réduction de la taille des particules accroît le rapport entre la surface disponible pour l'attaque microbienne et la masse du substrat ce qui entraîne une accélération des fermentations et par voie de conséquence une chute plus marquée du pH. Au cours d'une série d'essais comparant des finesses de mouture des fourrages, nous avons mis en évidence que le broyage des fourrages amplifiait l'accumulation des AGV dans les 3 heures qui suivent le début des repas (+ 56 vs + 33 mmol/L, figure 6) et finalement la chute postprandiale du pH (Peyraud 2000, figure 6). De même Fernandez *et al* (2004) ont montré que le pH moyen du rumen était plus faible pour des ensilages hachés finement que pour le témoin haché plus grossièrement (6,27 vs 6,44).

Contrairement aux idées largement répandues, la finesse de hachage des fourrages n'accroît pas toujours les quantités ingérées. De nombreux essais conduits sur vaches laitières rapportent peu ou pas d'effets voire même une légère diminution de l'ingestion avec les fourrages finement hachés (Santini *et al* 1983, Grant *et al* 1990, Shaver *et al* 1986, Le Liboux et Peyraud 1998, Fernandez *et al* 2004) peut être parce que les animaux doivent alors adapter leur niveau d'ingestion pour limiter la chute du pH ruminal et/ou du pH sanguin suite à une production trop rapide et importante d'AGV.

L'effet du broyage interagit avec la nature du concentré. Ainsi, le broyage peut conduire à une réduction sensible

de l'ingestion dans le cas de rations riches en glucides rapidement fermentescibles (Woodford et Murphy 1988, Boudon et Peyraud non publié). Pour des rations comportant 40 % de concentré, ces derniers auteurs ont observé une réduction des quantités ingérées de l'ordre de 1 kg MS/j avec les fourrages les plus fins (figure 7) lorsque le concentré était à base de blé et une augmentation avec un concentré à base de maïs grain.

5 / Facteurs de sécurisation des régimes

Les premières recommandations pour réduire les risques d'apparition d'états d'acidose latente sont de limiter les facteurs de risques, notamment en limitant l'apport d'amidon à dégradation rapide à moins de 25 % de la MS de la ration. Mais d'autres facteurs permettent, dans une certaine mesure, de sécuriser les rations.

5.1 / Fractionnement des apports

Il est établi depuis longtemps que l'accroissement de la fréquence de distribution des aliments (Kaufmann 1973, French et Kennelly 1990, McLeod *et al* 1994) minimise l'amplitude des variations postprandiales du pH, surtout lorsque la ration est riche en éléments rapidement fermentescibles. Il faut cependant relativiser cet effet «stabilisateur» de la fréquence de distribution. L'effet n'est pas observé ou est très fortement atténué lorsque les animaux ont libre accès à l'auge et qu'ils ont alors la possibilité d'étaler la consommation avec de nombreux petits

Figure 6. Effet de la mouture du fourrage sur la cinétique du pH ruminal et la production d'AGV au cours du repas (D'après Le Liboux et Peyraud 1998, 1999).

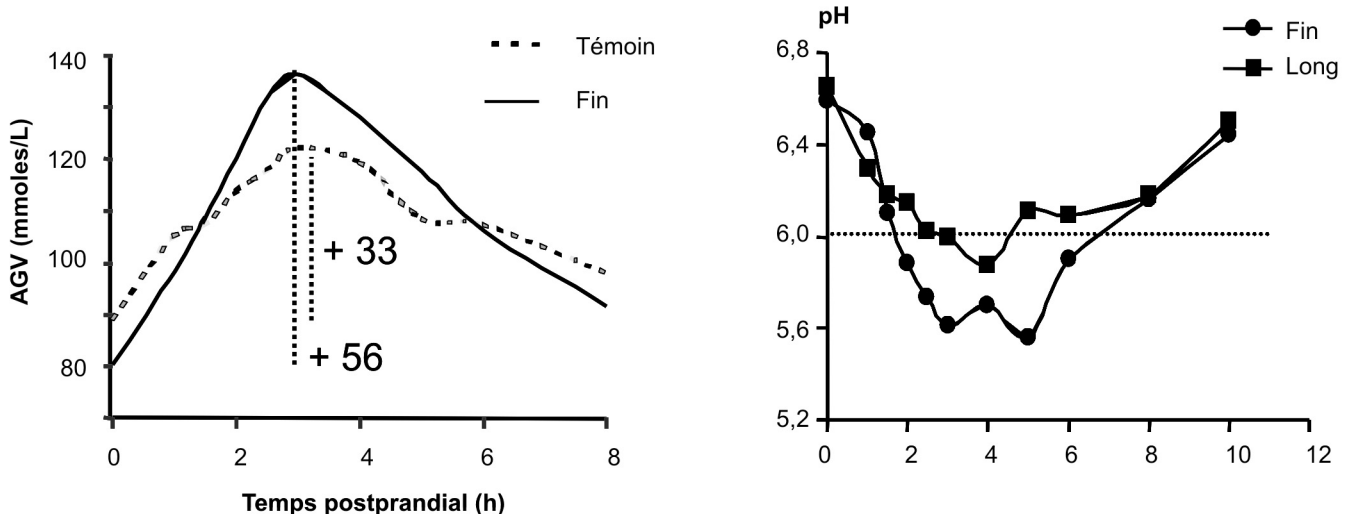
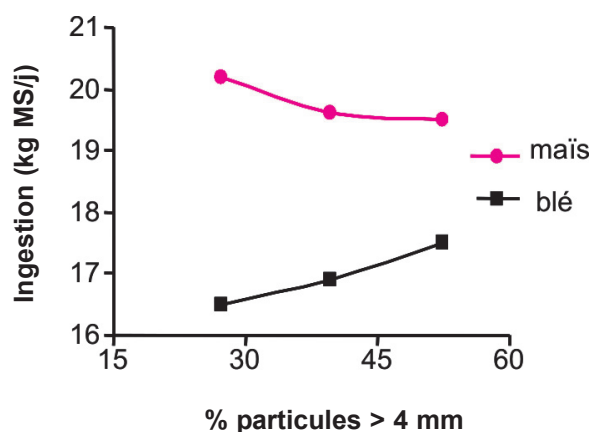


Figure 7. Interaction entre la finesse de présentation de l'ensilage de maïs et de la nature de l'amidon sur l'ingestion chez la vache laitière (Boudon et Peyraud non publié).



repas même lorsqu'il n'y a qu'une seule distribution (Ruiz et Mowat 1987). Lorsque le fractionnement des repas n'est effectué que sur une douzaine d'heures et non sur la journée entière, l'accroissement de la fréquence des repas ne réduit pas l'amplitude journalière du pH, elle se traduit juste par une chute plus continue du pH au cours de la phase alimentaire que ceux observés avec 1 ou 2 distributions (Malestein *et al* 1981, Le Liboux et Peyraud 1999). Dans cette situation, la chute de pH est effectivement plus faible après les petits repas mais le pH ruminal ne remonte pas aux valeurs préprandiales avant l'arrivée du repas suivant.

5.2 / Apport de substances tampons et facteurs susceptibles de stimuler la salivation

L'effet de l'ajout de tampons ruminiaux a été revu récemment par Meschy *et al* (2004) et résumé par Sauviant *et al* (2006). Rappelons juste ici que l'ajout de 1 % (sur la base de la MS de la

ration) de substances tampons accroît le pH ruminal (+ 0,07 unité), l'ingestion totale (+ 0,5 kg MS/j) et la production de lait (+ 0,5 kg/j environ) et le taux butyreux du lait (+ 1,5 g/kg de MS) et que les réponses sont d'autant plus prononcées que la situation initiale était caractérisée par un niveau initial d'acidose latente était plus prononcé. Les effets des levures pour limiter les chutes de pH semble moins net (Sauviant *et al* 2006).

Le recyclage de tampons salivaires s'accroît avec les rations riches en fibres de grande taille qui accroissent les durées de mastication, puisque la mastication accroît fortement le flux de salive par rapport au niveau basal (Cassida et Stokes 1986, Sauviant *et al* 2006). C'est pourquoi de très nombreux travaux ont été consacrés à l'apport de fibres longues dans les rations (cf § 6). Il faut d'ailleurs noter que ce recyclage, qui peut être estimé à 100 g/kg MS ingéré (Sauviant *et al* 1999), est beaucoup plus important que les quantités de tampons exogènes qui

peuvent être ajoutés à la ration (de 5 à 20 g/kg MS, Meschy *et al* 2004). Toutefois, l'intérêt réel d'une incorporation de paille (ou de foin grossier) pour accroître les durées de mastication ne permet pas toujours de corriger les situations d'acidose latente. Peyraud et Delaby (2002) ont ainsi complété une ration rendue volontairement acidogène par l'incorporation de 28 % de blé et le broyage des fourrages (le taux butyreux a chuté de 42 à 27 g/kg par rapport au témoin positif), soit par 1,5 kg de la paille de blé hachée en brins de 5 à 10 cm, soit par 4 kg de luzerne déshydratée qui apportaient la même quantités de NDF mais moins de fibres longues. La paille n'a pas permis de remonter significativement le taux butyreux et a légèrement réduit l'ingestion tandis que la luzerne a accru le taux butyreux de 6 g/kg et l'ingestion de 1 kg/j.

Les aliments eux-mêmes peuvent avoir un pouvoir tampon intrinsèque (Giger-Reverdin *et al* 1999). Celui-ci peut varier en fonction de leur composition biochimique et notamment de leur teneur en carbonates et phosphates. Les résultats plus marqués obtenus avec la luzerne dans l'essai précédent pourraient s'expliquer par le pouvoir tampon de la luzerne qui est très supérieur à celui des autres aliments (Giger-Reverdin *et al* 1999).

5.3 / Niveau d'apport de cations

Deux études quantitatives de la bibliographie ont récemment mis en évidence un effet positif de l'accroissement du BE (ou du BACA) sur l'ingestion et la production de lait. (Apper-Bossard et Peyraud 2004, Hu et Murphy 2004). L'ingestion s'accroît de manière curvilinéaire avec le BE (figure 8), les effets étant surtout importants

Figure 8. Effet de niveau de la balance électrolytique (BE) sur l'ingestion et la production de lait (Apper-Bossard et Peyraud 2004).

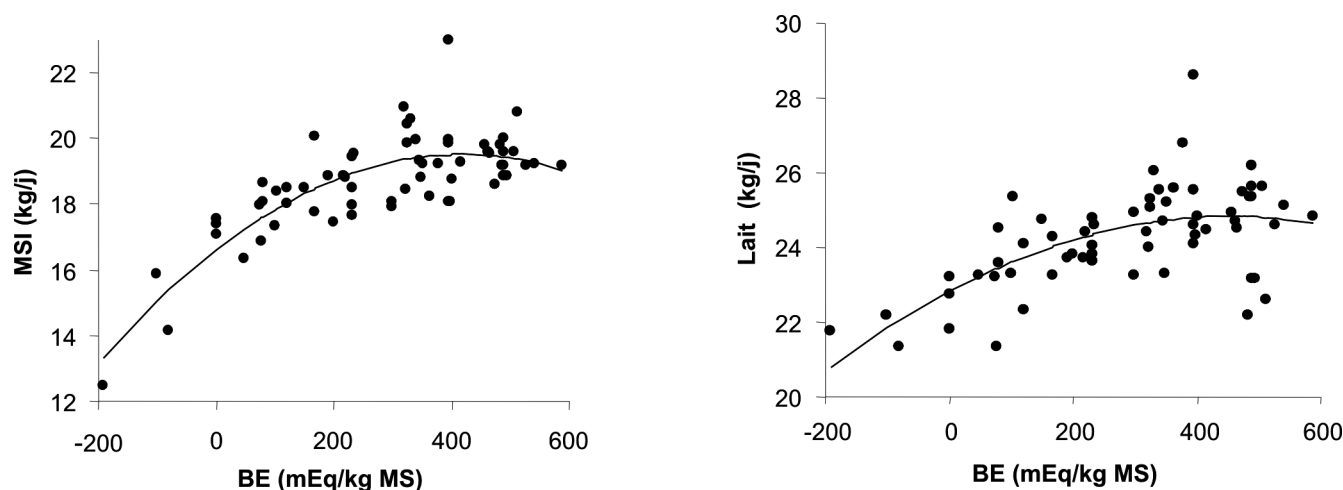


Tableau 2. Effets du niveau de BE en interaction avec le risque acidogène des rations sur les quantités ingérées, les bicarbonates sanguins et la chute postprandiale du pH ruminal.

	Ration témoin : 4% d'amidon à dégradation rapide			Ration acidogène : 22 % d'amidon à dégradation rapide		
Niveau BE (mEq/kg MS)	87	238	390	86	231	381
Quantités ingérées (kg MS/j)	22,2	22,1	22,2	22,8	23,7	24,0
HCO ₃ avant repas (mmol/L)	29,9	30,8	31,4	29,1	31,2	32,1
HCO ₃ après repas (mmol/L)	28,1	28,6	29,7	27,3	27,9	29,1
Chute postprandiale du pH ruminal	0,07	0,19	0,19	0,73	0,57	0,49

lorsque le BE s'accroît depuis des valeurs négatives jusqu'à environ 200 mEq/kg MS. L'augmentation de l'ingestion est alors de 1,4 kg/100 mEq pour des BE passant de -100 à 200 mEq/kg MS. Il n'y a pratiquement plus de variation pour des BE supérieurs à 400 mEq/kg MS. Le lait suit une évolution parallèle.

Des travaux récents (Apper-Bossard *et al* 2004, 2006) ont permis de moduler ces lois en montrant notamment que les réponses à l'accroissement de l'apport de cations sont d'autant plus marquées que la ration est riche en éléments rapidement dégradables (et pauvres en protéines, cf § 5.4). Ainsi, l'accroissement du niveau de BE de 80 à 390 mEq/kg MS a permis d'accroître l'ingestion de 1,5 kg MS/j dans le cas d'une ration riche en glucides rapidement fermentescibles (22 % d'amidon rapide) et conduisant à des pH ruminiaux faibles ($\text{pH}_{\text{moy}} = 6,06$) mais n'a pas eu d'effet dans le cas d'une ration ne présentant pas de risques acidogènes particuliers au niveau du rumen (4 % d'amidon rapide, $\text{pH}_{\text{moy}} = 6,33$).

Les mécanismes impliqués ne sont pas encore clairement précisés. Puisque le BE permet de moduler l'équilibre acido-basique du sang (figure 1), on peut supposer que les effets positifs sur l'ingestion d'un apport excédentaire de cations soient liés, au moins en partie, au maintien d'un niveau de bicarbonates sanguins suffisamment élevé. Lors de l'introduction de blé dans les rations, sans correction du niveau de BE, Faverdin *et al* (1998) et Peyraud (2000) avaient rapporté une chute marquée des bicarbonates, de l'excès de base du sang et finalement des quantités ingérées. Dans l'essai de Apper-Bossard *et al* (2006), l'accroissement de l'apport de cations a permis de rétablir le niveau des bicarbonates sanguins

observés lorsque les animaux recevaient la ration acidogène à un niveau identique, sinon supérieur, à ceux observés lorsqu'ils recevaient la ration témoin bien que l'ingestion totale ait été fortement accrue avec la ration acidogène et les BE élevés (tableau 2).

L'accroissement des bicarbonates sanguins peut aussi entraîner un accroissement de leur recyclage salivaire pouvant, en retour, participer à la régulation du pH ruminal. Ainsi avec les mêmes rations, Apper-Bossard *et al* (2004) ont rapporté que la chute postprandiale du pH avec la ration acidogène était réduite pour les niveaux élevés de BE malgré l'accroissement des quantités ingérées alors observé. Le niveau de BE n'affectait en revanche pas l'amplitude de la chute postprandiale du pH avec la ration non acidogène mais celle-ci est restée très modérée (tableau 2). De même, plusieurs auteurs ont rapporté un accroissement du TB et de la production de matières grasses avec l'augmentation de BE (Tucker *et al* 1994, Roche *et al* 2005, Apper-Bossard *et al* 2006). A partir de l'analyse du profil en acides gras des laits et notamment de l'accroissement des AG à longueur de chaîne courte et moyenne, Roche *et al* (2005) ont émis l'hypothèse d'une diminution du C3 ruminal au profit du C2 et du C4 avec les BACA élevés. Toutefois dans leur essai, l'accroissement du BE était obtenu par addition de bicarbonate de sodium dont le rôle de tampon est bien connu (Meschy *et al* 2004). En évitant l'emploi de bicarbonate, Apper-Bossard et Peyraud (2004) n'ont observé qu'une légère diminution de l'amplitude de variation du pH avec les BE élevés mais pas de modification du profil fermentaire. L'effet de l'apport de cation sur le métabolisme ruminal reste à mieux préciser en fonction de la nature des sels apportés.

5.4 / Niveau d'apport protéique

Les protéines jouent un rôle sur l'équilibre acido-basique de l'animal, soit directement en augmentant les taux de protéine plasmatique soit en modifiant le BE de la ration puisque les protéines sont généralement riches en ion K⁺ (INRA-AFZ 2004). Ainsi l'accroissement de la teneur en PDIE des rations (Apper-Bossard *et al* 2004, Apper-Bossard 2005) ou la perfusion de caséine dans le duodénum (Apper-Bossard et Faverdin non publié) accroît le pH, les teneurs en bicarbonates et l'excès de base du sang.

Ce mécanisme pourrait expliquer en partie l'effet très important de l'apport de PDIE sur l'ingestion rapporté par Vérité et Delaby (2000) + 2 kg MS/j pour un accroissement de l'apport PDI de 80 à 105 g/kg MS) et le fait que cet effet soit d'autant plus important que la ration est plus riche en céréales (Faverdin *et al* 1998). Cette hypothèse est cohérente avec les travaux de Rico-Gómez et Faverdin (2001) qui ont montré, à partir d'une analyse quantitative de la littérature, que l'effet stimulateur des protéines sur l'ingestion était beaucoup plus marqué avec les rations n'apportant pas de tampons (+ 0,8 kg MS/j). Ce résultat semble indiquer que l'apport de protéines est à raisonner en fonction du BE des rations. L'interaction entre les niveaux azotés et de BE a été vérifiée en croisant 2 niveaux de BE (80 vs 390 mEq/kg MS) avec deux niveaux d'apport de PDIE (90 vs 115 g PDIE/kg MS) (Apper-Bossard *et al* 2004). L'apport accru des protéines a bien stimulé l'ingestion dans le cas du niveau faible de BE mais n'a pas eu d'effet pour les rations à BE élevé.

Ces résultats montrent que l'accroissement de la teneur en PDIE des rations est un moyen efficace pour réduire les risques d'acidose métabolique et que les recommandations d'apport peuvent être modulées en fonction du BE des rations. Pour autant, on ne peut réduire l'effet positif des protéines sur l'ingestion à ce seul mécanisme qui agit à court terme. A plus long terme, la stimulation de la sécrétion lactée peut en retour stimuler l'ingestion (Faverdin *et al* 2003) et ainsi expliquer les effets importants à long terme de la nutrition protéique rapportés par Vérité et Delaby (2000).

6 / Prédiction du caractère acidogène des rations et des réponses animales

L'ensemble des résultats présentés montre que les facteurs alimentaires concourant à l'apparition d'acidose latente et finalement à des inefficacités zootechniques sont multiples : teneur et caractéristiques physiques des éléments fibreux mais aussi, rythme de dégradation des glucides non structuraux, teneur en protéines et en minéraux, aptitude intrinsèque de l'aliment à tamponner le contenu du rumen. Pour autant, les approches proposées pour prévoir le caractère acidogène d'une ration et établir des recommandations n'ont souvent pris en compte qu'un seul type de mécanisme de régulation et proposé qu'un seul indicateur. C'est sans doute pourquoi nous ne disposons pas encore aujourd'hui d'un système d'évaluation des risques acidogène liés à une ration pour un animal donné.

6.1 / Caractérisation de la structure fibreuse d'une ration et définition d'un besoin minimal d'apport en fibres

L'essentiel des travaux visant à déterminer le caractère acidogène des rations a été focalisé sur la détermination d'un niveau minimum d'éléments fibreux. Cette approche est justifiée par la cascade d'événements souvent avancée pour expliquer la diminution des performances lorsque des rations trop pauvres en fibre sont distribuées. Ces rations diminuent l'activité de mastication réduisant ainsi le flux de salive et donc la sécrétion de tampons, ce qui, en retour, conduit à des pH faibles et à des altérations des fermentations avec une réduction du ratio C2/C3. Au final ces modifications conduisent à la chute d'appétit et de taux butyreux.

Les teneurs en fibres les plus couramment citées pour limiter les risques sont de 21 % d'ADF (ou encore 18 % de cellulose brute) (Journet 1988) ou 25 à 28 % de NDF (National Research Council 1989). Néanmoins cette notion de fibre «chimique» est insuffisante puisqu'elle ne prend pas en compte la présentation physique des fourrages alors que de nombreux travaux ont montré que le broyage des fourrages peut conduire à des chutes de pH ruminal, des déviations fermentaires, des chutes de digestibilité et de taux butyreux très importantes (Chalupa *et al* 1969, Journet et Hoden 1973, Santini *et*

al 1983, Woodford et Murphy 1988, Le Liboux et Peyraud 1998, 1999).

Suite aux premiers travaux de Balch (1971) plusieurs auteurs ont cherché à caractériser les rations par la durée de mastication rapportée au kg de MS ingérée (durée unitaire de mastication, DUM) (Sudweeks *et al* 1981, Norgaard 1987, Sauvart *et al* 1990). Cette mesure intègre en effet toutes les caractéristiques physiques du NDF agissant sur la durée de mastication (résistance, longueur des brins, forme, densité...). La DUM des rations est calculée en faisant la somme des DUM des aliments (pondérée par les quantités), ces temps figurant dans des tables pour les principales catégories d'aliments, y compris les concentrés. Toutefois, cette méthode reste difficile à utiliser. Les besoins minima ne sont pas connus avec précision même si une valeur seuil de 30 à 40 min/kg MS est généralement citée. De plus, la DUM n'est pas un attribut de l'aliment puisqu'elle diminue avec le niveau d'ingestion (Sauvart *et al* 1990, Jarrige *et al* 1995). Il n'est donc pas possible de développer un système de prévision additif et généralisable.

Toujours dans l'idée de prendre en compte les caractéristiques physiques du NDF, Mertens (1986, 1997) a proposé d'utiliser le NDF «physiquement effectif» (ou peNDF). Le critère, calculé par la teneur en NDF multipliée par un coefficient variant de 0 à 1, traduit l'efficacité relative de l'aliment à faire mastiquer comparativement à un foin de référence (foin de graminée conduisant à une DUM de 150 min/kg NDF). Les valeurs du coefficient ont été calculées par régression entre la teneur en NDF et les durées de mastication établies par grands types de fourrages et quelques concentrés contenant du NDF. Le coefficient intègre aussi la forme physique du fourrage (long, haché, broyé, pellets). Il varie de 0,6 à 1,0 pour les fourrages et est toujours inférieur à 0,4 pour les concentrés. A partir de l'établissement des lois de réponses du pH ruminal et du taux butyreux du lait en fonction des teneurs en peNDF des rations, Mertens (1997) a proposé une valeur seuil de 24 % MS qui doit limiter les risques de chutes de TB en deçà de 36 g/kg. Dans sa base, cette valeur seuil correspond aussi à une DUM de 36 mn. D'après les équations proposées, une réduction du peNDF de 24 à 16 % MS entraîne une réduction de 4 g/kg du TB. Contrairement à la DUM, peNDF est un attribut de l'aliment et le système est donc additif.

En pratique, Mertens (1989, 1997) a proposé de calculer très simplement le peNDF par le NDF contenu dans les particules retenues sur un tamis de 1,18 mm puisque ces particules ne peuvent pas franchir l'orifice réticulo omasal sans avoir été mastiquées (Poppi *et al* 1981). Mais ainsi calculé le peNDF fait l'hypothèse que toutes les particules retenues sur un tamis de 1,18 mm offrent la même résistance à la mastication et ont la même teneur en NDF ce qui limite la pertinence du système. Pour les types de rations utilisées en France, la teneur en NDF du fourrage du régime (NDF_{four} en % MS régime) pourrait s'avérer un critère pertinent pour évaluer la structure fibreuse de la ration et plus simple à déterminer que le peNDF (Sauvart *et al* 2006).

6.2 / Vers des approches plus intégratives du caractère acidogène des rations

Le système proposé par Mertens n'intègre pas le rythme de dégradation et l'aptitude à acidifier le rumen des amidons ni la présence éventuelle de pectines qui ont un pouvoir acidogène important (Giger-Reverdin *et al* 1999). Il paraît plus intéressant de caractériser les glucides non structuraux par leur cinétique de dégradation en sachet. Peyraud (2000) a proposé d'utiliser le critère «Matière sèche rapidement dégradable» (MS_{rap}) qui correspond à la quantité de MS dégradée en 4 h d'incubation en sachets, mesurée selon la méthode proposée par Michalet Doreau *et al* (1987). Ce critère est maintenant facilement accessible à partir des informations disponibles dans les Tables INRA-AFZ (2004) et semble être un bon indicateur du pouvoir acidogène des aliments (Sauvart *et al* 2006).

a) Système de la «structure physique des aliments» proposé par le Centre de Recherche Agronomique de Gand

De Brabander *et al* (2002) a proposé un système qui vise à calculer la teneur minimale en fourrage grossier (FG_{crit}) nécessaire pour éviter l'apparition de troubles. Pour l'élaboration du système, des valeurs de FG_{crit} ont été déterminées expérimentalement par réduction progressive de la part de fourrage dans les rations jusqu'à l'apparition de troubles, FG_{crit} correspond au taux de fourrage juste avant l'apparition des troubles.

Dans le système, les aliments sont caractérisés par une «valeur de structure : VS» et les animaux ont un «besoin

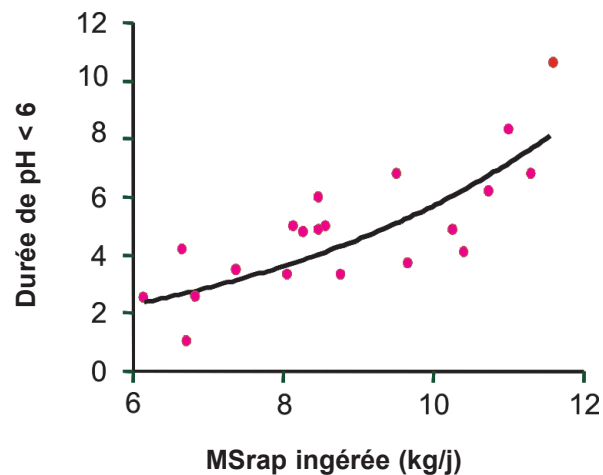
de structure». Le calcul de FG_{crit} est obtenu par : $\%FG_{crit} \times VS_{fourr} + \%Conc_{crit} \times VS_{conc}$. La VS des fourrages est calculée à partir des DUM enregistrées en conditions standard. Elle varie (de 1 à 4,3/kg MS) selon le type de fourrage (paille > foin > ensilages). Elle est indexée sur la taille des particules mais uniquement dans le cas de l'ensilage de maïs. La VS des matières premières intègre leur DUM et leur effet acidogène à partir de résultats de vitesse de dégradation mesuré *in vitro* ou par 3 h d'incubation en sachet. Elle varie de - 0,10 à 0,55/kg MS et est d'autant plus faible que la matière première est plus rapidement dégradable. La VS des matières premières est négativement et assez étroitement corrélée aux teneurs en MS_{rap} calculées à partir des tables INRA-AFZ ($r = - 0,84$). Le «besoin de structure» est fixé à 1 pour une vache standard produisant 25 kg de lait. Il s'accroît avec le niveau de production laitière (+ 0,008 / kg de lait en plus que 25 kg et - 0,008/kg en moins), il ne varie pas avec le stade de lactation ni le rang sauf pour les vaches en 4^e lactation ou plus pour lequel il diminue (les animaux âgés supportent des rations plus acidogènes).

Ce système est le plus complet à ce jour. Il intègre l'aptitude des aliments à faire mastiquer et leur aptitude à acidifier le rumen. Ainsi pour une ration à base d'ensilage de maïs ($VS = 1,76$), FG_{crit} s'accroît de 52 % à 57 % lorsque l'on remplace un concentré maïs-soja ($VS = 0,25$) pour un concentré blé-soja ($VS = 0,07$). FG_{crit} augmente également rapidement lorsque la VS du fourrage diminue. Ainsi dans la ration précédente, FG_{crit} diminue à 47 % si l'on considère un mélange 2/3 - 1/3 d'ensilage de maïs et d'herbe. En revanche, FG_{crit} s'accroît rapidement avec le niveau de production des animaux. Il augmente ainsi de 48 à 58 % entre 20 et 40 kg de lait pour une ration d'ensilage de maïs. Toutefois, il est possible que, du fait de la réduction de la DUM avec le niveau d'ingestion, le système conduise à surestimer le besoin de structure des vaches les plus fortes productrices (ou de sous-estimer celui des plus faibles).

b) Propositions pour la prévision multicritère du caractère acidogène des rations

Les méthodes précédentes considéraient que la réduction des DUM est le facteur déclenchant. Pour autant, les chutes de pH et les déviations fermentaires observées lorsque la teneur en fibres des rations diminue peuvent

Figure 9. Effet de la quantité de MS_{rap} ingérée sur la durée de $pH_{<6}$: durée = 0,060 $MSrdeg^2$ ($n = 20$, $etr = 1,31$).



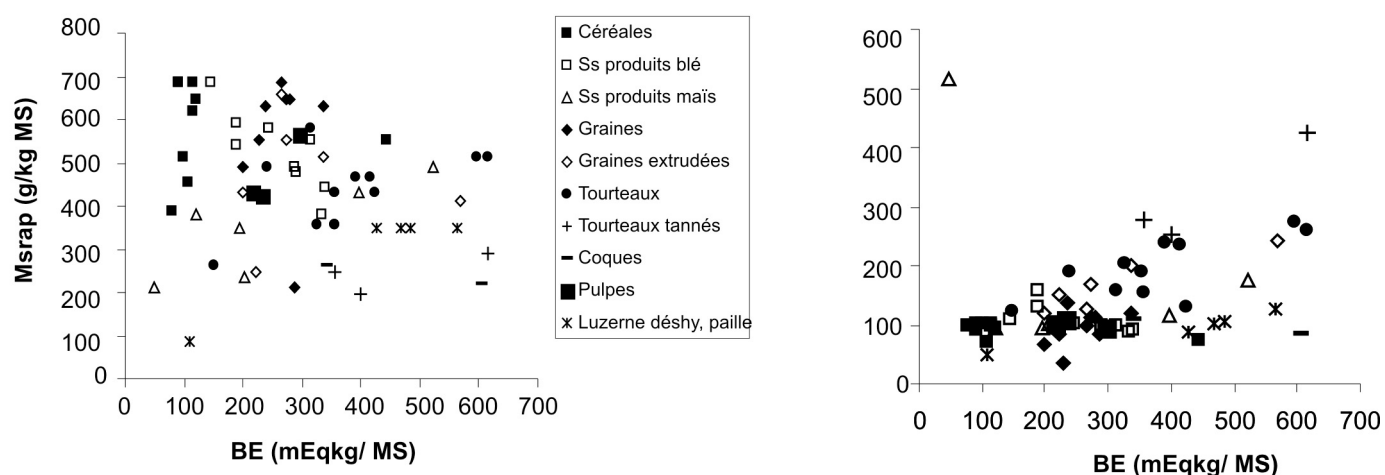
aussi être le résultat d'un excès de production d'acide plutôt que d'un manque de fibres *per se* limitant les durées de mastication. C'est par exemple le cas lorsque les problèmes apparaissent suite à l'utilisation d'un concentré très rapidement dégradable. De même le broyage des fourrages s'accompagne aussi d'un accroissement de la production d'acide (figure 6).

Sur cette base, Peyraud (2000) a proposé de caractériser les risques d'acidose ruminale à partir de la teneur des rations en MS_{rap} . Ce critère est facile à obtenir pour les matières premières. Dans le cas des fourrages, il est calculé en pondérant le taux de disparition à 4 h mesuré sur le fourrage broyé selon la méthode proposée par Michalet Doreau *et al* (1987) par la proportion de particules non retenue sur un tamis de 4 mm. Ainsi défini, ce critère intègre partiellement le fait que les petites particules fermentent plus rapidement que les grosses. Ce critère a permis de prédire avec une précision raisonnable la durée de $pH_{<6}$ (figure 9) en prenant en compte les effets de la nature des concentrés, du broyage des fourrages et du niveau d'ingestion dans une série de 5 essais conduits à Rennes (20 rations). Il est à noter que sur ce jeu de données, la DUM a été un prédicteur moins performant en inter essai ($etr = 1,55$ vs 1,31 h). Pour certaines des rations testées, la variabilité journalière des quantités ingérées, prise comme un indicateur de l'état d'inconfort des animaux a été sensiblement accrue. Ces rations étaient caractérisées par des teneurs en MS_{rap} supérieures à 450 g/kg MS ce qui pourrait correspondre à une limite maximale à ne pas dépasser. Ainsi le critère MS_{rap} peut être un critère pertinent pour évaluer les risques d'appari-

tion d'acidose latente mais il reste à mieux définir les lois de réponses du pH ruminal aux variations de ce critère en fonction des modalités de variation (nature et type de concentré, hachage des fourrages,...).

Les données récentes montrent qu'il faut également caractériser l'aptitude des aliments à réguler l'équilibre acido-basique du sang pour préciser les risques associés à leur utilisation. Le pouvoir acidogène au niveau métabolique dépend directement du BE. Sur la figure 10a nous avons représenté les 2 composantes acidogènes pour les principales matières premières, la ruminale étant indexée sur la teneur en MS_{rap} et la métabolique sur le BE. Les teneurs en PDIE participent aussi au maintien de l'homéostasie acido-basique du sang et doivent être prises en compte. Elles sont positivement corrélées au BE (figure 10b) car les matières premières riches en protéines sont le plus souvent riches en potassium. Il apparaît clairement que les céréales à dégradation rapide telles que le blé, le seigle ou l'orge sont des matières premières caractérisées par des teneurs en MS_{rap} très élevées (> 600 g/kg MS), des BE très faibles (< 100 mEq/kg MS) et des niveaux de PDIE faibles. Elles ont un pouvoir acidogène très important. A l'inverse, la plupart des tourteaux sont à la fois peu acidogènes au niveau ruminal et exercent un pouvoir alcalinisant au niveau sanguin avec des niveaux de BE et de PDIE élevés. Parmi les fourrages, l'ensilage de maïs se caractérise par des niveaux de BE beaucoup plus faibles que ceux de l'herbe verte ou de l'herbe conservée (Meschy et Peyraud 2004). Sa faible teneur en PDIE concourt aussi à un risque plus élevé qu'avec l'herbe surtout s'il est haché très finement car

Figure 10. Caractérisation des matières premières selon leur bilan électrolytique et leur teneur en MS_{rap} (10a) et en PDIE (10b) (INRA-AFZ 2004).



alors sa teneur en MS_{rap} s'accroît rapidement.

Les études conduites ces dernières années à Rennes (Faverdin *et al* 1998, Peyraud 2000, Rico-Gómez et Faverdin 2001, Apper-Bossard *et al* 2004, 2006) ont permis d'établir des premières recommandations. Dans l'état actuel des connaissances, on peut retenir que pour une vache à haut niveau de production recevant une ration à plus de 300 g/kg MS_{rap} , il est souhaitable d'avoir un BE voisin de 250 mEq/kg MS et une teneur en PDIE de 100 g/UFL. Pour des niveaux de MS_{rap} inférieurs à 200 g/kg MS, il n'y a pas nécessité de rechercher des BE élevés.

Pour préciser les recommandations et définir les zones à risques, il reste à mieux connaître les lois de réponse du pH ruminal et, *in fine*, de l'ingestion et du taux butyreux du lait, en fonction du niveau des trois critères précédents (MS_{rap} , BE et PDIE) et probablement d'un critère caractérisant l'apport minimal de fibres (sans doute NDF_{four}) per-

mettant d'assurer une mastication suffisante et une structuration du contenu ruminal facilitant son écoulement et limitant les risques de stase ruminale (Martin *et al* 2006). Ces lois sont à établir en fonction des caractéristiques propres des animaux (âge, poids, niveau de production, stade). Au niveau de la valeur des aliments, il reste à préciser la méthode d'évaluation et les valeurs de la MS_{rap} des fourrages. Il est par exemple bien établi que la MS_{rap} des ensilages de maïs peut varier quasiment du simple au double (de 320 à 570 g/kg MS, Cabon *et al* 2004) sans que l'on puisse actuellement expliquer ces différences par les seules variétés, types de sols et itinéraires culturaux. En outre, la méthode actuelle de calcul de la MS_{rap} suppose que 1) seule la MS passant à travers un tamis de 4 mm participe à la MS_{rap} ce qui est sans doute trop simplificateur et 2) que la vitesse de fermentation de cette fraction est identique à celle du fourrage entier ce qui n'est sans doute pas toujours vérifié, et notamment l'ensilage de maïs où une part importante des éléments les

plus fins est constituée par les grains éclatés qui fermentent plus vite que le NDF.

Conclusion

L'acidose latente est aujourd'hui l'un des principaux problèmes de la nutrition des ruminants laitiers à fort potentiel. Les facteurs alimentaires impliqués dans la survenue d'acidoses latentes sont maintenant bien connus et des informations récentes sur le rôle des protéines, des substances tampon et des cations ainsi que sur les rythmes de fermentation des aliments permettent de dégager des pistes nouvelles pour élaborer un système de prévision des risques en fonction de la composition des rations et des caractéristiques des animaux. Ces connaissances ne sont toutefois par encore suffisamment formalisées pour proposer un système fiable de prédiction ainsi que des indicateurs permettant d'objectiver l'état des troupeaux.

Références

- Apper-Bossard E., 2005. Equilibre de la ration et homéostasie acido-basique chez la vache laitière forte productrice : rôle de la balance alimentaire en cations et en anions, de la teneur en protéines et en énergie rapidement dégradable. Thèse, Université Rennes I, 150p.
- Apper-Bossard E., Peyraud J.L., 2004. Effet du bilan électrolytique sur l'ingestion et la production de lait des vaches laitières : approche bibliographique. Renc. Rech. Rum., 11, 266.
- Apper-Bossard E., Peyraud J.L., 2004. Dietary cation-anion difference could enhance acid-base status of lactating dairy cows submit to a sub-acidosis. Xth Int. Symp. Rum. Physiol., Copenhagen, Denmark. J. Anim. Feed Sci., 13 (Suppl 1), 27-30.
- Apper-Bossard E., Peyraud J.L., Faverdin P., Meschy F., 2004. Effets du bilan alimentaire en cations et en anions sur les performances zootechniques des vaches laitières selon les teneurs en énergie rapidement dégradable et en protéines des rations. Renc. Rech. Rum., 11, 251-254.
- Apper-Bossard E., Peyraud J.L., Faverdin P., Meschy F., 2006. Changing dietary cation-anion difference for dairy cows fed with two contrasting levels of concentrate in diets. J. Dairy Sci., 89, 749-760.
- Balch C.C., 1971. Proposal to use time spent chewing as an index of the extent to which diets for ruminants process the physical property to fibrousness characteristics of roughage. Br. J. Nutr., 26, 383-392.
- Boyle M., Lawrence J., 2003. An easy method of mentally estimating the metabolic component of acid/base balance using the FencI-Stewart approach. Anaesthesia Intensive Care, 31, 538-547.
- Brossard L., Martin C., Michalet-Doreau B., 2003. Ruminal fermentative parameters and blood acido-basic balance changes during the onset and recovery of induced latent acidosis in sheep. Anim. Res., 52, 513-530.
- Brown M.S., Krehbiel C. R., Galyean M. L., Remmengas M. D., Peters J.P., Hibbard B., Robinson J., Moseley W. M., 2000. Evaluation of models of acute and subacute acidosis on dry matter intake, ruminal fermentation, blood chemistry, and endocrine profiles of beef steers. J. Anim. Sci., 78, 3155-3168.

- Brugère H., 2001. Equilibre et régulation acido-basique dans l'organisme. Rôles de l'ion bicarbonate. Journées «Solvay», SIMA, Paris, France, 1-14.
- Cabon G., Pruvost L., Cosson C., Garreau R., 2004. Dégradation ruminale du maïs-fourrage : prédiction en spectrométrie dans le proche infrarouge. *Renc. Rech. Rum.*, 11, 261.
- Cassida P.E., Stokes M.R., 1986. Eating and resting salivation in early lactation dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 69, 1282-1289.
- Chalupa W., O'Dell G.D., Kutches A.J., Lavker R., 1969. Supplemental corn silage or baled hay for correction of milk fat depressions produced by feeding pellets as sole forage. *J. Dairy Sci.*, 53, 208-214.
- Constable P.D., 1999. Clinical assessment of acid-base status: strong ion difference theory. *Veterinary Clinics North America. Food Animal Practices*, 15, 447-471.
- Davenport, 1971. The A.B.C. of acid base chemistry. University of Chicago press, 250p.
- Delagarde R., Peyraud J.L., Delaby L., Faverdin P., 2000. Vertical distribution of biomass, chemical composition and pepsin-cellulase digestibility in a perennial ryegrass sward: interaction with month of year, regrowth age and time of a day. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 84, 49-68.
- De Smet A.M., Boever A.M., Brabander D.L., Vanacker J.M., Boucque C.V., 1995. Investigation of dry matter degradation and acidotic effect of some feedstuffs by means of *in sacco* and *in vitro* incubations. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 51, 297-315.
- De Brabander D., De Boever J., Vanacker J., Geerts N., 2002. Système de structure physique des aliments pour les vaches laitières. Colloque AFTAA, 15-16 mai 2002, Paris, France.
- Dishington L. W., 1975. Prevention of milk fever by dietary salt supplement. *Acta Vet. Scand.*, 16, 503-512.
- Dijkstra J., Boer H., Van Bruchem J., Bruining M., Tamminga S., 1993. Absorption of volatile fatty acids from the rumen of lactating dairy cows as influenced by volatile fatty acids concentration, pH and rumen liquid volume. *Br. J. Nutr.*, 69, 385-396.
- Dragomir C., Michalet-Doreau B., Peyraud J.L., Sauvant D., 2003. Integrative parameters of pH kinetics as indicators of ruminal acidosis. VIth Int. Symp. Nutr. Herbivores, 19-24 October 2003, Merida, Yucatan, Mexico, 3, 225-227.
- Enemark J.M.D., Jorgensen R.J., 2001. Subclinical rumen acidosis as a cause of reduce appetite in newly calved dairy cows in Denmark: results of a poll among Danish dairy practitioners. *Vet. Quart.*, 23, 206-210.
- Erdmann R.A., 1988. Dietary buffering requirements of the lactating dairy cows: a review. *J. Dairy Sci.*, 65, 1457-1464.
- Espinasse J., Kuiper R., Schelcher F., 1995. Physiopathologie du complexe gastrique. In : Nutrition des ruminants domestiques. Ingestion et digestion. (Eds) R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.H. Farce, M. Journet, INRA Editions, Paris, France, 805-852.
- Even P., 1983. La respiration. In : Meyer P. (Ed). *Physiologie humaine*, 1087-1358.
- Faverdin, P., Bareille N., Vérité R., 1999. Effects of rumen energy supply timing on feed intake control in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 82, 2443-2454.
- Faverdin P., Delaby L., Vérité R., Marquis B., 1998. Effet de la teneur en protéines et en aliments concentrés d'une ration complète à base d'ensilage de maïs sur l'ingestion et la production laitière de vaches laitières en début de lactation. *Renc. Rech. Rum.*, 5, 263-266.
- Faverdin P., M'Hamed D., Rico-Gomez M., Vérité R., 2003. La nutrition azotée influence l'ingestion chez la vache laitière. *INRA Prod. Anim.*, 16, 27-37.
- Fernandez I., Martin C., Champion M., Michalet-Doreau B., 2004. Effect of corn hybrid and chop length of whole-plant corn silage on digestion and intake by dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 87, 1298-1309.
- French N., Kennelly J.J., 1990. Effects of feeding frequency on ruminal parameters, plasma insulin, milk yield and milk composition in holstein cows. *J. Dairy Sci.*, 73, 1857-1863.
- Giger-Reverdin S., Duvaux-Ponter C., Sauvant D., Maaroufi C., Meschy F., 1999. Variabilité des pouvoirs tampon et acidogène de 24 matières premières destinées au ruminants. Liaison avec la composition chimique. *Renc. Rech. Rum.*, 6, 95-98.
- Goad, D.W., Goad C.L., Nagaraja T.G., 1988. Ruminal microbial and fermentative changes associated with experimentally induced subacute acidosis in steers. *J. Anim. Sci.*, 76, 234-241.
- Goff, J. P., Horst R. L. 1998. Use of hydrochloric acid as a source of anions for prevention of milk fever. *J. Dairy Sci.*, 81, 2874-2880.
- Grant R.J., Colenbrander V.F., Mertens D.R., 1990. Milk fat depression in dairy cows: role of silage particle size. *J. Dairy Sci.*, 73, 1834-1842.
- Haupt T.R., 1993. Acid-Base balance. In: *Dukes' Physiology of Domestic Animals*. M.J. Swenson (Ed), 11th Edition. Univ. Press, Ithaca N.Y., 604-615.
- Hu W., Murphy M.R., 2004. Dietary cation-anion difference effects on performance and acid-base status of lactating dairy cows: a meta-analysis. *J. Dairy Sci.*, 87, 2222-2229.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. D Sauvant, J.M. Perez, G. Tran (Ed), INRA Editions, Paris, 301p.
- Jarrige R., Dulphy J.P., Faverdin P., Baumont R., Demarquilly C., 1995. Activités d'ingestion et de rumination. In : R Jarrige, Y. Ruckebusch, D. Demarquilly, M.H. Farce, et M. Journet (Eds), *Nutrition des ruminants domestiques*. INRA éditions, Paris, France, 123-182.
- Jouany J.P., Thivend P., 1972. Evolution post-prandiale de la composition glucidique des corps microbiens du rumen en fonction de la nature des glucides du régime. II. Les protozoaires. *Ann. Biol. Anim. Biochim.*, 12, 673-677.
- Journet M., 1988. Optimisation des rations. In : R. Jarrige (Ed), *Alimentation des bovins, ovins et caprins*, INRA, Paris, France, 121-133.
- Journet M., Hoden A., 1973. Utilisation des luzernes et des graminées déshydratées comme unique fourrage de la ration des vaches laitières et étude de leur digestion dans le rumen. *Ann. Zootech.*, 22, 37-54.
- Kaufmann W., 1973. Zum einfluss höherer fütterungsfrequenz auf die fermentation in den vormägen und die leistung bei milchkühen. *Kiel Milchwirtsch. Forschungsber.*, 25, 245-250.
- Le Liboux S., Peyraud J.L., 1998. Effect of forage particle size and intake level on fermentation patterns and site and extent of digestion in dairy cows fed with mixed diets. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 73, 131-150.
- Le Liboux S., Peyraud J.L., 1999. Effect of forage particle size and feeding frequency on fermentation patterns and sites and extent of digestion in dairy cows fed with mixed diets. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 76, 297-319.
- Malestein A., Van't Klooster J.A., Pains R.A., Connette G.M., 1984. Concentrate feeding and ruminal fermentation. 3. Influence of concentrate ingredient on pH, DL lactic acid concentration in the rumen fluid of dairy cows and on dry matter intake. *Neth. J. Agric. Sci.*, 32, 9-16.
- Martin C., Bossard L., Doreau M., 2006. Mécanismes d'apparition de l'acidose ruminale et conséquences physiopathologiques et zootechniques. *INRA Prod Anim.*, 19 (2), 93-108.
- Michalet-Doreau B., Vérité R., Chapoutot P., 1987. Méthodologie de mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'azote des aliments dans le rumen. *Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix*, 69, 5-7.
- Mc Gilvery R.W., 1970. Respiratory exchange and H⁺ balance. In: *Biochemistry, a functional approach*. W.B. Saunders (Ed), Philadelphia, USA, 608-628.
- McLeod G.K., Colucci P.E., Moore A.D., Grieve D.G., Lewis N., 1994. The effects of feeding frequency of concentrate and feeding sequence of hay on eating behaviour, ruminal environment and milk production in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.*, 74, 103-113.
- Meschy F., Peyraud J.L., 2004. Teneurs en ions forts des fourrages et calcul de la valeur de leur bilan alimentaire cations-anions et de leur bilan électrolytique. *Renc. Rech. Rum.*, 11, 255-258.
- Mertens D.R., 1986. Effect of physical characteristics, forage particle size and density on forage utilisation. In *Proc. Nutr. Symp.*, St Louis, MO. Am. Feed Ind. Assoc., Arlington, VA., 91.
- Mertens D.R., 1989. Fiber analysis and its use in ration formulation. In: R.G. Hulls, B.J. Hawk, K.K. Dickinson (Eds), *Proc. 24th Pacific NW Anim. Nutr. Conf.*, 1-10.
- Mertens D.R., 1997. Creating a system of meeting the fiber requirements of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 80, 1463-1481.
- Meschy F., Bravo D., Sauvant D., 2004. Analyse quantitative des réponses des vaches laitières à l'apport de substances tampons. *INRA Prod. Anim.*, 17, 11-18.
- National Research Council, 1989. Nutrient requirements of dairy cattle. 6th Rev. Ed. Update 1989. *Natl. Acad. Sci.*, Washington, D.C., 90p.
- Niles M.A., Collier R.J., Croom W.J., 1980. Effects of heat stress on rumen and plasma metabolite and plasma hormone concentration in holstein cows. *J. Anim. Sci.*, 58 (Suppl 1), 152.
- Nocek J.E., Tamminga S., 1991. Site of digestion of starch in the gastrointestinal tract of dairy cows and its effect on milk yield and composition. *J. Dairy Sci.*, 74, 3598-3629.
- Norgaard P., 1987. The influence of level of feeding and physical form of the feed on the reticulo-rumen fermentation in dairy cows fed 12 times daily. *J. Dairy Sci.*, 74, 3598-3629.
- Patience J.F., 1990. A review of the role of acid-base balance in amino-acid nutrition. *J. Anim. Sci.*, 63, 398-408.
- Paillard M., 1995. Régulation rénale de l'équilibre acido-base. In : *Physiologie Humaine*,

Meyer P (Ed). Flammarion Médecine Sciences, Paris, France, 561-610.

Peyraud J.L., 2000. La dynamique de dégradation de l'énergie est un élément déterminant de la fibrosité des régimes. *Renc. Rech. Rum.*, 7, 183-186.

Peyraud J.L., Astigarraga L., 1998. Review of the effect of nitrogen fertilization on the chemical composition, intake, digestion and nutritive value of fresh herbage: consequences on animal nutrition and N balance. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 72, 235-259.

Peyraud J.L., Delaby L., 2002. Introduction of dehydrated lucerne in long form or straw into diets of high producing dairy cows. In: Multi function grassland, Quality forages, animal products and landscapes. J.L. Durand, J.C. Emile, C. Huyghe, G. Lemaire (Eds). *Proc. 19th Gen. Meet. Eur. Grassland Fed.*, La Rochelle, France, 224-225.

Peyraud J.L., Widyobroto B.P., 1994. Effect of the nature and the rate of ruminal degradation of carbohydrates on site and extent of digestion in dairy cows. VIII Int. Symp. Rum. Physiol., Willingen, Germany. *Proc. Soc. Nutr. Physiol.*, 3, 34.

Poppi D.P., Minson D.J., Ternouth J.H., 1981. Studies of cattle and sheep eating leaf and stem fractions of grasses. III. The retention time in the rumen of large feed particles. *Aust. J. Agric. Res.*, 32, 123-137.

Réarté D., Peyraud J.L., Poncet C., 2003. Effet d'un accroissement du ratio sucres : protéines de l'herbe verte sur la valeur alimentaire du fourrage et l'utilisation de l'azote chez la vache laitière. *Renc. Rech. Rum.*, 10, 387.

Rico-Gómez M., Favardin P., 2001. La nutrition protéique modifie l'ingestion des vaches laitières : analyse bibliographique. *Renc. Rech. Rum.*, 8, 285-288.

Riond, J.L. 2001. Animal nutrition and acid base balance. *Eur. J. Nutr.* 40, 245-254.

Robinson P.H., Tamminga S., Van Vuuren A.M., 1986. Influence of declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on rumen fermentation in dairy cows. *Livest. Prod. Sci.*, 17, 19-35.

Roche J.R., Petch S., Kay J.K., 2005. Manipulating the dietary cation-anion difference

via drenching to early lactation dairy cows grazing pastures. *J. Dairy Sci.*, 88, 264-276.

Ruiz A., Mowat N., 1987. Effect of feeding frequency on the utilization of high-forage diets by cattle. *Can. J. Anim. Sci.*, 67, 1067-1074.

Rumsey T.S., Putman P.A., Bond J., Oltjen R.R., 1970. Influence of level and type of diet on ruminal pH and VFA, respiratory rate and EKG patterns of steers. *J. Anim. Sci.*, 32, 608-616.

Santini F.J., Hardie A.R., Jorgensen N.A., Finner M.F., 1983. Proposed use of adjusted intake based on forage particle length for calculation of roughage indexes. *J. Dairy Sci.*, 66, 811-820.

Sauvant D., 1997. Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 10, 287-300.

Sauvant D., 2000. Granulométrie des rations et nutrition du ruminant. *INRA Prod. Anim.*, 13, 99-108.

Sauvant D., Dijkstra J., Mertens D., 1995. Optimisation of ruminal digestion: a modelling approach. In : Recent developments in the nutrition of herbivores. M. Journet, E. Grenet, M.H. Farce, M. Thériez and C. Demarquilly (Eds). INRA Editions, Paris, France, 143-165.

Sauvant D., Dulphy J.P., Michalet-Doreau B., 1990. Le concept d'indice de fibrosité des aliments des ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 3, 309-318.

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Meschy F., 2006. Le contrôle de l'acidose ruminale. *INRA Prod. Anim.*, 19 (2), 69-78.

Sauvant D., Meschy F., Mertens D., 1999. Les composantes de l'acidose ruminale et les effets acidogènes des rations. *INRA Prod. Anim.*, 12, 49-60.

Sauvant D., Van Milgen J., 1995. Dynamics aspect of carbohydrates and protein breakdown and the associated microbial matter synthesis. Engelhardt (Ed), *Proc. 8th Symp. Rum. Physiol.*, Verlag, Stuttgart, Germany, 71-91.

Schneider, P. L., Beede, D. K., and Wilcox, C. J., 1988. Nyctemeral patterns of acid-base status, mineral concentrations and digestive function of lactating cows in natural or chamber heat stress environments. *J. Anim. Sci.* 66, 112-125.

Sharipo B.A., Harrison R.A., Cane R.D., Kozlowski-Templin, 1992. Soins et gaz du sang. Frison-Roche (Ed). Paris, France, 379p.

Shaver R.D., Nytes A.J., Satter L.D., Jorgensen N.A., 1986. Influence of amount of feed intake and forage physical form on digestion and passage of prebloom alfalfa hay in dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 69, 1545-1559.

Story, D. A., Morimatsu, H., and Bellomo, R., 2004. Strong ions, weak acids and base excess: a simplified Fencel-Setwart approach to clinical acid-base disorders. *Br. J. Anaesthesia* 92, 54-60.

Sudweeks E.M., Ely L.O., Mertens D.R., Sisk L.R., 1981. Assessing minimum amount and form of roughage in ruminant diets: roughage value index system. *J. Anim. Sci.*, 53, 1406-1411.

Tamminga S., Van Vuuren A.M., Van der Koelen C.J., Ketalar R.S., Van der Togt P.L., 1990. Ruminal behaviour of structural carbohydrates, non structural carbohydrates and crude protein from concentrate ingredients in dairy cows. *Neth. J. Agric. Sci.*, 38, 513-526.

Tucker W.B., Hogue J.F., Adams G.D., Aslam M., Shin I.S., Morgan G., 1992. Influence of dietary cation-anion balance during the dry period on the occurrence of parturient paresis in cows fed excess calcium. *J. Anim. Sci.*, 70, 1238-1250.

Tucker, W. B., Shin I. S., Hogue J. F., Aslam M., Adams G. D., Van Koevinger M. T., Vernon, R. K., Cummings K. R., 1994. Natural sodium sesquicarbonate fed for an entire lactation: influence on performance and acid-base status. *J. Dairy Sci.*, 77, 3111-3117.

Vérité R., Delaby L., 2000. Relation between nutrition, performances and nitrogen excretion in dairy cows. *Ann. Zootech.*, 49, 217-230.

Vérité R., Peyraud J.L., 1988. Nutrition azotée. In : Alimentation des bovins ovins et caprins. R. Jarrige (Ed), INRA Editions, Paris, France, 75-93.

West J.W., Mullinix B.G., Sandifer T.G., 1991. Changing dietary electrolyte balance for dairy cows in cool and hot environment. *J. Dairy Sci.*, 71, 1662-1674.

Woodford J.A., Murphy M.R., 1988. Effect of forage physical form on chewing activity, dry matter intake and rumen function of dairy cows in early lactation. *J. Dairy Sci.*, 71, 674-686.

Résumé

L'acidose latente constitue aujourd'hui une cause d'inefficacité zootechnique des rations bien établie et est de ce fait l'une des préoccupations majeure pour la nutrition moderne des ruminants à haut potentiel. Les vaches laitières sont amenées à traiter des quantités très importantes de matière organique rapidement fermentescible dans le rumen ce qui met en péril le contrôle de l'acidité ruminale et à terme l'homéostasie de l'animal. Les facteurs à risques sont maintenant bien connus. Au premier rang figurent le niveau d'ingestion, les glucides à dégradation rapide et le hachage excessif des ensilages de maïs. S'il n'est pas toujours souhaitable de réduire le niveau d'ingestion, on peut réduire les risques en limitant les niveaux d'apport de glucides à dégradation très rapide (blé, orge, pulpes) et en veillant à la présentation physique du fourrage. Il n'y a malheureusement pas encore de systèmes permettant de raisonner précisément les rations sur la combinaison de ces facteurs. Les rations infra-optimales peuvent être sécurisées par la distribution de tampons. Plus récemment, il est apparu que l'enrichissement en cations et le niveau d'apport de protéines sont aussi des facteurs de sécurisation des rations. La gestion des risques d'apparition d'acidose latente doit être préventive et passe par un meilleur équilibre global de la ration. En l'absence d'un système fiable de prévision des zones à risques, il est préférable de ne pas incorporer plus de 20 % de glucides rapidement dégradables dans la ration surtout si leur bilan électrolytique est faible, ce qui est le cas du blé, de l'orge et les pulpes de citruses et veiller à ce que le fourrage rendu dans l'auge ne soit pas haché trop finement. Les rations peuvent également être sécurisées par l'apport de substances tampon à raison de 1 % de la MS et/ou par un apport de cations permettant d'atteindre un bilan électrolytique proche de 200 mEq/kg MS ainsi que par le maintien d'un niveau d'apport protéique proche de 100 g PDIE/UFL. Ces précautions apparaissent plus efficaces pour gérer les excès d'acidité que l'incorporation de paille dans la ration. Il n'est pas non plus nécessaire d'apporter des protéines dégradables en excès ce qui n'aura d'autre effet que d'accroître les rejets azotés.

Abstract

Latent acidosis in the dairy cow

Today, latent acidosis is a cause of the zootechnical inefficacy of the established food rations and for this reason has become one of the major preoccupations in modern nutrition of high potential ruminants. Dairy cows are required to treat large quantities of rapidly fermentable organic matter, which imperils the control of ruminal acidity and eventually the animal's homeostasis. The risk factors are now well known. The level of ingestion, rapidly digestible carbohydrates and the excessive chopping of corn silage figure amongst these factors. Even though it is not always desirable to reduce the amount of food ingested, the risks can be reduced by limiting the intake levels of rapidly degradable carbohydrates (wheat, barley, pulp) and by surveying the physical presentation of the fodder. Unfortunately, no system yet exists that allows to precisely rationalise the food ration as a function of these factors. The intraoptimal rations can be protected by distributing buffers. More recently, it has appeared that cation enrichment and protein intake level are also factors that protect the rations. The management of the risk of appearance of latent acidosis should be preventive and should include a better overall balance of the ration. In the absence of a reliable system that predicts the zones at risk, it is preferable not to incorporate more than 20% of rapidly degradable carbohydrates in the ration, especially if the electrolytic balance is low, which is the case for wheat, barley and citrus pulp. It is also important to make sure that the forage sent to the feeding trough is not chopped too finely. The rations can also be protected by including buffering substances at a concentration of 1% DM and/or by including cations that give an electrolytic balance close to 200mEq/kg MS as well as maintain a level of protein intake close to 100g PDIE/UFL. These precautions are more efficient in managing the excess of acidity than that of hay in the ration. It is no longer necessary to include degradable proteins in excess, which will just only increase the amount of nitrogen in waste.

PEYRAUD J.-L., APPER-BOSSARD E., 2006. L'acidose latente chez la vache laitière. INRA Prod. Anim., 19, 79-92.