

La dynamique de dégradation de l'énergie est un élément déterminant de la fibrosité des régimes

J.L. PEYRAUD

Unité de Recherches sur la Production du Lait

Unité Mixte de Recherche INRA/ENSAR, 35590 St Gilles

RESUME – La fibrosité des régimes ne peut pas être caractérisée uniquement à partir des teneurs en fibre ou de la granulométrie des fourrages ou des durées de mastication car ces critères ne prennent pas en compte l'origine des glucides qui peuvent aussi affecter le pH ruminal. Cinq essais ont été réalisés pour quantifier les effets sur la dynamique des fermentations ruminales, de la finesse de hachage des fourrages, de la quantité de MS dégradable des concentrés, modulée par la proportion de blé ou l'origine de l'amidon (blé vs maïs), et du niveau d'ingestion des rations. Les effets ont été quantifiés par la durée de pH < 6 qui est apparue comme un critère plus étroitement relié aux variations de l'activité microbienne (estimée par les profils d'AGV et la digestibilité des fibres) que le pH moyen. La réduction de la taille des particules de fourrage a fortement accru les durées de pH < 6 et diminué le rapport C2 : C3. Ces effets semblent s'expliquer davantage par l'accroissement de la vitesse de fermentation du fait d'un rapport surface/poids accru des particules que par la réduction des durées de mastication. Les glucides à dégradation rapide ont eu des effets d'autant plus marqués qu'ils étaient introduits en quantité plus élevée et que les fourrages étaient broyés. Compte tenu de ces résultats, il semble intéressant de caractériser les régimes à partir de leur teneur en MS rapidement dégradable. Un critère a été élaboré à partir du taux de dégradation en 4 heures d'incubation '*in sacco*' des aliments. La quantité de MS rapidement dégradable est calculée en sommant les MS 'rapides' des concentrés et celle des fourrages, en ne retenant pour ces derniers que la fraction de leur MS passant à travers un tamis de 4 mm. L'utilisation de ce critère pour détecter les zones à risque est discutée.

The fibrousy of the diet is partly determined by the rate of energy fermentation

J.L. PEYRAUD

Unité de Recherches sur la Production du Lait

Unité Mixte de Recherche INRA/ENSAR, 35590 St Gilles

SUMMARY – Fiber content or particle size of the diet or unitary eating time do not allow to characterise the fibrosity of the diet because these criteria do not take account of the effects of carbohydrates on ruminal pH. Five trials aimed at studying the effects on ruminal fermentation patterns of forage particle size, amount of degradable starch, which was modulated by the amount of wheat or the source of starch (wheat vs maize) and level of intake. The hours of pH < 6 were more closely correlated to the effects of diets on ruminal fermentation patterns and fiber digestibility than did mean ruminal pH. Reducing forage particle size increased the hours of low pH and decreased the C2 : C3 ratio. These effects are mainly explained by an increased rate of degradation of ground forage arising from the increase in surface/weight ratio, the decreased in chewing time being of less importance. The effects of highly fermentable carbohydrates on ruminal fermentations were increased when the amount of carbohydrates was high or when they were associated to finely grounded forages. These results suggest that content of rapidly fermentable DM can be a pertinent indicator to predict the digestive risks. A criteria was built from the rate of '*in sacco*' disappearance of DM. The amount of 'rapidly degraded DM' is calculated from the sum of fast DM of each concentrate and forages, taking only account of DM passing through a pore size of 4 mm for these latter. The usefulness of this criteria to detect zones of risk were discussed.

INTRODUCTION

Chez les vaches laitières, l'utilisation de rations à forte densité énergétique, associées à une finesse de hachage accrue des fourrages et à l'incorporation de quantités importantes de céréales peut être à l'origine d'états d'acidose subclinique entraînant des pertes d'efficacité digestive voire l'apparition des troubles de la santé. L'aptitude d'un régime à limiter ces risques est souvent associée à sa capacité à faire mastiquer l'animal du fait de la relation entre mastication et salivation (i.e. recyclage de tampons). En conséquence, les principaux critères retenus pour caractériser la fibrosité d'un régime sont la teneur en NDF retenu dans les grandes particules (Mertens, 1997) et/ou la granulométrie de la ration (Sauvant, 2000) et/ou l'indice de mastication (IM en min/kg MS, Sauvant et al 1990). Mais, aucun de ces critères ne prend en compte les fractions glucidiques des concentrés dont le rythme de dégradation est pourtant très variable alors qu'il est bien établi que les amidons à dégradation rapide causent des chutes de pH plus marquées que les amidons plus lents lorsqu'ils sont incorporés à des taux élevés (Sauvant et al, 1999).

Toutefois aucun de ces critères pris seul ne peut intégrer les effets associatifs entre les différents facteurs alimentaires responsables de l'acidification du rumen. Une série de 5 essais a été réalisée afin de mieux quantifier, et prévoir à partir de critères simples, les effets conjoints de la forme physique des fourrages et de la nature des glucides qui sont deux facteurs pouvant inter agir en modifiant simultanément et en sens inverse le pouvoir du régime à fermenter rapidement et à faire recycler des tampons salivaires.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. RÉGIMES ET SCHÉMAS EXPÉRIMENTAUX

Dans les essais 1 et 2, deux finesses de hachage du fourrage ont été testées dans le cas de régimes riches en particules de petite taille. Les animaux ont reçu une même quantité de la luzerne déshydratée (25 % de la MS du régime) sous forme hachée ou broyée et mise en pellet. Les deux formes de présentation ont été croisées avec deux niveaux d'offert (à volonté vs 80 %) dans l'essai 1 et avec deux fréquence de repas (2 vs 6 repas/jour) dans l'essai 2. Les deux régimes comportaient par ailleurs 21 % de blé. Dans l'essai 1 le reste de la ration était composée de 18 % d'ensilage de maïs (EM), 25 % de maïs plante entière déshydraté (MD). Dans l'essai 2 elle

comportait 40 % de MD et 4 % de foin long. Les essais ont été conduits sur 4 vaches laitières selon un schéma en carré latin avec des périodes de 3 semaines.

Dans l'essai 3, six régimes différents par le broyage des fourrages et la nature de l'amidon ont été comparés. Trois forme de présentation physique du fourrage ont été obtenues en introduisant une même quantité de foin (20 % de la MS régime) sous forme hachée en brins de 10 cm, sous forme broyée et mise en pellets ou un mélange 50 : 50 des deux formes. Deux quantités d'amidon rapidement fermentescible ont été obtenues en substituant du maïs grain par du blé, les céréales représentant 35 % de la MS du régime. La ration de base comportait par ailleurs 20 % de EM et 16 % MD. Ces six régimes ont été distribués à cinq vaches laitières selon un schéma en carré latin incomplet avec des périodes de 12 jours.

Dans l'essai 4, quatre sources glucidiques différent par leur origine (amidon ou constituants pariétaux) et par leur rythme de fermentation (rapide ou plus lent) ont été comparées dans le cadre d'un régime bien pourvu en fourrage grossier. En pratique les 4 glucides ont été du blé, du maïs grain, un mélange riches en pectines et cellulose rapidement dégradables (pulpes de betterave et de citrus, son fin de blé) ou des coques de soja. Ces glucides constituaient 30 % de l'énergie nette du régime (soit respectivement 25, 24, 28 et 29 % de la MS du régime). La ration de base était constituée par 37 % de EM et 25 % de luzerne déshydratée hachée. Les régimes ont été distribués à quatre vaches laitières selon un carré latin avec des périodes de 4 semaines.

Dans l'essai 5, trois teneurs en amidon rapidement dégradables ont été comparées avec des régimes riches en fourrages finement hachés. Les traitements correspondaient à l'introduction de 10, 23 et 36 % de blé. Le blé est venu en substitution des fourrages. Un quatrième traitement correspondant au régime riche en blé a été distribué à 90 % de l'animal à volonté. Le fourrage était constitué par moitié par EM et par MD (respectivement 37, 31 et 25 % de la MS totale pour les 3 niveaux de blé). Ces régimes ont été distribués à quatre vaches Holstein selon un dispositif en carré latin avec des périodes de 14 jours.

Dans tous les essais, les rations ont été distribuées en deux fois par jour avec un intervalle de 11 ou 12 heures entre les deux distributions (sauf dans l'essai 2 où les 6 repas ont été espacés de 3 heures entre 7.00 h et 22.00 h). Pour bien individualiser les grands repas, le temps d'accès à l'auge a été limité à 4 heures après chaque distribution. Les fourrages et concentrés

Tableau 1
Amplitude de variation des principaux paramètres enregistrés au cours des essais pour les animaux alimentés à volonté en deux repas par jour.

Essais	1	2	3	4	5
Caractérisation des régimes	Long - Broyé	Long - Broyé	Broyage x Maïs ou Blé	Maïs - Blé - Pulpes - Coques	% Blé
Concentré (% MS)	32 - 32	31 - 31	45	38	27 à 49
dont céréales	21 - 21	21 - 21	34	25	10 - 23 - 36
Particules de fourrage					
Longueur moyenne (mm)	4,2 - 3,5	5,1 - 4,5	4,5 - 11,3 - 18,1	7,6	5,3
Particules > 4 mm (% MS)	34 - 21	24 - 13	27 - 41 - 54	52	44
MSrdeg du régime (g/kg MS)	471 - 521	495 - 540	315 à 515	309 à 436	373-445-518
Quantités ingérées (kg MS/j)	21,9 - 21,9	21,7 - 21,7	19,5 à 16,5*	20,1 à 22,3	21,6 - 21,6 - 21,3
IM (min/kg MS)	30 - 26*	27 - 22*	46 à 31 *	40 à 43	38 - 35 - 36
pH moyen	6,3 - 6,3	6,2 - 6,0	6,5 à 6,4	6,4 à 6,2	6,4 - 6,4 - 6,4
Durée pH < 6 (h)	4,9 - 6,8*	8,1 - 10,4*	2,5 à 5,0*	1,0 à 5,0	3,2 à 6,2*
Ac acétique (% AGV)	59,5 - 53,9*	63,4 - 56,5*	59,4 à 52,3*	67,0 à 62,5	58,2 à 52,6 *
Ac propionique (% AGV)	18,8 - 23,8*	16,9 - 23,0*	22,0 à 23,3	19,0 à 20,1	21,7 à 28,0 *
Ac mineurs (% AGV)	2,6 - 5,1*	1,7 - 3,5*	2,8 - 6,8*	1,5 à 2,1	4,0 à 5,8 *
Digestibilité NDF	0,58 - 0,52	0,53 - 0,49	0,48 à 0,38	0,43 à 0,51	0,46 à 0,40
Taux butyreux (g/kg)	36,6 - 29,2*	41,6 - 36,8*	31,9 à 19,4*	39,6 à 37,6	27,1 à 18,9*

* : P < 0,05

ont été mélangés dans l'auge. Les régimes étaient isoénergétiques et isoazotés. Ils étaient complétés avec du tourteau de soja (tanné ou non) et de l'urée de manière à couvrir 110 % des besoins de l'animal et des microbes du rumen. Pour éviter l'apparition d'éventuels troubles digestifs, du bicarbonate de calcium a été ajouté à raison de 0,4 % de la MS des régimes. Au début des essais les vaches fistulées avaient entre 100 et 130 J de lactation et produisaient 30 à 40 kg de lait avec un taux butyreux de 34 et 37 g/kg.

1.2. MESURES RÉALISÉES

Le pH et les orientations fermentaires ont été caractérisés par une cinétique rapprochée effectuée sur 10 heures après le début du repas du matin. La durée de pH < 6 a été calculée. Les prélèvements étaient espacés de 30 min durant les 3 premières heures puis de 1 heure durant les 3 heures suivantes et de 2 heures ensuite. La durée de mastication a été enregistrée durant 4 jours consécutifs et l'IM a été calculé par le rapport entre la durée totale de mastication et les quantités de MS ingérées les jours de mesures. La digestibilité a été mesurée par collecte totale des fèces pendant 4 jours (essais 3 et 5) et 5 jours (essais 1, 2 et 4). Pour la mesure de la pression partielle en CO₂ du sang et la mesure des réserves alcalines, des prélèvements de sang ont été réalisés dans la veine de la queue au moment du pic des fermentations dans l'essai 5. L'analyse des gaz a été effectuée immédiatement après le prélèvement (pH mètre ABL 330).

La distribution granulométrique des fourrages a été déterminée à chaque période par tamisage en voie sèche. Six tamis à maille carrées ont été utilisés (longueur de côté : 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 mm) excepté pour l'ensilage de maïs pour lequel un échantillon d'environ 800 g a été préalablement tamisé sur des tamis de 20 et 10 mm (tamis ITCF). Les particules des fourrages agglomérés ont été au préalable délitées sans utiliser de force mécanique. Le fourrage (100 g) a été immergé dans de l'eau additionnée de 0,5 % d'un détergent neutre pendant 4 heures, puis étalés sur du papier filtre et séchés à l'étuve (48 heures, 60°C). La granulométrie des concentrés n'a pas été déterminée. Les données ont été exprimées par la taille moyenne et en pourcentage cumulé au dessus des différents tamis.

Nous avons caractérisé l'ensemble des régimes sur des bases communes en calculant la teneur en « MS rapidement dégradable (MSrdeg en g/kg MS) ». La MSrdeg représente la quantité de MS d'un aliment disparue en 4 heures d'incubation in sacco (table de valeur élaborée par Decevre et Peyraud, non publié). La quantité de MSrdeg du régime est calculée en sommant les quantités issues des matières premières constitutives des concentrés et celles des fourrages en admettant que seule les particules de fourrage passant à travers un tamis de 4 mm concourent à cette fraction.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Les essais ont été conduits sur des animaux à bon niveau d'ingestion (21,0 kg MS, tableau 1) sauf dans l'essai 3 où les quantités ingérées ont fortement chuté lorsque les vaches ont reçu le blé en place du maïs (17,0 vs 19,8 kg/j, $P < 0,01$). La taille moyenne des particules de fourrage a varié de 3,1 à 18 mm. La granulométrie des fourrages est souvent représentée par les particules retenues sur des tamis de 2 ou 4 mm qui représentent les particules ne pouvant pas quitter le réticulo rumen sans une comminution préalable (Poppi et al, 1980). La proportion des particules retenues sur un tamis de 4 mm a varié de 13 à 54 % de la MS pour les fourrages. Elle a été très étroitement corrélée à celle des particules retenues sur un tamis de 2 mm ($r = 0,95$). Finalement 9 à 32 % de la MS totale des régimes a été retenue sur un tamis de 4 mm. L'IM a varié de 22 à 42 min/kg MS et le ratio C2 : C3 a varié de 2,2 à 3,7. Le pH moyen du rumen a été faible en moyenne (6,3). Il a relativement peu varié à la différence de la durée de pH < 6 qui a été comprise entre 0,5 à 5,2 h. En conséquence, la prédiction de la chute de digestibilité du NDF et du C2 à partir des durées de pH < 6 est plus précise que la prédiction à partir du pH moyen.

C'est pourquoi la durée de pH < 6 a été retenue comme indicateur des risques.

Dans les essais 1 et 2, la réduction de la taille des particules a entraîné un fort accroissement de la durée de pH < 6 (+ 2 h, $P < 0,05$) et de la proportion de C3 (23,4 vs 17,9 %, $P < 0,05$) et une diminution de la proportion de C2 (55,8 vs 61,5 %, $P < 0,01$) et de la digestibilité du NDF (0,46 vs 0,52, $P < 0,01$). Elle a aussi accru la proportion des acides valérique et caproïque (C5 et C6, appelés mineurs par la suite) (4,3 vs 2,1 %, $P < 0,01$). Dans l'essai 3 le broyage a eu des effets similaires bien que l'on se soit situé dans le cas de régimes avec des particules de plus grande taille en moyenne. Il a diminué linéairement la proportion de C2 (de 58,2 à 54,2 %) au profit du C3 et des acides mineurs.

Dans l'essai 3, la substitution du maïs par du blé a fortement accru la durée de pH < 6 (2,5 vs 1,5 h, $P < 0,01$) et diminué la proportion de C2 (54,3 vs 58,0 %, $P < 0,05$) essentiellement au profit des acides mineurs (6,1 vs 3,7 %, $P < 0,01$), la proportion de propionate étant peu affectée. En revanche dans l'essai 4, les effets de l'origine de l'amidon ont été plus modestes. Le blé a légèrement diminué le C2 (62,5 vs 64,7 % $P < 0,01$) sans affecter le C3 et les acides mineurs. Les effets du rythme de dégradation ont également été modérés pour les constituants pariétaux. Ces différences entre les deux essais sont sans doute à relier aux taux d'incorporation plus élevés des céréales conjuguée à l'utilisation de régimes plus fins dans l'essai 3.

Dans l'essai 5, l'accroissement de la proportion de blé a accru les durées de pH < 6 (1,6 à 3,1 heures, $P < 0,10$) et fortement diminué la proportion de C2 (de 58,2 à 52,6 %, $P < 0,05$) et accru le C3 (21,7 à 28,0 %, $P < 0,05$) et les acides mineurs (4,0 à 5,8 %, $P < 0,01$). La réduction du niveau d'ingestion a limité les effets observés avec la dose la plus élevée de blé en conduisant à des durées de pH < 6 et des profils fermentaires voisins de ceux observés avec la dose intermédiaire de blé.

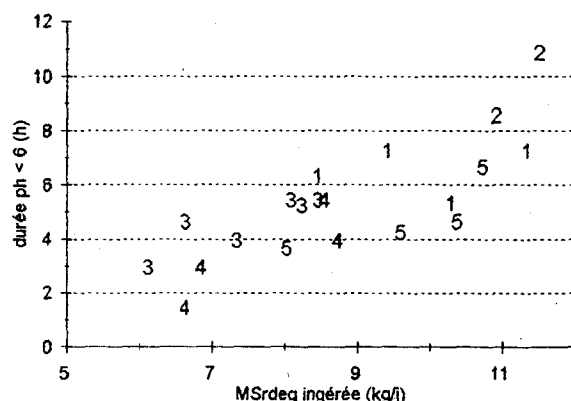
La réduction de la taille des particules a réduit l'IM (essais 1, 2 et 3) en accord avec les nombreuses données de la littérature (Sauvant, 2000). Mais les variations de l'IM n'ont pas toujours pu être reliées à l'effet des traitements sur les durées de pH < 6. Dans l'essai 1, les effets digestifs du broyage ont été fortement limités lorsque les animaux ont été restreints (interaction, $P < 0,05$) bien que l'IM ait été réduit d'une même valeur par le broyage aux deux niveaux d'offre (- 5 min/kg MS, $P < 0,01$). De même, dans l'essai 5, la réduction du niveau d'ingestion a limité les effets négatifs de la dose la plus élevée de blé bien qu'elle ait réduit l'IM (- 2,7 min, $P < 0,10$). Dans l'essai 4, les chutes de pH plus importantes observées avec le blé comparé au maïs ont été obtenues malgré des IM plus élevées avec le blé (41,3 vs 37,0 min/kg MS, $P < 0,05$). De même, la granulométrie seule ne permet pas de prévoir la fibrosité puisque les durées de pH < 6 ont été affectées par la nature du concentré à même répartition granulométrique des régimes (essais 3 et 4). Les effets du broyage sur le pH et les déviations fermentaires pourraient s'expliquer par un accroissement de la vitesse de fermentation liée à une accessibilité accrue des parois pour les microbes. Le broyage a augmenté la vitesse d'accumulation postprandiale des AGV dans les 3 heures qui ont suivi le début du repas, principalement chez les animaux nourris à volonté (+ 18 vs + 11 mmol/l/h). Les effets du niveau d'ingestion, des sources de glucides à dégradation rapide (essais 3 et 4) ainsi que ceux liés à l'accroissement de la proportion de blé (essai 5) sont également cohérents avec l'idée d'un contrôle de l'activité microbienne par la quantité d'éléments rapidement fermentescibles mis à sa disposition des microbes. L'adaptation de la stochiométrie des fermentations avec l'accumulation des acides gras à chaîne longue qui représentent 4 à 7 % des AGV dans les régimes conduisant à de fortes réductions du C2 (C2 compris entre 52 et 60 %) doit aussi traduire cet excès d'énergie mise à disposition des microbes en regard de leur capacité de métabolisme (Sauvant et al, 1999).

Le critère MSrdeg a permis de prédire avec une précision raisonnable la durée de pH < 6 (figure 1) en prenant en compte les effets de la nature des concentrés, du broyage des fourrages et du niveau d'ingestion. L'IM a été un prédicteur moins performant en inter essai (etr = 1,55 vs 1,31 h) mais surtout n'a

pas permis de prendre en compte la variabilité intra essai. La chute postprandiale du pH est avant tout gouvernée par la quantité ingérée d'éléments à dégradation rapide que celle ci provienne d'un broyage accru ou de l'apport de concentré. D'après l'équation obtenue, le pH ne descend pratiquement pas en dessous de 6 lorsque le régime apporte moins de 6 kg de MSrdeg. C'est notamment le cas pour des régimes grossiers à base de foin, d'ensilage d'herbe comportant moins de 50 % de concentré. En revanche, la durée de pH < 6 s'accroît rapidement pour des niveaux de MSrdeg supérieurs à 8 kg/j. C'est sans doute pourquoi la nature des glucides n'affecte de manière sensible les fermentation ruminales que lorsqu'ils représentent plus de 50 % de la MS des régimes à fourrage grossier.

Figure 1

Effet de la quantité de MSrdeg ingérée sur la durée de pH < 6 :
durée = 0,060 MSrdeg² (n = 20, etr = 1,31) (n° des essais).



La variabilité journalière des quantités ingérées a été sensiblement accrue avec le blé comparé au maïs dans l'essai 4 ($\pm 1,5$ vs $\pm 0,7$ kg/j) et avec le régime à 36 % de blé dans l'es-

sai 5 ($\pm 2,0$ vs $\pm 1,3$ kg/j). Ceci peut traduire un état d'« inconfort » des animaux. En outre dans l'essai 5, les régimes les plus riches en blé ont aussi entraîné une baisse des réserves alcalines en fin de repas par rapport au régime à 10 % de blé (0,3 vs 2,6 mEq/ml, $P < 0,01$). Ces régimes se caractérisaient par des teneurs en MSrdeg comprises entre 460 et 520 g/kg MS ce qui peut correspondre à une limite maximale à ne pas dépasser pour limiter les risques d'apparition de troubles digestifs. Toutefois, dans les essais 1 et 2, la teneur en MSrdeg des régimes les plus fins a été un peu plus élevée (520 à 540 g/kg MS) sans troubles apparents. Il est possible que la présence de quantités importantes de luzerne déshydratée ait apporté des tampons ayant permis de limiter la chute des réserves alcalines du sang. Ce phénomène a été observé dans un essai récent (Peyraud, non publié).

CONCLUSION

Ce travail est une première étape. Il montre que la fibrosité des régimes ne peut s'exprimer uniquement à partir des critères pariétaux tels que la teneur en NDF ou la granulométrie et qu'il importe de prendre en compte le rythme de dégradation des aliments. Le critère MSrdeg semble être pertinent pour intégrer plusieurs sources de variation mais il reste encore empirique et doit être mieux précisé. Pour établir un système permettant de cerner les zones à risque, il reste aussi à préciser les lois de réponse de la digestion ruminale et des réserves alcalines du sang aux variations de l'apport de MSrdeg et de composés pouvant avoir un rôle de tampon.

Mertens, D.R., 1997. J. Dairy Sci., 1463-1481.

Poppi, D.P., Norton, B.W., Minson, D.J., Hendricksen, R.E., 1980. J. Agric. Sci. Camb., 94, 275-282.

Sauvant, D., 2000. INRA, Prod. Anim., 13(2), 99-108

Sauvant, D., Dulphy, J.P., Michalet Doreau, B., 1990. INRA Prod Anim. 3, 309-318.

Sauvant, D., Meshy, F., Mertens, D., 1999. INRA Prod Anim. 12(1), 49-60.