

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

D. SAUVANT

INRA-INAPG Laboratoire associé
de Nutrition et Alimentation
16 rue Claude Bernard,
75231 Paris Cedex 05

e-mail : sauvant@inapg.inra.fr

Granulométrie des rations et nutrition du ruminant

Le contrôle par broyage de la granulométrie des aliments et des rations des ruminants est un moyen technologique important pour maîtriser leur nutrition. Cet article a pour objectif de passer en revue les principales composantes de la nutrition de ces animaux qui sont susceptibles d'être influencées par la granulométrie des rations. Compte tenu de l'évolution des problématiques qui traversent les filières animales, une attention particulière est portée aux aspects qui déterminent les réponses multiples des animaux aux variations de la granulométrie.

Le sujet abordé n'est pas récent puisque des recherches lui avaient été consacrées dans les années 60 et 70, en particulier à l'INRA pour les fourrages par C. Demarquilly et ses collaborateurs. Les parties les plus originales de ce travail concernent, d'une part, l'étude bibliographique quantitative que nous effectuons avec D. Mertens sur les effets quantitatifs des caractéristiques des rations, de leur

fibrosité en particulier (Sauvant et Mertens 1997) et, d'autre part, la base de données que nous élaborons sur le profil granulométrique des aliments.

Résumé

Cette revue a pour but de dégager les principaux effets nutritionnels quantitatifs des variations de la granulométrie des aliments et des rations des ruminants. La granulométrie est évaluée par tamisages successifs et résumée par le diamètre médian des particules (d50). D'autres paramètres peuvent être utilisés comme la proportion de particules retenue sur un tamis de 2 ou de 4 mm. Ces différents critères ne sont pas linéairement liés. Une réduction d'1 mm de d50 sous les seuils de 3-4 et 1 mm diminue les durées de mastication d'environ 100 et 500 min/j chez les bovins et les ovins respectivement. La granulométrie influence plus les durées de rumination que d'ingestion. Une granulométrie plus fine améliore l'ingestibilité des fourrages pour les ovins ; pour les bovins, les résultats semblent être moins nets. Dans le rumen, le pH et le rapport acétate/propionate sont diminués de 0,5 (si le pH initial est inférieur à 6,2) lorsque d50 diminue de 1 mm en dessous d'un seuil de 3-4 mm chez les bovins. La dégradabilité ruminale des fractions amylacées et protéiques est significativement influencée par le d50, à raison d'environ 12 points de dégradabilité par mm de d50.

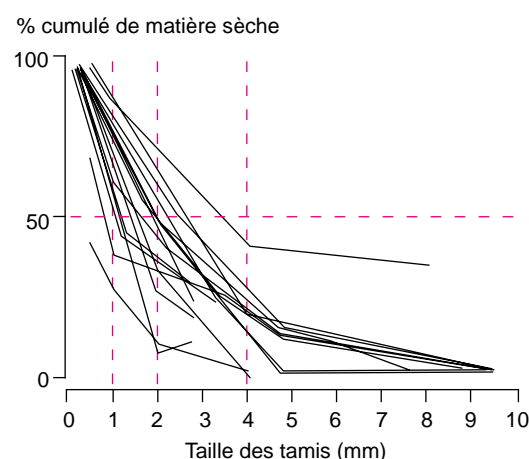
Les données relatives aux métabolismes protéique et énergétique sont encore trop rares et dispersées pour permettre de dégager des lois quantitatives. Par contre, le taux butyreux du lait chute significativement, d'environ 2 g/kg par mm de d50 en dessous d'une valeur de 4-5 mm.

1 / Les variations de la granulométrie des aliments et des rations

1.1 / Méthodes et caractérisation des aliments

L'évaluation de la granulométrie d'un aliment se fait au moyen d'une série de tamis successifs, de tailles de maille décroissantes (Melcion 2000, ce numéro). Les résultats de ces tamisages sont souvent représentés sous forme d'une répartition particulière cumulée (figure 1), l'ordonnée étant une échelle classique ou normalisée. Il existe différentes façons de raisonner l'information contenue dans des histogrammes granulométriques vis-à-vis de la nutrition du ruminant. Le critère le plus courant correspond à la valeur de l'espérance mathématique, ou moyenne géométrique, de la distribution particulière (= diamètre médian des particules, ou d50, = mean particle size ou MPS en anglais). Ainsi, pour 215 aliments ou rations pour ruminants de la

Figure 1. Analyse granulométrique de rations complètes pour bovins.

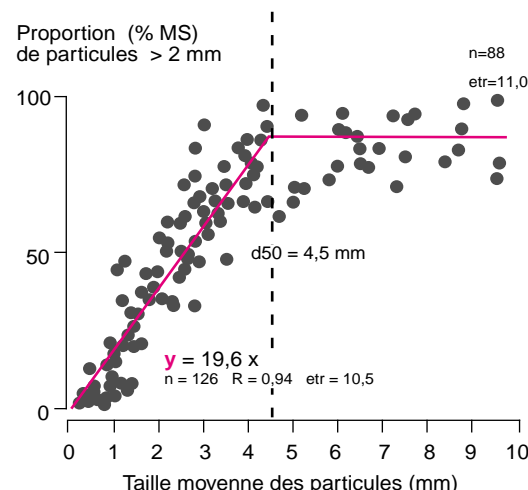


base de données que nous avons constituée, le diamètre médian est de $3,07 \pm 1,97$ mm. En fait, les fourrages sous forme longue ne sont pas considérés dans ces résultats car ils ne sont en général pas l'objet de mesures granulométriques avec les méthodes classiquement reconnues. Dans le cas des ruminants, la question se pose de savoir s'il n'est pas plus judicieux de distinguer la proportion des grosses particules retenues par un seul tamis de taille de maille donnée (2 ou 4 mm par exemple). Cette approche correspond au souhait de pouvoir quantifier la proportion des particules qui ne pourront pas quitter le réticulo-rumen sans une comminution préalable (= particules qui « font ruminer »). On estime que les particules ainsi séquestrées dans le rumen sont retenues par des tamis de tailles de maille d'environ 1 mm chez les ovins-caprins et 2-3 mm chez les bovins (Poppi *et al* 1980). Ce qui semble être important à souligner, c'est la non linéarité de la relation qui associe les tailles moyennes des particules avec les proportions des particules retenues par un tamis de taille donnée. Ainsi, la figure 2 indique qu'en-dessous du seuil de d_{50} d'environ 4,5 mm la proportion de particules de taille supérieure à 2 mm est égale à environ 20 fois la d_{50} . En outre, les relations entre les proportions de particules retenues sur différents tamis ne sont elles-mêmes pas linéairement liées. Dans une optique de formulation des régimes sur la base de critères additifs, cela signifie que si un de ces deux paramètres est additif, l'autre ne l'est pas.

Les effets biologiques des variations de la granulométrie moyenne chez le ruminant sont en général non linéaires en fonction des valeurs de d_{50} . Une telle situation peut être difficile à interpréter statistiquement lorsque des données sont rassemblées en une base. Dans ce cas, il est préférable de travailler avec des relations linéaires. C'est la raison pour laquelle le logarithme de la d_{50} ou la densité particulaire (= $1/\text{taille moyenne des particules}$) a été parfois utilisé dans le cas des ruminants. Compte tenu des relations non linéaires « ressemblantes » entre la d_{50} et les effets biologiques d'une part, et les proportions de particules supérieures à un seuil de taille, d'autre part, on peut penser que ces

deux derniers critères sont linéairement liés, cependant, la bibliographie demeure encore insuffisante pour permettre de conclure sur ce sujet.

Figure 2. Relation entre la taille moyenne des particules et la proportion de particules de taille supérieure à 2 mm.



1.2 / Résultats

Nous mettons actuellement en place une table de valeurs de référence concernant la granulométrie des principaux fourrages et en fonction de leurs traitements technologiques. A titre d'exemple, la figure 3 indique la variabilité des profils observés pour l'ensilage de maïs ($n = 34$, $d_{50} = 4,20 \pm 2,16$ mm). Les tailles moyennes des particules des fourrages varient sensiblement en fonction du traitement technologique subi. Les d_{50} varient également largement au sein d'un même type de traitement, ainsi l'écartement des couteaux d'un hacheur présente une influence très significative, mais non homogène d'un fourrage à l'autre, sur la granulométrie (De Boever *et al* 1993). D'autre part, la composition chimique des fractions particulières des fourrages hachés ou broyés dépend de la d_{50} de la fraction considérée (Jaster et Murphy 1983).

Figure 3. Analyse granulométrique de l'ensilage de maïs.

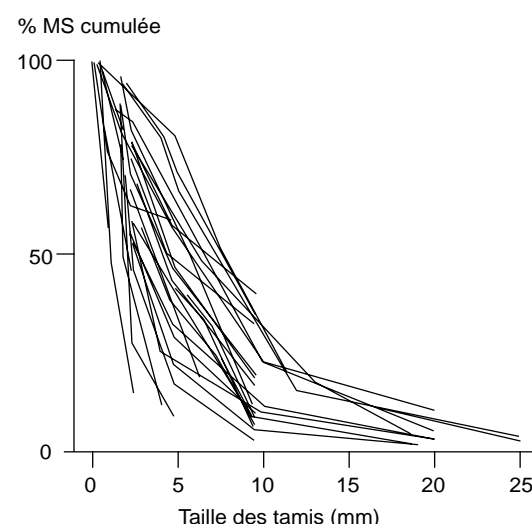
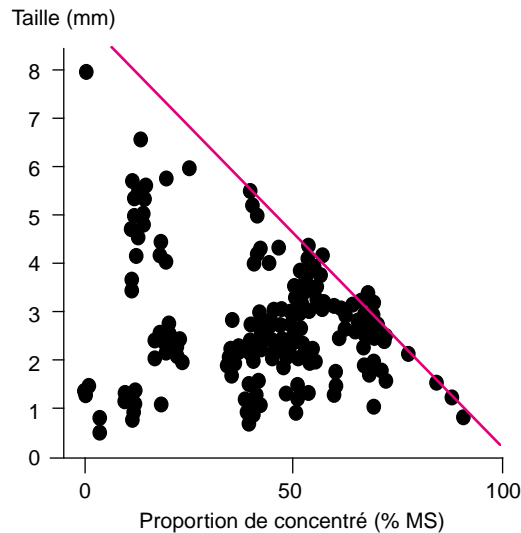


Figure 4. Taille des particules de la ration et proportion de concentré.



La d50 des aliments concentrés est généralement faible. Pour les 27 données de profil particulaire rassemblées de la littérature, elle a été de $0,84 \pm 0,65$ mm. Pour les concentrés, le diamètre de la grille de broyage présente également une influence significative, mais variable selon les aliments et les technologies mises en oeuvre (Melcion 2000). Il existe également pour les concentrés une relation entre la taille des fractions considérées et leur composition chimique ainsi que leurs propriétés physico-chimiques (Cerneau et Michalet-Doreau 1991, Maaroufi *et al* 2000).

La granulométrie des rations (d50R) dépend a priori directement de celle de ses constituants i (d50i) et de leur proportion respective ($0 < p_i < 1$) dans le régime :

$$d50R = \sum p_i \times d50i$$

La figure 4 présente les valeurs de d50R et de proportion d'aliment concentré dans notre base de données, elle permet de relier d50R et proportion de concentré pour les rations à fourrage long. D'autre part, la figure 5 permet d'avoir une idée des répartitions des valeurs des deux principaux paramètres de la fibrosité des rations que sont les teneurs en NDF (fibre « chimique ») et les d50R (fibre « physique »).

2 / Influence sur la mastication et l'ingestion

2.1 / Le travail masticatoire

a / Principes et modélisation

La réduction *in vivo* de la taille des particules, appelée comminution, dépend pour les trois quarts des phénomènes masticatoires d'ingestion et surtout de rumination (Mc Leod et Minson 1988 ; tableau 1). Ce processus de comminution peut être modélisé de façon simple par voie mécanique en créant un broyeur simulateur (Wilson et Kennedy 1996) et par voie mathématique en considérant un système linéaire à compartiments (ex : grosses, moyennes et petites particules). Sur l'exemple modélisé dans ce travail, les résultats révèlent l'existence de taux fractionnaires de comminution partiels différents selon la fraction particulaire considérée (2 % par heure pour les grosses particules, 4 % par heure pour les moyennes et petites particules). Sous cette hypothèse, ce modèle simple permet de bien simuler la dynamique de la comminution particulaire mesurée par ces auteurs (figure 6).

Figure 5. Variations des teneurs en fibres « physique » et « chimique » des aliments.

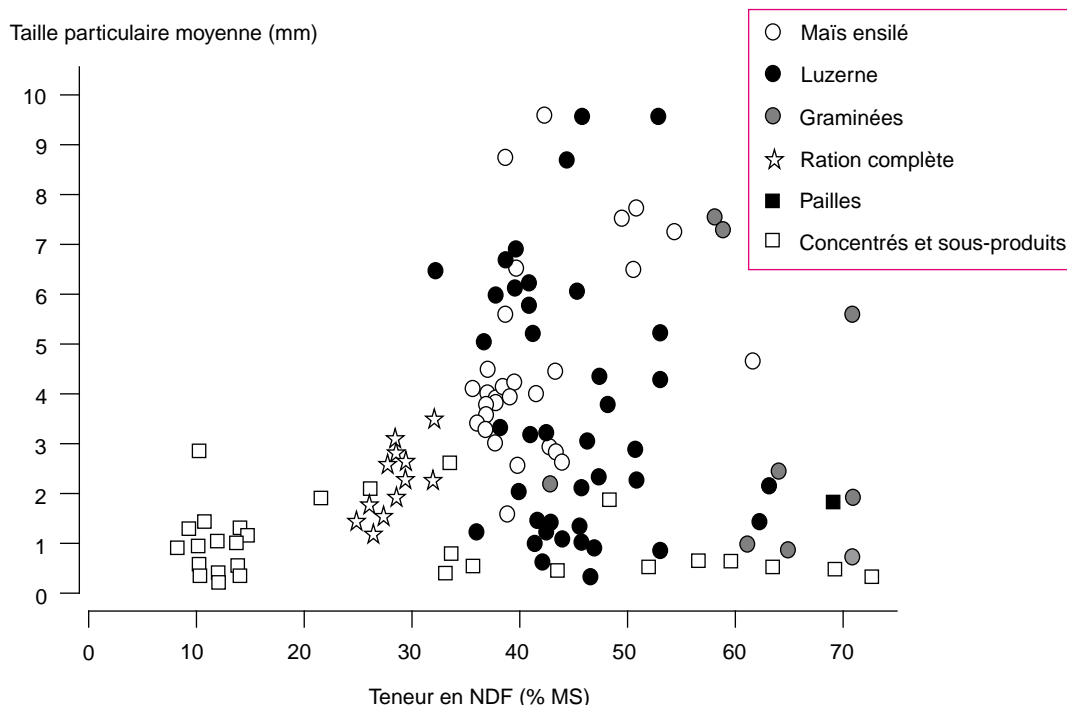
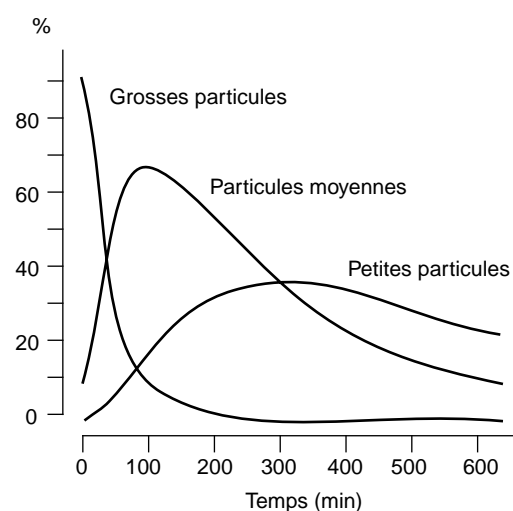


Tableau 1. Répartition de la comminution des grosses particules (retenues par un tamis de 1,18 mm) selon les causes et en fonction du fourrage (McLeod et Minson 1988).

	Ray-grass italien		Luzerne		Moyenne
	Feuilles	Tiges	Feuilles	Tiges	
Ingestion	34	25	26	17	25
Rumination	49	48	47	57	50
Digestion + détritron	14	20	16	16	16
Pertes fécales	3	7	11	11	8

Figure 6. Simulation du travail d'un « masticateur » artificiel.



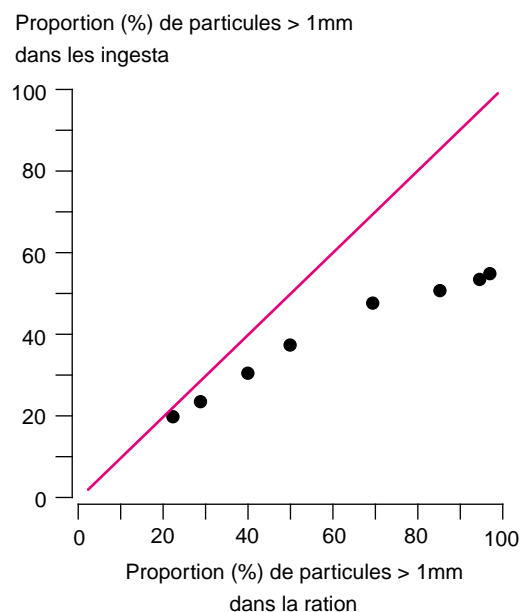
La durée quotidienne de rumination diminue lorsque la taille des particules alimentaires est inférieure à 1 mm chez les ovins et 3-4 mm chez les bovins. La durée d'ingestion varie peu.

Des données disponibles permettent de connaître l'efficacité de la comminution d'ingestion (figure 7). Il apparaît que cette comminution est d'autant plus efficace que les particules ingérées sont de grande taille. La rumination réalise un travail de comminution post-prandial qui permet aux particules du rumen d'atteindre une taille et une densité autorisant leur passage dans le feuillet, la caillette puis l'intestin. Ainsi, pour élaborer un modèle d'ingestion et digestion, Sauvant *et al* (1996) ont retenu qu'un cycle de rumination du mouton (1 min et 75 à 115 coups de mâchoire, Grenet 1989) réduisait en moyenne de 60 à 65 % des particules de grande taille (supérieure à 1 mm) en particules de petites taille. Chez les bovins, ce taux est de l'ordre de 70 % pour des particules dont la taille moyenne est supérieure à 3,35 mm selon Kennedy (1985).

b / Influence de la granulométrie sur la mastication

Le ruminant adapte son travail masticatoire à la granulométrie de son régime. Ainsi, lorsque la d50 d'un fourrage ou d'un régime alimentaire est inférieure à un seuil donné, les durées d'ingestion, et surtout de rumination, diminuent de façon nette. Ce phénomène a été bien démontré par Demarquilly *et al* (1978) chez le mouton (figure 8), avec un seuil de l'ordre de 1 mm. En dessous de ce seuil, la durée de rumination diminue d'environ

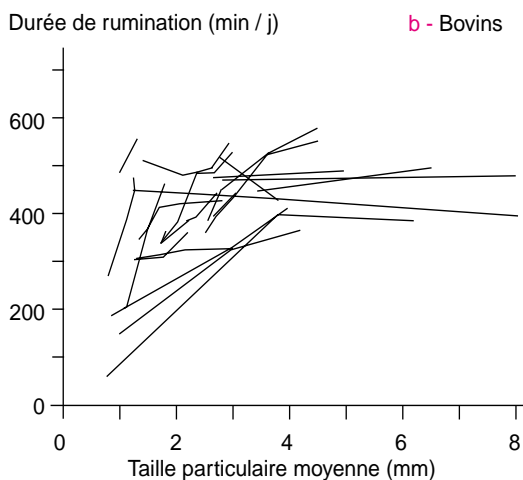
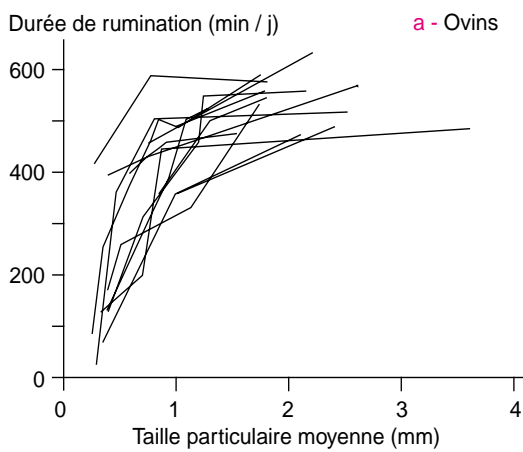
Figure 7. Comminution d'ingestion chez le mouton.



ron 500 min/j pour chaque mm de moins de d50. Un phénomène comparable se retrouve également, à travers les données de la littérature, dans le cas des bovins avec un seuil de d50 plus élevé, de 3 à 4 mm (figure 8) et un taux de réduction de la durée de rumination d'environ 100 min/mm de d50. Ces phénomènes expliquent la sensibilité de l'indice de mastication (min/kg MSI) des rations des ovins et des bovins (figure 9) aux variations de la d50 de leur régime. Cette figure indique qu'un « rebord de plateau » semble être atteint pour une d50 d'environ 2,5 et 5 mm pour les ovins et les bovins respectivement. Les relations sont linéaires lorsque l'on considère la densité particulaire du régime à la place de la d50.

Dans la mesure où les teneurs en paroi végétale présentent également une influence sur les durées de mastication, il importe de chercher à comparer les effets respectifs de la fibre chimique (NDF) et de la taille des particules (ou de la densité particulaire). La fibre chimique influence de façon quasi identique les durées d'ingestion et de rumination (4,20 et 4,25 min par point de NDF (% MS) respectivement d'après notre base de données bovins, n = 346) alors que la densité particulaire influence nettement plus les durées de rumination que d'ingestion (210 et 61 min par unité de densité d'après cette base de données, n = 130).

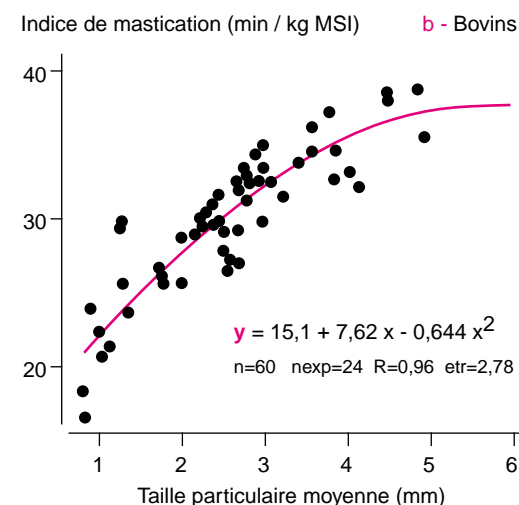
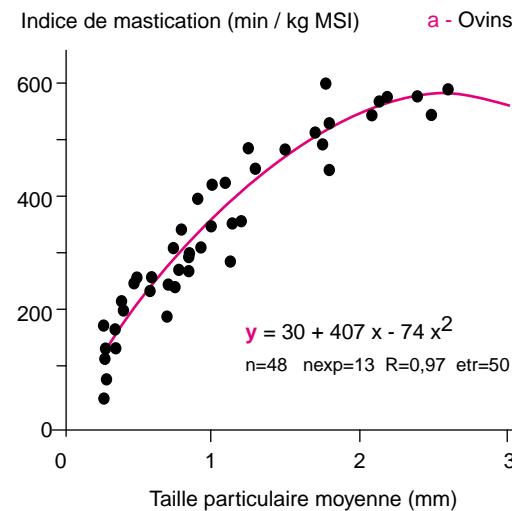
Dans le cas des bovins, l'équation intra- de prédiction de l'indice de mastication de la ration à partir de sa d50 (cf figure 9, n = 60, $\text{etr} = 2,78 \text{ min}$) est plus précise, sur la base de l'écart type résiduel, que la prédiction à partir de la teneur en NDF lorsque celle-ci a été le seul facteur expérimental (n = 195, $\text{etr} = 4,25 \text{ min}$). Avec ces prédictions, les variations de l'indice de mastication par point de d50 (autour de 4 mm) et par point de NDF (autour de 40 % MS) sont de 2,5 et 1,1 min respectivement.

Figure 8. Influence de la taille des particules de fourrage sur la durée de rumination.**c / L'efficacité masticatoire globale**

Compte tenu de l'adaptation évoquée ci-dessus, l'efficacité masticatoire globale dépend de la granulométrie du régime. Aussi curieux que cela puisse paraître, ce sont les régimes les plus riches en concentré, ou ceux de granulométrie les plus fines, qui induisent les granulométries les plus grossières dans les matières fécales ! Ce phénomène plusieurs fois observé chez les bovins (Thomas et Campling 1977) montre bien que, sous un certain seuil granulométrique, les phénomènes masticatoires et la motricité ruminale sont fortement perturbés en raison vraisemblablement du manque de fibrosité des contenus ruminiaux. Pour une même ration, les ovins et caprins présentent une granulométrie fécale plus fine que les bovins.

2.2 / L'ingestibilité du régime

Il a été largement démontré qu'une réduction de la taille des particules d'un fourrage aboutissait à une amélioration de son ingestibilité. Ce problème a notamment été étudié en France par l'équipe de C. Demarquilly sur des ovins principalement. L'explication tient

Figure 9. Relation entre l'indice de mastication et la taille des particules de fourrage.

notamment au fait qu'un ruminant possède une capacité masticatoire d'environ 1000 minutes par jour. Lorsqu'un fourrage présente une « valeur masticatoire » élevée nécessitant une durée de mastication proche de 1000 minutes par jour, l'animal s'adapte en diminuant son niveau d'ingestion (régulation physique par encombrement « buccal »). Ce plafond d'environ 1000 min s'observe pour les ovins, les caprins et les bovins.

L'influence de la granulométrie des fourrages sur l'ingestibilité est en partie prise en compte dans les tables INRA dans lesquelles les valeurs d'encombrement des ensilages d'herbe dépendent de leur finesse de hachage (écart d'environ 0,1 UE entre brins longs et courts). En revanche, l'ensemble des données de la littérature disponible en bovins ne permet pas d'établir de relation générale significative entre le d50 des rations et le niveau d'ingestion des rations. Il conviendrait d'examiner plus attentivement chacun des essais pour tenter d'obtenir des éléments d'explication sur la variabilité des réponses observées (interaction essai x réponse).

3 / Influence de la granulométrie sur la digestion

3.1 / Aspects quantitatifs

a / Le flux salivaire

Compte tenu de la relation entre la mastication et le flux de salive, il apparaît une relation entre la d50 des régimes et le flux de liquide ruminal par kg de MSI qui est très corrélée au flux salivaire/kg MSI (Jacques *et al* 1989).

b / Les transits particulaires

Au sein d'un même régime, les particules les plus petites, qui sont également les plus denses, sont moins ruminées, elles sédimentent et passent plus rapidement dans la suite du tube digestif (Faichney 1995). Ce phénomène se retrouve lorsque l'on rassemble des mesures de transit de ration dans lesquelles les fractions de fourrage et de concentré ont été marquées de façon séparée (figure 10). Cette figure indique en outre que, lorsque le transit global est plus rapide, en raison d'un niveau d'ingestion plus important, la discrimination entre les valeurs des taux de passage des particules des concentrés et des fourrages devient plus marquée. Ces phénomènes ne sont sans doute pas sans conséquence sur les valeurs PDI des aliments qui supposent un taux de transit constant de 6 % par heure.

Pour un même niveau d'ingestion, Faichney (1995) a en revanche montré qu'une ration plus broyée, donc moins mastiquée, entraînait un encombrement ruminal plus important et une durée de rétention ruminale des particules plus longues. Ce phénomène avait déjà été observé par Thomas et Campling (1977) sur des bovins et des ovins. L'apparente contradiction entre cet effet global de la ration et ce qui est observé pour les classes de particules au sein d'une ration est vraisemblablement la conséquence de la baisse de motricité du rumen induite par la réduction de la taille des particules (disparition du mat fibreux). Par contre, lorsque la réduction de d50 entraîne un accroissement important de l'ingestibilité d'un fourrage ou d'une ration, il y a une accélération du transit (cf. par exemple les résultats de Demarquilly *et al* 1978).

c / Digestibilité et partition de la digestion

Différents auteurs ont montré que la réduction de la taille des particules de la ration ou d'un de ses constituants majeurs aboutit à une réduction de la digestibilité des constituants pariétaux. Ce résultat est à rapprocher de la baisse d'activité cellulolytique observée pour les rations riches en fourrages broyés ou hachés très finement (Jarrige *et al* 1973). Ce phénomène est plus accentué si la baisse de d50 est associée à un niveau d'ingestion accru. Dans le cas des fourrages, compte tenu de la proportion des parois, l'effet sur la digestibilité des parois se répercute sur celle de la matière organique et, par voie de conséquence, sur la valeur énergétique.

Figure 10. Taux de passage des particules de fourrage et de concentré selon le transit global.

Taux de passage des particules (% par heure)
kf : fourrage, kc : concentré

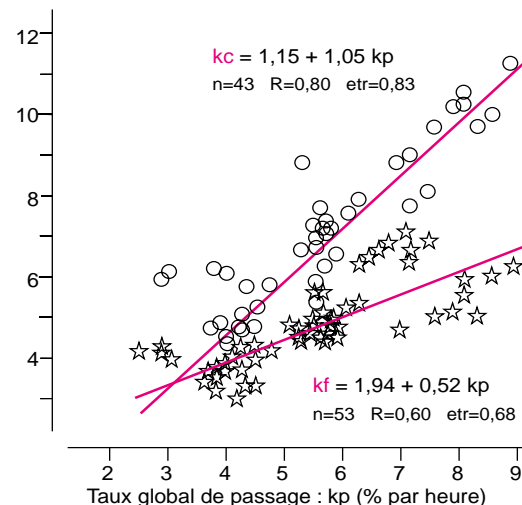
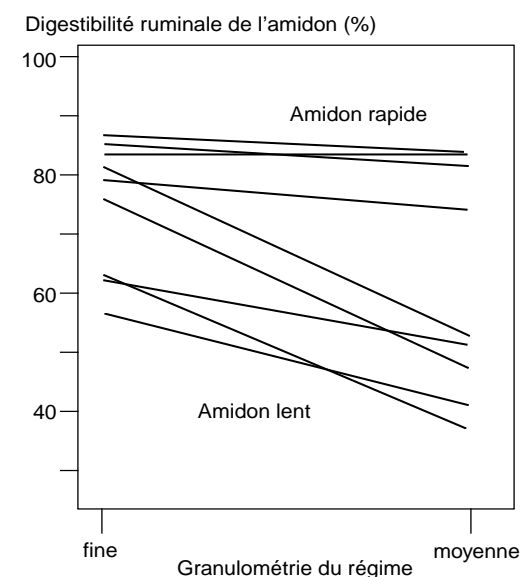


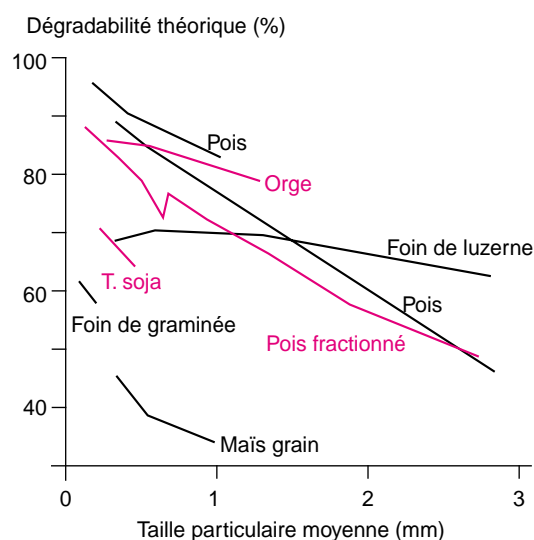
Figure 11. Influence de la granulométrie du régime sur la digestibilité ruminale de l'amidon.



En revanche, il a été montré que les ingrédients riches en amidon présentent une meilleure dégradabilité *in sacco* de l'amidon lorsqu'ils sont broyés (Cerneau et Michalet-Doreau 1991). D'après les résultats présentés dans cet article, la dégradabilité de l'amidon s'accroît en moyenne d'environ 12 points par mm de d50 en moins. Cette tendance se retrouve *in vivo* où le degré de hachage, ou de broyage, de la matière première riche en amidon (ou de l'ensemble du régime) peut présenter une influence très marquée sur la digestibilité ruminale de l'amidon (figure 11). En effet, une mouture plus fine améliore cette digestibilité de 2-3 points pour un amidon rapide (4 essais) mais de 20-25 points pour un amidon lent (5 essais). Ces effets se répercutent directement sur la matière organique fermentescible des rations. Ils influencent également (de 2 à plus de 5 points) la digestibilité de l'amidon dans l'ensemble du tube digestif et, de ce fait,

Le transit digestif est d'autant plus rapide que les particules sont petites. Cette accélération s'accompagne de taux de passage différents pour les particules de concentrés et de fourrages.

Figure 12. Influence de la granulométrie sur la dégradabilité in sacco de l'azote des aliments.



la valeur énergétique du régime, comme cela a été indiqué par Sauvant (1997). Les résultats observés à propos de la finesse du hachage de l'ensilage de maïs sont cohérents avec les effets évoqués ci-dessus. Dans le cas de l'azote, il a également été démontré que le broyage d'une matière première concentrée augmentait sa dégradabilité dans le rumen (d'environ 12 points par mm de d50 en moins - figure 12) et améliorait de 2 à 5 points sa digestibilité dans l'ensemble du tube digestif.

Pour une ration mixte, l'influence de d50 sur la digestibilité de la MO du régime est la résultante de l'importance respective des phénomènes décrits ci-dessus et, de ce fait, du régime alimentaire considéré.

3.2 / Aspects qualitatifs

a / Le pH et les produits fermentaires du rumen

Il apparaît presque systématiquement une baisse du pH ruminal lorsque la taille des particules du régime ou de l'un de ses constituants majeurs est réduit par broyage (figure 13). Cette baisse est plus marquée lorsque le pH du rumen du témoin est déjà assez faible (inférieur à 6,2). Dans ce cas, une baisse de d50 de 1 mm induit une baisse de pH d'environ 0,5 point. D'une façon cohérente, la réduction de la taille des particules, ou l'accroissement de la densité particulaire, modifie la concentration et le profil des acides gras volatils (AGV) dans le jus de rumen. En particulier, elle accroît la teneur en AGV du jus de rumen et la proportion molaire d'acide propionique aux dépens de celle de l'acide acétique (figure 14). D'après ces résultats obtenus sur bovins, le rapport acétate/propionate chute en dessous de sa valeur « normale » de 3,5 (Sauvant et Van Milgen 1995) lorsque d50 est inférieur à 4 mm. Le taux de cette chute est d'environ 0,5 point par mm de d50 lorsque d50 est de l'ordre de 2-3 mm. Les effets sont moins marqués pour les autres AGV.

Figure 13. Influence de la granulométrie du régime sur le pH du rumen.

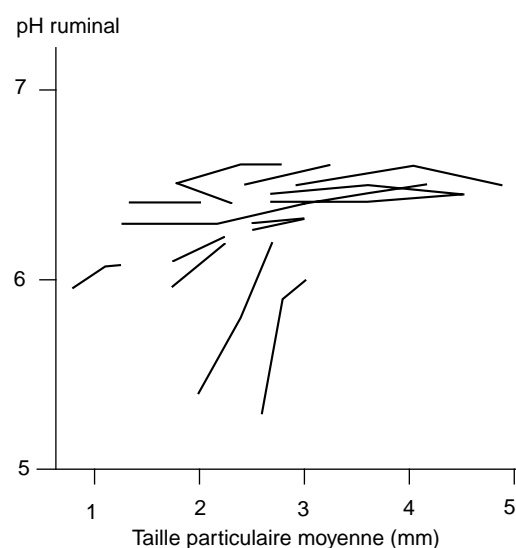
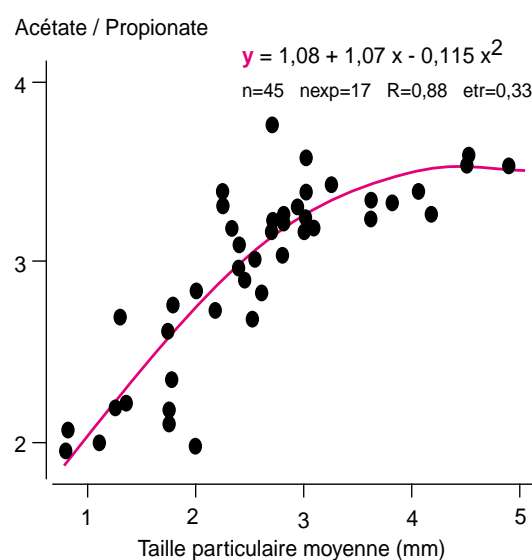


Figure 14. Influence de la granulométrie du régime sur le rapport acétate/propionate dans le rumen.



**La digestibilité
ruminale
de l'amidon
augmente
lorsque la taille
des particules
diminue.**

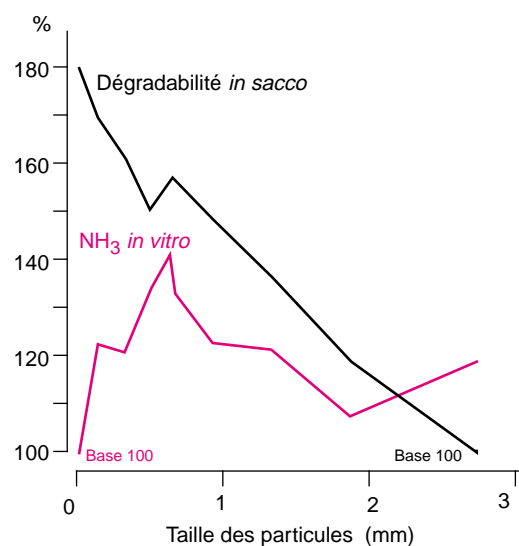
La réduction de d50 accroît la vitesse de dégradation des fractions azotées et, de ce fait, tendrait a priori à augmenter la teneur en NH_3 du jus de rumen. Cependant, compte tenu de l'accroissement simultané de la croissance microbienne et de son prélèvement de NH_3 (cf. ci-dessous), il est possible que la teneur en NH_3 n'augmente pas mais au contraire diminue, comme cela a été montré *in vitro* par Maaroufi *et al* (2000) avec du pois.

b / L'activité et la croissance microbiennes

Les données relatives à l'influence de la granulométrie sur l'activité microbienne demeurent assez rares dans la littérature. On peut donc simplement supposer qu'une réduction de d50 devrait être associée à une meilleure fermentescibilité des rations, donc à une prolifération microbienne plus forte. La figure 15

indique que les fractions particulières les plus petites du pois sont plus fermentées *in vitro* et entraînent une production de gaz accrue et vraisemblablement une activité et une croissance microbiennes plus fortes. Ce phénomène n'a pas la même importance pour toutes les matières premières. Ainsi, il s'observe nettement moins pour le tourteau de colza que pour le pois.

Figure 15. Influence de la taille des particules de pois sur la dégradabilité in sacco de l'azote et sur la production in vitro de NH_3 .



4 / Influence sur les métabolismes

4.1 / Métabolisme énergétique

La granulométrie a un effet marqué sur les conditions ruminales : baisses du pH et de la proportion d'acétate lorsque la taille des particules diminue.

Les variations du pH ruminal et du profil des AGV, et la variation probable du flux d'AGV absorbés, ont une influence sur l'utilisation métabolique de l'énergie chez le ruminant. Globalement, on peut dire que la fermentation ruminale plus brutale et importante et le rapport acétate/propionate plus faible induits par des faibles tailles de particules ont un effet insulinothèque qui va favoriser les effets anaboliques des rations. Cet effet s'est parfois traduit par des valeurs significativement plus élevées de glycémie (Grant *et al* 1990) et d'insulinémie et par une baisse des teneurs plasmatiques en acides gras non estérifiés (Knowlton *et al* 1996).

4.2 / Métabolisme azoté

Si une plus faible taille des particules entraîne une ammoniogénèse plus intense et brutale, il s'ensuit une vague plus brutale d'entrée d'ammoniac dans l'organisme, décelable sur la dynamique de l'urée du plasma et de l'urine (Maaroufi *et al* 2000) et, a priori, une probabilité accrue de voir une partie de l'azote rejetée par la voie urinaire. Ce dernier aspect n'a cependant pas été observé dans le travail cité.

5 / Influence sur les performances

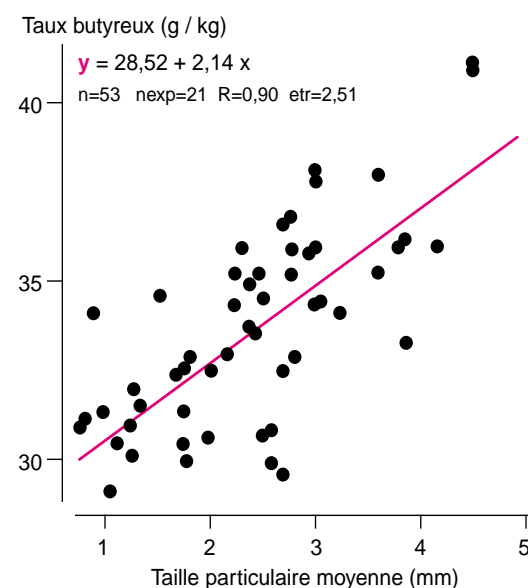
5.1 / La croissance et la qualité des carcasses

Par le biais des effets ingestifs, digestifs et métaboliques évoqués, une baisse de la granulométrie de la ration tend à accroître le gain moyen quotidien et l'état d'engraissement des animaux en croissance. Cet effet n'est cependant pas systématique, en outre il ne représente pas toujours un avantage (cf. la dégradation de la qualité du gras des carcasses d'agneaux).

5.2 / La lactation et la composition du lait

Sur 26 comparaisons (64 groupes), il n'apparaît pas d'influence spécifique de la granulométrie du régime sur la production laitière des vaches. Il en est de même pour le taux protéique du lait (24 comparaisons et 59 groupes). En revanche, il a été bien démontré que la réduction de la taille des particules d'un régime aboutissait à une baisse du taux butyreux du lait (figure 16). D'après ces données de la littérature, une baisse de d_{50} de 1 mm en dessous de 5 mm induit une chute moyenne du taux butyreux d'environ 2 g/kg. Les réponses du taux butyreux sont tout à fait cohérentes avec les résultats concernant le pH ruminal ou le rapport acétate/propionate. Ces résultats sont en outre cohérents avec les effets métaboliques cités ci-dessus. L'effet de la granulométrie des rations chez les chèvres et les brebis en lactation n'a pas encore été suffisamment étudié pour dégager des lois générales de réponse.

Figure 16. Influence de la granulométrie de la ration sur le taux butyreux du lait de vache.



Conclusions

Les variations de granulométrie des aliments et des régimes influencent les réponses de l'ingestion, de la digestion et des métabolismes du ruminant.

Pour les rations, il existe un seuil de d50 en dessous duquel l'animal s'éloigne assez rapidement de l'état physiologique et digestif normal. Des valeurs de ces seuils, et des dérivées, ont été indiquées, elles ne sont pas les mêmes pour les bovins (d50 = 4 à 5 mm) et les petits ruminants (d50 = 2 à 3 mm). Pour les fourrages, un hachage plus fin est un moyen d'amélioration de leur ingestibilité, mais leur digestibilité peut être atténuée. Pour les aliments concentrés, le degré de broyage est un moyen efficace de contrôle de la partition de la digestion des fractions azotées et amyla-

cées entre les différentes parties du tube digestif. Il serait utile de pouvoir disposer de plus de données pour dégager des lois générales entre les paramètres du traitement technologique et la partition digestive de ces constituants du régime.

L'intégration des aspects granulométriques dans la formulation des rations peut être améliorée grâce aux relations indiquées, particulièrement pour les productions utilisatrices de rations riches en concentrés. Les principales difficultés soulevées pour cette intégration sont de deux ordres. Il s'agit d'une part du manque de données expérimentales cohérentes pour certains paramètres clés ou productions cibles (animaux en croissance intensive, ovins et caprins laitiers...) et, d'autre part, du fait que les réponses révèlent l'existence de phénomènes de seuil dont la valeur dépend du paramètre considéré.

Références

- Cerneau P., Michalet-Doreau B., 1991. In situ starch degradation of different feeds in the rumen, *Reprod. Nutr. Dev.*, 31, 65-72.
- De Boever J.L., De Brabander D.L., De Smet A.M., Vanacker J.M., Boucque C.V., 1993. Evaluation of physical structure. 2 Maize silage. *J. Dairy Sci.*, 76, 1624-1634.
- Demarquilly C., Andrieu J., Sauvant D., Dulphy J.P., 1978. Composition et valeur nutritive des aliments. In : *Alimentation des Ruminants*, 469-518. INRA, Paris.
- Faichney G., 1995. Transit des digesta dans le tube digestif des ruminants. In : R. Jarrige *et al* (eds), *Nutrition des ruminants domestiques - Ingestion et digestion*, 431-464. INRA, Paris.
- Grant R.J., Colenbrander V.F., Mertens D.R., 1990. Milk fat depression in dairy cows, role of particle size of alfalfa hay. *J. Dairy Sci.*, 73, 1823-1833.
- Grenet E., 1989. A comparison of the digestion and reduction in particle size of lucerne hay and italian ryegrass hay in the ovine digestive tract. *Br. J. Nutr.*, 62, 493-498.
- Jacques K., Harmon D.L., Croon, W.J., Hagler W.R., 1989. Estimating salivary flow and ruminal water balance of intake, diet, feeding pattern and slaframine. *J. Dairy Sci.*, 72, 443-452.
- Jarrige R., Demarquilly C., Journet M., Béranger C., 1973. The nutritive value of processed dehydrated forages with special reference to the influence of physical form and particle size. *Proc. 1st Intl Green crop drying Congress*, 99-118. Oxford, UK.
- Jaster E.H., Murphy M.R., 1983. Effects of varying particle size of forage and digestion and chewing behavior of dairy heifers, *J. Dairy Sci.*, 66, 802-809.
- Kennedy P.M., 1985. Effect of rumination on reduction of particle size of rumen digesta by cattle. *Aust. J. Agric. Res.*, 36, 819-828.
- Knowlton K.F., Allen M.S., Erickson P.S., 1996. Lasalocid and particle size of corn grain for dairy cows in early lactation. 1. Effect on performance, serum metabolites and nutrient digestibility. *J. Dairy Sci.*, 79, 557, 564.
- Maaroufi C., Chapoutot P., Giger-Reverdin S., Sauvant D., Leguen M.P., 2000. Fractionation of pea flour with pilot scale sieving. II. Effect of particle size on the in vitro fermentation of pea seed fraction. *Anim. Feed Sci. Technol.* (sous presse).
- McLeod M.W., Minson D.J., 1988. Large particle breakdown by cattle eating ryegrass and alfalfa. *J. Anim. Sci.*, 66, 992-999.
- Melcion J.P., 2000. La granulométrie de l'aliment : principe, mesure et obtention. *INRA Prod. Anim.*, 13, 81-97.
- Poppi D.P., Norton B.W., Minson D.J., Hendricksen R.E., 1980. The validity of the critical size theory for particles leaving the rumen. *J. Agric. Sci. Camb.*, 94, 275-282.
- 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., Mertens D., 1997. Modélisation des réponses de la digestion des bovins aux variations de la fibrosité des rations. *Renc. Rech. Ruminants*, 4, 99-102.
- Sauvant D., Van Milgen J., 1995. Dynamic aspects of carbohydrates and protein breakdown and the associated microbial matter synthesis. In : Engelhardt *et al* (eds). *Proc. 8th Symp. on Ruminant Physiology* 71-91 - Verlay - Stuttgart
- Sauvant D., Baumont R., Faverdin P., 1996. Development of a mechanistic model of intake and chewing activities of sheep. *J. Anim. Sci.*, 74, 2785-2802.
- Thomas S., Campling R.C., 1977. Comparison of some factors affecting digestibility in sheep and cows. *J. Br. Grass. Soc.*, 32, 33-41.
- Wilson J.R., Kennedy P.A., 1996. Plant and animal constraints to voluntary feed intake associated with fibre characteristics and particle breakdown and passage in ruminants. *Aust. J. Agric. Res.*, 47, 199-225.

Abstract

Nutritional influences of granulometry of ruminant diet

This review is aimed at extracting the major quantitative influences of variations of granulometry of the ruminant diet. Granulometry is assessed by successive screens and summarised by mean particle size (MPS). Other parameters can be used, such as the proportion of particles retained by a screen with a 2 or 4 mm aperture. These various parameters are not linked linearly. A 1 mm decrease of the MPS of the diet under a threshold of 3-4 and 1 mm induces a drop of chewing time of about 100 and 500 min/d in cattle and sheep respectively. Duration of rumination is more influenced by MPS than the eating one. A lower MPS allows to increase the forage ingestibility in sheep, however for

cattle the results are less pronounced. The rumen pH (if initial pH < 6.2) and acetate/propionate ratio are decreased, by 0.5 point, when MPS is decreased by 1 mm under a threshold of 3-4 mm in cattle. The in sacco degradability of starch and protein is significantly influenced by MPS. The mean rate is about 12 points of that of effective degradability (outflow rate = 6 %/h) per mm of MPS. Data related to protein and energy metabolisms are still too rare and dispersed to permit the calculation of any metabolic influence of MPS. Milk fat content is however significantly decreased by about 2 g/kg per mm of MPS under a threshold of 4-5 mm.

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