

# Conséquences digestives et zotechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants

La vitesse de digestion de l'amidon varie largement selon la nature de l'aliment et l'éventuel traitement technologique qu'il a subi. Ces variations influencent la digestion ruminale des constituants de la ration, la protéosynthèse microbienne et la digestibilité des différents constituants dans les différentes parties du tube digestif. L'article analyse les conséquences de ces variations, tant digestives que sur les performances zotechniques, à partir des données de 52 essais comparatifs.

Au cours des dix années passées, différents débats sont apparus à propos des possibilités d'optimisation quantitative et qualitative de l'apport d'énergie chez les animaux ruminants. Ces débats ont particulièrement concerné la

fraction glucidique des aliments concentrés. Dans les années 80, une première vague de préoccupations avait été relative aux choix entre les sources de glucides de structure de bonne digestibilité (paroi végétale peu lignifiée) et les glucides des contenus cellulaires (amidons en particulier). A mesure que la connaissance progressait sur cette alternative, il est apparu nécessaire de préciser ce que l'on entendait par « amidon ». En effet, les données de la recherche ont clairement montré que, suivant la matière première considérée, ou selon son traitement technologique, la vitesse de digestion de l'amidon dans le rumen était susceptible de varier largement et d'influencer les réponses zotechniques des animaux.

## Résumé

Une base de données publiées dans la littérature comprenant 52 comparaisons entre des régimes à amidon rapidement ou lentement dégradables dans le rumen a été constituée. Cette base a été traitée avec les méthodes statistiques appropriées pour permettre de dégager des modèles de réponses de la digestion dans le rumen et des performances animales aux variations de la vitesse de digestion ruminale de l'amidon.

Une baisse de la vitesse de digestion de l'amidon réduit la teneur du régime en matière organique fermentescible et la croissance microbienne induite. Cependant, l'efficacité de la croissance microbienne ne semble pas être affectée. Avec des sources d'amidon lentement digestible, le pH du rumen et la proportion d'acétate sont plus élevées tandis que la proportion et la concentration du propionate sont plus basses. Avec ces régimes, il y a en outre une chute systématique de la digestibilité de l'amidon et de la matière organique dans l'ensemble du tube digestif. La densité énergétique du régime suit donc la même tendance.

Neuf des publications utilisées comprenaient une combinaison factorielle des vitesses de dégradation ruminale de l'amidon et de l'azote. Il n'est pas apparu d'interaction entre ces deux paramètres sur l'ensemble des résultats considérés.

Une décroissance de la vitesse de digestion de l'amidon est accompagnée d'un accroissement systématique du niveau de matière sèche ingérée. Une analyse spécifique des essais conduits sur vaches laitières confirme la tendance et montre que la production de lait brut n'est pas modifiée par la vitesse de digestion de l'amidon. Cependant les teneurs du lait en matière grasse et en protéines sont respectivement et significativement accrues et diminuées quand les sources d'amidon lentement digestibles sont comparées à des rapides.

Certaines conséquences liées à ces variations de vitesse de digestion de l'amidon ont déjà été évoquées dans différentes revues. En particulier celles de Nocek et Tamminga (1991), Poncet *et al* (1995), Huntington (1997), Owens *et al* (1997). Par ailleurs nous avons déjà eu l'occasion de publier dans cette revue des articles faisant en partie référence à ce sujet (Sauvant *et al* 1994, Sauvant et Van Milgen 1995). Cependant, étant donné que de nombreuses publications sont apparues récemment sur le thème des effets de la vitesse de digestion de l'amidon, il nous a semblé utile de rassembler les données correspondantes au sein d'une base spécifique et de les traiter par les méthodes statistiques

appropriées. Compte tenu de l'intérêt pratique de certains effets mis à jour dans ce travail, il est apparu opportun d'en faire une synthèse actualisée pour les lecteurs de la revue *Productions Animales*.

## 1 / Méthode générale d'approche

Il est connu que les résultats obtenus à l'occasion d'une seule expérimentation peuvent prêter à un certain questionnement même si des écarts significatifs ont été mis en évidence. Réciproquement, il est possible qu'une tendance non significative, observée plusieurs fois dans des expérimentations conduites indépendamment les unes des autres, puisse devenir significative et exprimer ainsi une loi générale grâce à une interprétation globale des données portant sur un plus grand nombre d'expérimentations à objectif analogue donc sur un plus grand nombre de résultats. L'élaboration de la connaissance s'effectue donc à deux niveaux au moins, d'une part au sein des expériences publiées prises individuellement et, d'autre part, à un niveau plus agrégé en s'appuyant sur des vastes ensembles de données rassemblées en des bases et interprétées de façon adéquate, de manière à extraire des lois générales quantitatives (Archimède *et al* 1996).

Ce sont pour ces raisons que les publications étudiant les conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon ont été rassemblées en une base de données. Cet ensemble correspond à 52 comparaisons expérimentales publiées entre des aliments concentrés complémentaires à amidon rapidement dégradable (AR) et à amidon lentement dégradable (AL). Toutes les références utilisées sont citées dans la partie bibliographique. L'interprétation statistique d'une telle base de données doit être conduite de façon particulièrement méticuleuse car le « dispositif

expérimental global » ainsi fourni par la littérature ne correspond a priori pas aux schémas expérimentaux classiques. Une première approche statistique a consisté à traiter ces données à travers un dispositif expérimental constitué au plus par 52 blocs ou expériences, croisés avec un facteur expérimental à un degré de liberté : le type d'amidon (AR vs AL). Cependant, compte tenu de l'ampleur et de l'intérêt des variations intra type d'amidon observée sur certains paramètres, il a été décidé de chercher à dégager des lois de réponse empiriques en fonction des valeurs de tels « paramètres clefs ». Il s'agit en particulier de la digestibilité (ou dégradabilité) ruminale de l'amidon, connue pour varier largement d'un ingrédient à l'autre (Sauvant *et al* 1994). En conséquence, des interprétations ont également été conduites par régression ou par analyse de covariance en considérant cette variable comme covariable.

Dans les essais, le maïs, ou le sorgho, a été la source d'amidon lent tandis que l'orge, ou le blé, ou le maïs traité ou le sorgho traité ont été celle de l'amidon rapide. Les nombres de données disponibles pour les principales caractéristiques étudiées et leurs paramètres statistiques sont présentés dans le tableau 1. Des relations logiques sont apparues entre les différentes caractéristiques analytiques des rations. Ainsi une corrélation significative ( $R = -0,73$ ) lie les teneurs en paroi végétale (NDF) et en amidon (AM, % MS). D'autre part, une relation hautement significative associe les teneurs en glucides non structuraux ( $NSC = MS - \text{cendres} - \text{extrait éthéré} - (N \times 6,25) - NDF$ ) et en amidon. L'équation obtenue indique que, dans ces régimes, l'amidon a représenté de l'ordre des deux tiers des variations de la teneur en NSC (% MS) :

$$NSC = 0,66 AM + 17,7$$

$$(n = 87 ; R = 0,81 ; \text{etr} = 4,6 \% MS)$$

## 2 / Influence de la nature de l'amidon sur les différents flux digestifs

Les variations de la vitesse de digestion de l'amidon influencent la digestion ruminale des constituants du régime, la protéosynthèse, le profil fermentaire et la digestibilité de l'amidon et d'autres composants dans les différentes parties du tube digestif.

### 2.1 / Digestibilité ruminale des constituants des rations

La digestibilité ruminale est évaluée par la perte de substance entre l'ingéré et le duodénum. Pour l'amidon, une différence hautement significative apparaît entre AL et AR sur la base des 36 comparaisons disponibles (tableau 2). En fait, la digestibilité ruminale des amidons lents est beaucoup plus variable ( $63,2 \pm 12,7$ ) que celle des amidons rapides

Tableau 1. Caractéristiques des régimes.

|  | Sigle | Nombre <sup>(1)</sup> | Moyenne | Ecart-type | Min  | Max  |
|--|-------|-----------------------|---------|------------|------|------|
| Composition (% MS)                           |       |                       |         |            |      |      |
| Paroi végétale                               | NDF   | 88                    | 35,6    | 8,4        | 14,0 | 61,0 |
| Amidon                                       | AF    | 96                    | 32,0    | 10,2       | 12,5 | 62,3 |
| Protéines brutes                             | PB    | 98                    | 16,2    | 2,6        | 7,9  | 21,8 |
| Digestibilité dans l'ensemble du tractus (%) |       |                       |         |            |      |      |
| Matière organique                            | dMO   | 76                    | 69,0    | 6,7        | 50,8 | 88,8 |
| Paroi végétale                               | dNDF  | 68                    | 49,2    | 10,4       | 31,2 | 76,6 |
| Amidon                                       | dAM   | 70                    | 93,6    | 4,9        | 80,5 | 99,9 |
| Digestibilité ruminale (%)                   |       |                       |         |            |      |      |
| Matière organique                            | drMO  | 64                    | 59,2    | 9,5        | 37,4 | 80,9 |
| Paroi végétale                               | drNDF | 60                    | 46,9    | 16,0       | 6,9  | 90,8 |
| Amidon                                       | drAM  | 72                    | 73,7    | 14,8       | 31,1 | 97,0 |

<sup>(1)</sup> Nombre d'observations = deux fois le nombre de comparaisons.

**Tableau 2.** Influence de la vitesse de digestion ruminale de l'amidon sur la digestibilité des constituants du régime et sur la composition de la matière sèche.

|                                    | Nombre <sup>(1)</sup> | Amidon lent <sup>(2)</sup> | Amidon rapide <sup>(2)</sup> | Ecart type résiduel | Signification <sup>(3)</sup> |     |     |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|-----|-----|
|                                    |                       |                            |                              |                     | Am                           | Exp | Int |
| Digestibilité ruminale (%)         |                       |                            |                              |                     |                              |     |     |
| - amidon                           | 72                    | 62,5                       | 83,9                         | 5,5                 | Hs                           | HS  | HS  |
| - matière organique                | 64                    | 56,3                       | 64,2                         | 3,8                 | HS                           | HS  | ns  |
| - paroi végétale                   | 60                    | 46,6                       | 44,2                         | 3,9                 | S                            | HS  | ns  |
| Digestibilité totale (%)           |                       |                            |                              |                     |                              |     |     |
| - amidon                           | 70                    | 90,7                       | 96,6                         | 2,3                 | HS                           | HS  | HS  |
| - matière organique                | 76                    | 68,4                       | 70,7                         | 2,5                 | HS                           | HS  | ns  |
| - paroi végétale                   | 68                    | 49,3                       | 47,2                         | 3,7                 | S                            | HS  | ns  |
| Teneur dans la matière sèche (%)   |                       |                            |                              |                     |                              |     |     |
| - amidon digestible ruminal        | 68                    | 22,0                       | 28,0                         | 5,3                 | HS                           | HS  | HS  |
| - amidon non digestible ruminal    | 68                    | 13,2                       | 5,5                          | 2,3                 | HS                           | HS  | HS  |
| - matière organique fermentescible | 64                    | 51,8                       | 59,0                         | 3,5                 | HS                           | HS  | ns  |
| - NDF non digestible               | 54                    | 13,8                       | 14,6                         | 2,0                 | S                            | HS  | ns  |

<sup>(1)</sup> Nombre d'observations = deux fois le nombre de comparaisons.

<sup>(2)</sup> Valeurs ajustées.

<sup>(3)</sup> Signification des effets amidon (Am), expérience (Exp) et de l'interaction entre les deux (Int). Effets hautement significatifs (HS) ou significatifs (S) ou en limite de signification (L), ou non significatifs (ns).

(84,1 ± 7,6). Il serait important de mieux cerner les causes de variation de ce paramètre clef. Outre la nature de l'amidon, d'autres facteurs tels que le niveau d'ingestion (Robinson *et al* 1985), la teneur en amidon ou en concentré du régime (Archimède *et al* 1997), le taux azoté du régime (Archimède *et al* 1996) sont connus pour avoir une influence sur la digestibilité ruminale de l'amidon. L'interaction significative observée sur ce critère indique que les écarts de digestibilité entre les deux types d'amidon varient largement d'une expérience à l'autre. Les différences de digestibilité de l'amidon influencent directement la digestibilité ruminale vraie de la matière organique (drMO) des régimes (tableau 2). En outre ces deux caractéristiques sont étroitement associées en intra-comparaison :  $drMO = 0,395 drAM + 30,4$  (n = 62 ; R = 0,98 ; etr = 2,6 %)

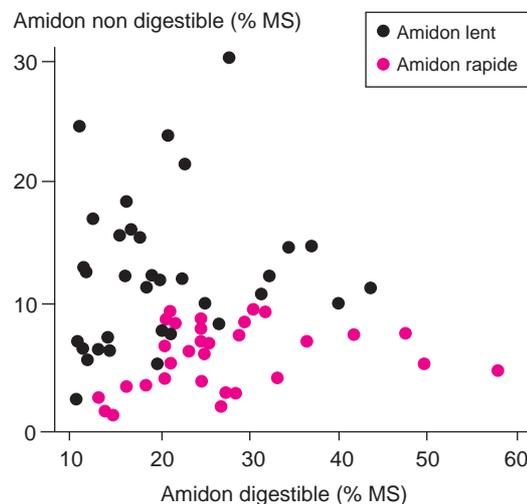
La digestibilité ruminale vraie de la MO s'accroît de 0,4 point par point d'augmentation de celle de l'amidon. Ces données permettent de calculer le contenu de la matière sèche ingérée en amidon digestible dans le rumen (AMdr, % MS) et en amidon non digestible ou « by pass » (AMndr, % MS). Ces deux paramètres sont fortement déterminés par la valeur de la digestibilité ruminale de l'amidon (tableau 2). La figure 1 permet de se rendre compte de l'étendue des plages de variation de cette partition de l'amidon dans les régimes considérés. Des approches analogues et des conclusions allant dans le même sens peuvent être tirées de l'étude des fractions de MO digestible dans le rumen, ou MO fermentescible (MOF, Vérité *et al* 1987). Ces deux fractions sont largement influencées par la vitesse de digestion de l'amidon comme indiquent les résultats du tableau 2. Le principe de la correction proposée pour la MOF dans la version hollandaise du système PDI (Tamminga *et al* 1994) semble donc être justifiée.

Dans le cadre de l'application du système PDI, plutôt que d'attribuer des facteurs multiplicatifs moyens de la dépression de la teneur en MOF (% MS) selon le type d'ingrédient riche en amidon (Vérité *et al* 1987), on pourrait soustraire la quantité d'amidon non digestible ou « by pass » accompagné du coefficient de régression de 0,95 de l'équation intracouple suivante (figure 2) :  $MOF = 62,9 - 0,95 AMndr$  (n = 62 ; R = 0,98 ; etr = 2,6)

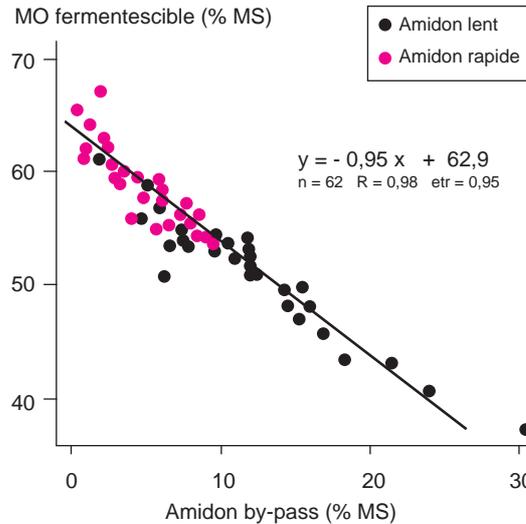
Ceci suppose bien entendu de pouvoir prédire le paramètre AMndr (voir plus loin). D'autre part, sur la base de 30 comparaisons comprenant des mesures des valeurs de digestibilité ruminale et totale du NDF, il apparaît que celle-ci est significativement plus élevée pour les rations AL que pour les rations AR (tableau 2). De façon cohérente avec ceci, la teneur des régimes en NDF non digéré dans

**La digestibilité ruminale des amidons lents est plus faible et beaucoup plus variable que celle des amidons rapides. Cet écart influence directement la digestibilité de l'amidon et de la MO de la ration.**

**Figure 1.** Teneurs des régimes en amidon digestible et non digestible dans le rumen.



**Figure 2.** Influence de la teneur en amidon « by pass » sur la teneur en matière organique fermentescible.



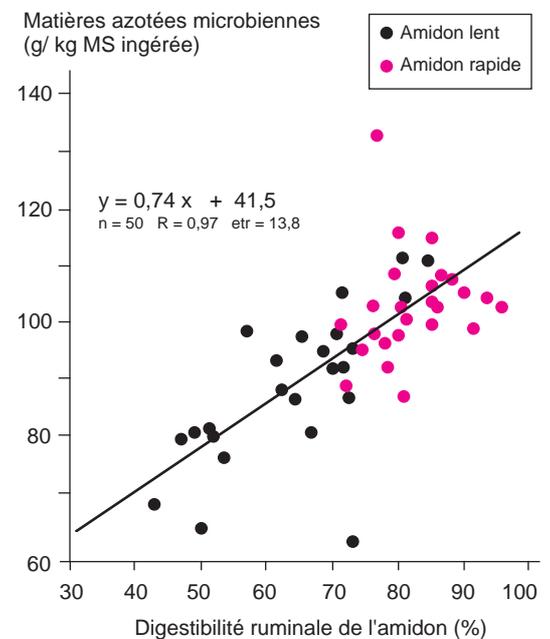
le rumen est influencée par la vitesse de dégradation en amidon des régimes (tableau 2). Ces résultats ne constituent cependant pas une démonstration que la vitesse de digestion ruminale de l'amidon modifie celle des constituants pariétaux. En effet, plusieurs études, en particulier celles de P. Chapoutot *et al* (non publiées), ont montré que les constituants pariétaux du grain de maïs et de ses sous-produits sont potentiellement plus digestibles dans le rumen que ceux des céréales à amidon rapide tels que l'avoine, le blé et l'orge. Pour avoir une idée des interactions digestives effectives induites par les variations de la vitesse de digestion ruminale de l'amidon, il est nécessaire de conduire des études spécifiques avec le même type de paroi végétale, à l'aide par exemple de la méthode des sachets de Nylon (Carey *et al* 1993, Archimède *et al* 1996). Cependant, ces différents auteurs n'aboutissent pas à des résultats suffisamment cohérents pour permettre de conclure.

## 2.2 / Protéosynthèse microbienne

La base de données contient 26 comparaisons fournissant des valeurs de mesures des flux microbiens au duodénum. Compte tenu du fait que les animaux expérimentaux étaient d'espèces, de gabarits et de niveaux de production variables, la protéosynthèse microbienne a été exprimée par rapport à la matière sèche ingérée de la ration ou par rapport à la matière organique digestible dans le rumen ou dans l'ensemble du tube digestif (MAm en g/kgMSI ou en g/kg MODI).

Le flux de matières azotées microbiennes est significativement et positivement influencé par la vitesse de digestion de l'amidon (tableau 3) et, en conséquence, par les teneurs du régime en amidon digestible dans le rumen ou en matière organique fermentescible. La figure 3 illustre la relation intra-

**Figure 3.** Variations de la protéosynthèse microbienne selon la digestibilité ruminale de l'amidon.



**Tableau 3.** Influence de la vitesse de digestion ruminale de l'amidon sur les paramètres fermentaires ruminiaux.

|                           | Nombre <sup>(1)</sup> | Amidon lent | Amidon rapide | Ecart type résiduel | Signification <sup>(2)</sup> |     |     |
|---------------------------|-----------------------|-------------|---------------|---------------------|------------------------------|-----|-----|
|                           |                       |             |               |                     | Am                           | Exp | Int |
| Protéosynthèse (g/kg MS)  | 52                    | 90,2        | 104,4         | 10,3                | HS                           | HS  | L   |
| Protéosynthèse (g/kg MOD) | 48                    | 139,8       | 154,1         | 16,0                | HS                           | HS  | ns  |
| pH                        | 60                    | 6,25        | 6,20          | 0,11                | S                            | HS  | ns  |
| AGV (mmol/l)              | 62                    | 101,8       | 105,2         | 6,3                 | S                            | HS  | ns  |
| Acétate (%)               | 78                    | 63,1        | 61,3          | 2,7                 | HS                           | HS  | ns  |
| Propionate (%)            | 78                    | 21,3        | 23,5          | 2,7                 | HS                           | HS  | ns  |
| Butyrate (%)              | 74                    | 11,2        | 10,8          | 0,9                 | L                            | HS  | ns  |
| Mineurs (%)               | 64                    | 4,4         | 4,3           | 0,4                 | nS                           | HS  | ns  |
| Acétate/propionate        | 78                    | 3,11        | 2,85          | 0,3                 | HS                           | HS  | ns  |
| Propionate (mmol/l)       | 62                    | 21,5        | 24,4          | 3,3                 | HS                           | HS  | ns  |

<sup>(1)</sup> Nombre d'observations = deux fois le nombre de comparaisons.

<sup>(2)</sup> Signification des effets amidon (Am), expérience (Exp) et de l'interaction entre les deux (Int). Effets hautement significatifs (HS) ou significatifs (S) ou en limite de signification (L), ou non significatifs (ns).

couple entre la protéosynthèse et la digestibilité ruminale de l'amidon. Il est intéressant de remarquer que l'accroissement de la protéosynthèse, associé aux variations de l'amidon fermentescible ou de la MOF ont été de l'ordre de 20 à 25 g pour 100 g, ce qui est cohérent avec les valeurs correspondantes proposées dans les systèmes d'unités d'alimentation protéique des ruminants. Exprimés par rapport à la teneur en matière organique digestible dans l'ensemble du tube digestif des régimes (MOD), les amidons rapides permettent également d'obtenir une synthèse microbienne significativement plus élevée (tableau 3). Par contre, les critères classiques d'évaluation de l'efficacité de la synthèse microbienne, rapportée à la MO réellement ou apparemment digérée dans le réticulo-rumen, ne sont pas significativement influencés par la nature de l'amidon. Celle-ci n'influence donc pas la répartition des flux de carbone entre les cellules microbiennes et les produits terminaux des fermentations.

En supposant que la proportion d'acides aminés dans les matières azotées microbiennes est de 0,8 et que leur digestibilité réelle dans l'intestin est aussi de 0,8 (Vérité *et al* 1987), il apparaît que les rations AL fournissent, par kg de MSI, de l'ordre de 9,2 g de PDIM en moins que les rations AR. Cette différence n'est pas négligeable puisqu'elle représente de l'ordre de 15 % de la teneur moyenne en PDIM des régimes.

Ces résultats moyens peuvent être nuancés. En effet, il apparaît une relation globale significative et négative entre la protéosynthèse exprimée par rapport à la MS ou la MO, et la teneur des régimes en amidon digestible dans le rumen (figure 4). Il semble donc qu'il y aurait peut-être une inhibition de la protéosynthèse lorsque le régime est riche en amidon digestible dans le rumen au-delà d'une

teneur d'environ 25 à 30 % MS du régime. En cohérence avec cette observation, un examen de la figure 4 indique en outre que l'effet positif des amidons de type rapide sur la protéosynthèse (relation générale intra en figure 3) est très marqué lorsque l'on se place sous le seuil évoqué de 25-30 % ; au-delà de ce seuil, un apport d'amidon rapide n'a pas d'effet positif, il peut même avoir alors un effet négatif. D'autre part, il n'apparaît pas de relation globale entre la protéosynthèse et la teneur du régime en amidon « by pass ». En revanche il y a, à l'intérieur de chaque comparaison, une décroissance logique et significative de la protéosynthèse avec l'accroissement de la teneur du régime en amidon by pass. Ce phénomène est cohérent avec ce qui a été observé pour la MOF (cf. figure 2).

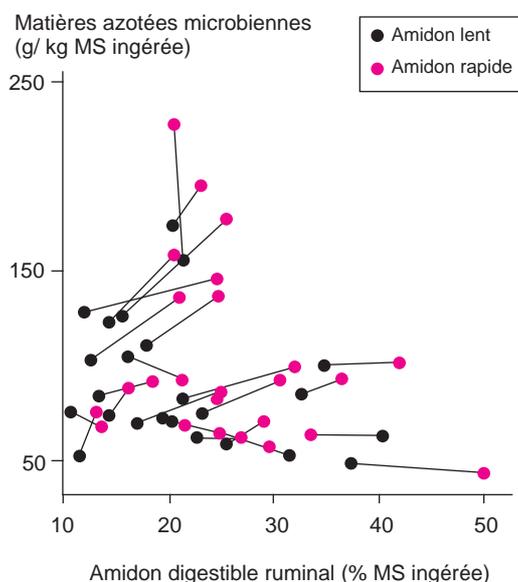
### 2.3 / Fermentations ruminales

A partir de 30 comparaisons comprenant des mesures du pH ruminal, il est apparu une influence négative de la vitesse de digestion de l'amidon sur le pH (tableau 3). Plus précisément, il y a une interaction entre l'effet de la vitesse de dégradation de l'amidon et la valeur moyenne du pH observée dans l'essai considéré. La figure 5 permet de visualiser cette interaction. Pour des pH normaux, environ 6,5, il n'y a pas d'influence de la vitesse de digestion de l'amidon, alors que pour un rumen en état d'acidose latente (pH < 6,0), cette vitesse présente un impact sensible.

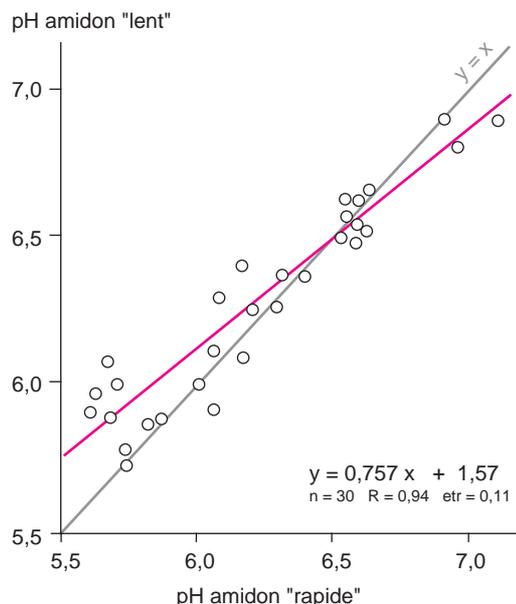
D'une façon cohérente avec ce qui a été observé pour le pH, il apparaît un accroissement significatif de la teneur en acides gras volatils (AGV) du jus de rumen lorsque la digestibilité ruminale de l'amidon augmente (tableau 3). Cet accroissement de la teneur en AGV s'accompagne logiquement de baisses significatives des proportions molaires d'acétate et de butyrate au profit de celle du pro-

**La protéosynthèse microbienne est plus importante avec les amidons rapides, mais elle dépend aussi de la teneur du régime en amidon digestible ruminal.**

**Figure 4.** Variations de la protéosynthèse microbienne selon la teneur en amidon digestible ruminal.



**Figure 5.** Interaction entre pH ruminal et vitesse de digestion de l'amidon.



pionate (tableau 3). Les comparaisons comprenant des AGV mineurs, c'est-à-dire à 5 et 6 atomes de carbone sont moins nombreuses (32) ce qui, associé à la moindre précision de la mesure, est à l'origine de l'absence d'influence significative de la vitesse de digestion de l'amidon sur ces acides. Les rapports habituellement calculés entre les proportions des AGV sont également significativement influencés par la vitesse de digestion de l'amidon (tableau 3). Le rapport acétate/propionate a ainsi été de 3,1 pour les régimes AL contre 2,8 pour les régimes AR.

Les concentrations des acides acétique et butyrique dans le jus de rumen ne sont pas influencées par la vitesse de digestion de l'amidon alors que celle du propionate est significativement accrue pour le régime AR par rapport au régime AL (tableau 3). Sur ce dernier aspect, il apparaît en outre une loi générale intra-couple intéressante entre la concentration du propionate dans le rumen et la teneur en amidon digestible dans le rumen de la ration ingérée (figure 6). Ces derniers résultats suggèrent que l'accroissement de la proportion d'amidon dégradée dans le rumen aboutit principalement à une augmentation de la production de propionate dans ce même organe.

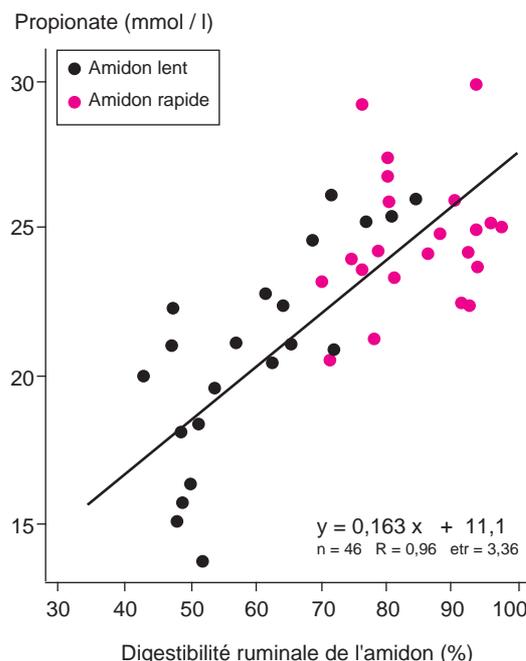
Pour tous ces paramètres relatifs aux AGV (proportion, concentration, rapport) il apparaît une influence systématique de la vitesse de digestion de l'amidon dans le rumen. En outre, en cohérence avec ce qui est observé pour le pH, il y a des interactions entre la réponse à la digestion ruminale de l'amidon et le niveau moyen mesuré du paramètre considéré. Pour résumer ces interactions, on peut dire que l'effet de la vitesse de digestion de l'amidon est plus marqué lorsque la propor-

tion d'acétate est faible (inférieure à 60-62 %), celle de propionate élevée (supérieure à 22-25 %) et le rapport acétate/propionate faible (inférieur à 3 environ). Réciproquement, lorsque les fermentations ruminales sont dans une zone « normale » (valeurs précitées à respectivement 65-67 %, 18-20 %, 3,2-3,5) le rumen semble être très tamponné et insensible aux variations de vitesse de digestion de l'amidon.

Sur la base de 29 comparaisons disponibles, il n'a pas été possible de démontrer d'influence systématique de la vitesse de digestion ruminale de l'amidon sur l'ammoniogénèse alors qu'on aurait pu penser qu'un niveau de dégradation accru d'amidon permettrait de « piéger » plus d' $\text{NH}_3$  dans le processus de protéosynthèse microbienne. L'absence d'un tel effet pourrait être dû au fait que les ingrédients à amidon rapide (AR) se caractérisent également par des fractions protéiques plus labiles dans le rumen (Vérité *et al* 1987). En conséquence, à teneurs comparables en protéines brutes et, si on ne prend pas garde à intégrer les différences de vitesse de dégradation de l'azote dans la formulation des régimes, les rations AR contiennent potentiellement plus d'azote dégradé que les AL. Par contre, la teneur en  $\text{NH}_3$  du jus de rumen a été significativement liée aux teneurs en protéines brutes ( $> 0$ ) et amidon total ( $< 0$ ) du régime ingéré.

Deux expérimentations récentes effectuées avec du sorgho (Delgado-Elorduy *et al* 1996a) et du maïs (Delgado-Elorduy *et al* 1996b) ont montré qu'une augmentation de la digestion ruminale de l'amidon induisait un accroissement significatif du flux d'urée recyclé dans le réticulo-rumen. Sans qu'il soit possible d'élucider les mécanismes permettant d'aboutir à cette différence, ce recyclage azoté facilite vraisemblablement la protéosynthèse ruminale accrue observée avec les régimes de type AR par rapport à AL et contribue ainsi à expliquer pourquoi les régimes AR ont la même teneur en  $\text{NH}_3$  que les AL.

**Figure 6.** Teneur en propionate du jus de rumen en fonction de la digestibilité ruminale de l'amidon.



## 2.4 / Conséquences sur la partition des flux digestifs

A partir des données disponibles, il apparaît une relation étroite entre la digestion ruminale de l'amidon (drAM, %) et la partition de sa digestion entre le réticulo rumen et l'intestin (PART, %) :

$$\text{PART} = 0,87 \text{ drAM} + 14,7$$

(n = 66 ; R = 0,98 ; etr = 2,7)

Dans cette relation, on ne peut pas détecter d'influence particulière liée aux essais, celle-ci peut donc être considérée comme une loi générale. Il est également possible, à partir de ces 33 comparaisons, de calculer une relation « intra » entre la digestion de l'amidon dans l'ensemble du tube digestif (dAM, %) et dans le rumen :

$$\text{dAM} = 0,242 \text{ drAM} + 75,7$$

(n = 66 ; R = 0,89 ; etr = 3,1)

La relation globale ( $n = 66$ ,  $R = 0,74$ ) entre ces deux paramètres présente des coefficients de régression très comparables à cette relation intra. Cependant la figure 7 permet de constater qu'il existe une grande variabilité dans la capacité de l'intestin à digérer les amidons lentement digérés dans le rumen (AL) et que cette variabilité est en partie liée au niveau de la digestion ruminale de l'amidon. Il serait utile de pouvoir expliquer l'ampleur de ces variations pour mieux les prévoir. Par exemple, à partir de la présente base de données, nous avons pu mettre en évidence une influence, sur ce paramètre, du niveau d'ingestion de l'amidon ainsi que du taux protéique du régime. Récemment Huntington (1997) a publié une analyse de la littérature, accompagnée d'une étude par simulation, sur la digestion intestinale de l'amidon chez le ruminant. Il apparaît que la sécrétion amylasique intestinale, quoiqu'adaptable, serait insuffisante pour hydrolyser un flux amylacé important. Il semblerait également qu'un apport azoté plus libéral aiderait à mieux digérer l'amidon dans l'intestin. D'autre part, ainsi que l'ont souligné par exemple Tisserand et Demarquilly (1995), l'ensemble gros intestin + caecum digère, par l'intermédiaire des microbes qui y prolifèrent, l'amidon transitant à l'iléon. Cependant, malgré un temps de séjour des digesta à ce niveau plus important que dans l'intestin grêle, la digestibilité de l'amidon dans la partie distale y est inférieure ( $\times 0,6$  environ). Cette problématique est importante puisque l'amidon non digéré dans l'intestin est excrété par voie fécale et le coefficient de régression de l'équation ci-dessus suggère qu'environ un quart de l'amidon by pass se retrouve en moyenne être rejeté par voie fécale ! Ainsi, dans certains cas, plus de

10 et même jusqu'à 15 % de la matière sèche fécale est constituée d'amidon. La principale conséquence de ces pertes fécales d'amidon est que la digestibilité de la matière organique du régime est significativement diminuée lorsque la digestibilité ruminale de l'amidon décroît. L'équation intra essais obtenue entre ces deux paramètres est :

$$dMO = 0,11 drAM + 61,4$$

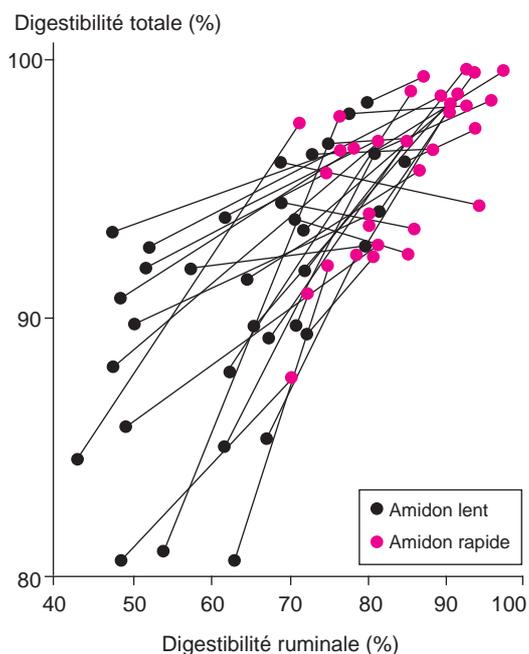
( $n = 66$  ;  $R = 0,98$  ;  $etr = 2,2$ )

Cette relation signifie qu'il y a donc une baisse systématique de la teneur en énergie du régime lorsque sa teneur en amidon lent s'accroît. Ainsi si on admet la relation générale, calculée à partir de 24 aliments courants de la table INRA (1978), entre la teneur en énergie (UFL par kg MS) et la digestibilité de la matière organique

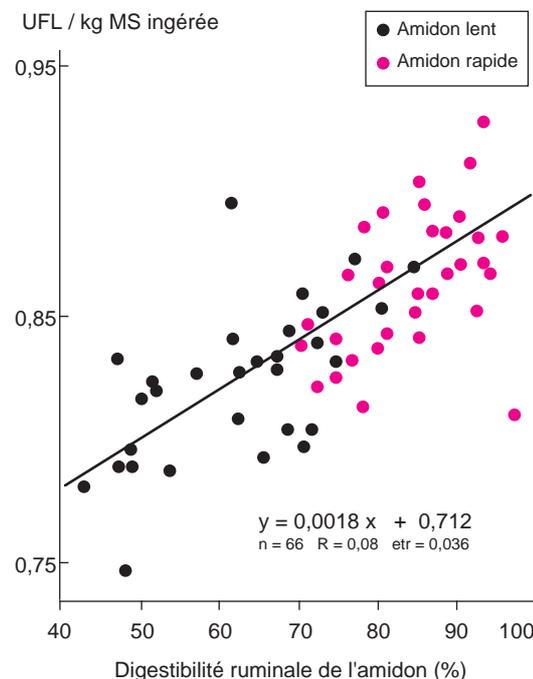
$$UFL = 0,016 dMO - 0,30$$

il apparaît que pour une décroissance de 10 points de la digestibilité ruminale de l'amidon, la valeur énergétique du régime diminue de 0,018 UFL/kg MS, ce qui représente à peu près 2,1 % de la valeur énergétique du régime (figure 8). D'une façon globale, l'emploi de l'équation ci-dessus aboutit à une différence 0,04 UFL entre les régimes AL ( $0,82 \pm 0,10$  UFL/kg MS) et AR ( $0,86 \pm 0,11$  UFL/kg MS), ce qui représente près de 5 % de la valeur énergétique moyenne du régime, et n'est donc pas négligeable. Une telle différence pourrait être plus importante pour les animaux à haut niveau de production, donc d'ingestion, donc à transit plus rapide, comme cela a déjà été montré par Robinson *et al* (1987). Ces écarts de valeur énergétique entre types d'amidon sont à rapprocher des résultats de la synthèse de Owen *et al* (1997) concernant des bovins en croissance. En effet, les valeurs énergétiques

**Figure 7.** Relation entre les digestibilité ruminale et totale de l'amidon.



**Figure 8.** Relation entre la valeur énergétique (UFL) du régime et la digestibilité ruminale de l'amidon.



**A même digestibilité ruminale, la digestibilité totale est très variable pour les amidons lents.**

calculées d'après des dizaines d'essais étaient plus faibles pour le sorgho et le maïs en comparaison des autres céréales.

## 2.5 / Prédiction de propriétés digestives de l'amidon

Il est opportun de chercher à exploiter les données disponibles pour aboutir à des éléments objectifs d'évaluation du risque d'acidose ainsi qu'à des moyens de prédiction de la partition de la digestion quantitative de l'amidon entre les différents organes digestifs.

### a / Acidose ruminale

L'acidose ruminale présente différents inconvénients. D'abord en raison des conséquences pathologiques mais également parce que l'état de sub-acidose est associé à des interactions digestives négatives. Compte tenu de ces problèmes, plusieurs auteurs ont déjà cherché à mesurer et à hiérarchiser les pouvoirs « acidogènes » des aliments de manière à formuler des régimes en intégrant une contrainte sur ce nouveau paramètre. Ces aspects ont été particulièrement étudiés aux Pays Bas (Malestein *et al* 1984) et aux USA (Cullen *et al* 1986). Les résultats obtenus par ces auteurs indiquent que, malgré les influences négatives des vitesses élevées de dégradation de l'amidon, les aliments les plus acidogènes sont les plus riches en pectine (pulpe de citrus, ou pulpe de betterave). Après plusieurs années d'arrêt de ces recherches, la problématique a été reprise par Cone *et al* (1989) et de Smet *et al* (1995). D'après ces auteurs, le pouvoir acidogène des aliments peut être prédit à partir de mesures *in vitro*, avec du jus de rumen et des enzymes, ou des mesures de dégradation *in situ*. Ainsi de Smet *et al* (1995) ont clairement mis en évidence la relation entre la chute du pH ruminal et la vitesse de disparition *in situ* de la matière sèche. D'après ces résultats, il existe une bonne correspondance, au sein des aliments riches en amidon, entre leur pouvoir acidogène et la vitesse de dégradation de leur amidon. Pour la pratique, il est clair que les tests *in vitro* sont les plus séduisants à mettre en œuvre, mais le pouvoir prédictif des résultats obtenus jusqu'à présent avec cette méthode n'est pas suffisant (Cone *et al* 1989). A ce propos, on peut se demander si les tests *in vitro*, même à base de jus de rumen, sont représentatifs de la réalité. En effet, il a été montré que par leur mise en réserve directe et rapide de l'amidon dans leurs cellules, les protozoaires présentaient un rôle « tampon » efficace vis-à-vis des chutes de pH. Or une caractéristique fréquente des jus de rumen utilisée pour les tests *in vitro* est l'absence de protozoaires.

### b / Préviation de la digestion quantitative de l'amidon dans les différents segments

Plusieurs études ont été consacrées à des mesures simultanées de la dégradation *in situ*

de l'amidon et sa digestibilité au duodénum. Sauvant *et al* (1994) ont réalisé une synthèse des résultats disponibles. Il en est ressorti une relation très significative entre les valeurs de dégradabilité théorique de l'amidon (DTam, %) calculée à partir des cinétiques *in situ* (transit supposé de 6 % par heure) et la digestibilité au duodénum :  
 $dAMr = 0,483 DTam + 45,62$   
 (n = 20 ; R = 0,84 ; etr = 5,4)

Cette relation montre que la digestibilité *in vivo* des amidons lents est sous-estimée à partir de la valeur mesurée *in situ*. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait d'une moindre capacité amylasique *in situ* que *in vivo* (Martin 1994), mais également parce que le taux de transit retenu (6 % par heure) est vraisemblablement élevé par rapport à la plupart des conditions d'essais. Ce résultat indique qu'on ne peut pas utiliser directement les valeurs de « dégradabilité ou indégradabilité théorique » *in situ* de l'amidon comme cela avait été proposé par Tamminga *et al* (1994) mais qu'il est nécessaire d'intégrer cette valeur dans l'équation de prédiction. Faute d'alternative, la dégradabilité *in situ* constitue à ce jour la méthode de base pour prédire la digestion de l'amidon des aliments.

La seconde grande question soulevée pour prédire la digestion quantitative de l'amidon est la prédiction de sa digestion intestinale. En effet, compte tenu de la différence de nature des nutriments absorbés (glucose vs AGV), il apparaît indispensable de chercher à quantifier séparément les flux d'amidon digérés respectivement dans l'intestin grêle et le gros intestin. Dans l'état actuel de la connaissance, nous suggérons d'utiliser l'équation proposée par Nocek et Tamminga (1991) qui permet de calculer la digestibilité de l'amidon protégé dans l'intestin grêle (dAMi, %) en fonction de la proportion de cet amidon « protégé » (AMIA, % amidon ingéré) dans le régime :  
 $dAMi = -0,728 AMIA + 87,9$

L'application de cette équation aux données de la base indique que la digestibilité intestinale de l'amidon serait significativement plus importante pour les régimes AR (76,3 ± 5,5 %) que pour les régimes AL (61,1 ± 9,2 %). En outre la quantité d'amidon digérée dans l'intestin grêle de ces régimes (AMDI, % MS) qui représente un potentiel de glucose absorbé a été de 5,2 ± 3,8 % pour AL contre 1,4 ± 0,9 % pour AR. L'étendue des valeurs AMDI calculées à partir des données de la base se situe entre 0,6 et 15,5 % de la matière sèche.

Les résultats précédents peuvent être utilisés pour prédire la quantité d'amidon passant à l'iléon. (AMIL, % MS). Ce flux calculé est égal à 7,1 ± 2,8 % pour le régime AL contre 3,8 ± 1,9 % pour le régime AR. Sur l'ensemble des données disponibles, l'étendue de AMIL a été de 0,4 à 15,3 % MS. Une partie de cet amidon entrant dans le gros intestin est digéré par les micro-organismes qui y prolifèrent. Cependant, la bibliographie ne permet pas de disposer d'une équation précise de prévision de la digestibilité de l'amidon dans cet organe.

Sur la base des données présentées par Sauviant *et al* (1994), on peut admettre que la digestibilité de l'amidon dans le gros intestin est approximativement égale à 60 % de la valeur de sa digestibilité dans l'intestin grêle. La teneur de la MSI en amidon digéré au niveau du gros intestin serait, d'après les calculs, de  $2,5 \pm 0,9$  % pour le régime AL contre  $1,7 \pm 0,8$  % pour le régime AR. Pour les régimes AL, cette quantité représente approximativement seulement 10 % de l'amidon digéré dans le réticulo-rumen.

Sur la base de ces différentes estimations, il est possible de simuler, pour les différents régimes de la base, les flux d'amidon perdus par la voie fécale. Les valeurs ainsi simulées sont globalement satisfaisantes lorsqu'on les confronte aux valeurs effectivement mesurées. En particulier pour les régimes AL, la teneur observée de la MSI en amidon rejeté par voie fécale a été de  $2,88 \pm 1,71$  % tandis que les valeurs simulées ont été de  $2,75 \pm 3,43$  % (différence non significative entre les deux séries,  $n = 33$ ,  $R = 0,55$ ). Ce résultat constitue un élément de validation de la méthode de calcul proposée ci-dessus.

### 3 / Interactions entre les vitesses de dégradation de l'amidon et de l'azote

Depuis plusieurs années, il est apparu un débat sur l'opportunité d'harmoniser, ou non, les cinétiques de dégradation ruminale des fractions glucidique et azotée des aliments.

Un principe de base logique de ce concept est de chercher à coordonner au mieux la disponibilité entre les nutriments énergétiques et azotés pour les cellules microbiennes. Nous avons montré qu'un certain nombre de phénomènes dynamiques de retard dans l'utilisation et le recyclage des substrats et des nutriments amenait à nuancer certaines recommandations qui ont pu être faites sur ces aspects (Sauviant et Van Milgen 1995).

Dans la mesure où, pour neuf des expérimentations considérées, le plan expérimental combinait au sein d'un plan factoriel  $2 \times 2$  deux niveaux de vitesse de digestion d'amidon et d'azote, il a semblé opportun d'effectuer une interprétation spécifique de ce sous-ensemble de données pour tenter de répondre aux questions évoquées ci-dessus. Cette interprétation a été faite par analyse de variance en considérant chaque expérimentation comme un bloc et en cherchant à tester la signification de trois effets : vitesse de dégradation de l'amidon, de l'azote et interaction entre ces facteurs. Le tableau 4 présente les principaux résultats obtenus par ces analyses. Ils confirment que la digestion quantitative de l'amidon dans l'ensemble du tube digestif est très dépendante de sa vitesse de digestion dans le rumen. Les effets évoqués globalement se retrouvent donc dans ce sous-ensemble de données. Par contre, il n'apparaît pas d'influence de la vitesse de digestion de l'azote sur les différents paramètres cités antérieurement, seule la teneur en  $\text{NH}_3$  du jus de rumen est significativement accrue avec des sources azotées plus rapidement dégradables, ce qui est logique. En outre, pour ce paramètre, il existe un effet négatif de l'accroissement de la vitesse de digestion de

**Il ne semble pas y avoir d'effet important de la vitesse de digestion de l'amidon sur les paramètres de digestion de l'azote.**

**Tableau 4.** Etude des interactions entre les vitesses de dégradation de l'amidon et de l'azote dans le rumen.

|  | Nb <sup>(1)</sup> | Amidon               |       | Azote                |       | Interaction | Etr  |
|--|-------------------|----------------------|-------|----------------------|-------|-------------|------|
|  |                   | R - L <sup>(2)</sup> | Sign. | R - L <sup>(2)</sup> | Sign. |             |      |
| Digestibilité ruminale de la MO (%)    | 6                 | + 6,5                | ***   | + 0,1                | ns    | ns          | 2,7  |
| Digestibilité ruminale de l'amidon (%) | 7                 | + 17,1               | ***   | + 2,8                | ns    | ns          | 6,1  |
| Digestibilité totale de la MO (%)      | 6                 | + 2,7                | **    | + 0,2                | ns    | ns          | 2,2  |
| Digestibilité totale de l'amidon (%)   | 6                 | + 4,2                | ***   | + 1,0                | ns    | ns          | 2,3  |
| $\text{NH}_3$ du rumen (mg N / l)      | 8                 | - 13,3               | **    | + 24,7               | ***   | ns          | 16,8 |
| pH ruminal                             | 7                 | - 0,07               | ns    | - 0,03               | ns    | ns          | 0,1  |
| % acétate                              | 9                 | - 1,2                | *     | - 0,7                | ns    | ns          | 1,9  |
| % propionate                           | 9                 | + 2,1                | **    | + 1,1                | L     | ns          | 2,1  |
| % butyrate                             | 8                 | - 1,0                | **    | + 0,5                | L     | ns          | 0,7  |
| Acétate / propionate                   | 9                 | - 0,22               | **    | - 0,18               | L     | ns          | 0,3  |
| Protéosynthèse (g MAm/kg MS)           | 6                 | + 21,6               | **    | + 5,0                | ns    | ns          | 13,5 |
| g N microbien/kg MOD rumen             | 5                 | + 0,3                | ns    | - 0,6                | ns    | ns          | 3,8  |
| MS ingérée (kg/j)                      | 9                 | - 0,70               | **    | + 0,2                | ns    | *           | 0,78 |
| Taux butyreux (g/kg)                   | 6                 | - 0,81               | ns    | - 0,4                | ns    | ns          | 1,2  |
| Taux protéique (g/kg)                  | 6                 | - 0,67               | ns    | + 0,56               | ns    | ns          | 1,7  |
| Urée sanguine (mg/l)                   | 4                 | + 8,7                | ns    | + 6,0                | ns    | ns          | 15,0 |

<sup>(1)</sup> Nombre de blocs pris en compte.

<sup>(2)</sup> Rapide - Lent.

**Chez la vache laitière, les amidons rapides conduisent à une diminution des quantités ingérées, mais sans modification de la production laitière.**

l'amidon. Ce résultat complète ce qui était indiqué plus haut sur l'absence d'effet global du régime, AR vs AL, sur la teneur en  $\text{NH}_3$  du jus de rumen. En effet, les résultats présents montrent qu'à teneur égale en azote fermentescible, les régimes AR induisent une meilleure utilisation de l'azote pour la protéosynthèse que les régimes AL. La minimisation de l'ammoniogénèse ruminale, donc vraisemblablement des rejets azotés urinaires, passe donc par la combinaison de sources d'amidon rapide avec de l'azote lent.

Il est important de souligner qu'aucune interaction significative n'a pu être mise en évidence dans cette analyse. Cette additivité entre les rythmes de dégradation de l'amidon et de l'azote tend à nuancer, voire à remettre en cause la recommandation de la synchronisation entre les vitesses de digestion ruminale des glucides et des protéines des régimes.

#### 4 / Influence de la vitesse de dégradation de l'amidon sur les flux métaboliques

Dans ce domaine, l'information expérimentale disponible est bien plus faible que pour le tube digestif. Pour 13 comparaisons, les teneurs en urée du plasma avaient été mesurées. Lorsque les teneurs en amidon et en protéines brutes de ces rations sont prises en compte, il apparaît que l'emploi d'amidon de type AR accroît l'urémie de  $44 \pm 23$  mg/l ( $P < 0,07$ ). Ce résultat va à l'encontre de ceux de l'expérimentation citée plus haut de Delgado-Elorduy *et al* (1996a) à propos de l'influence de régimes de type AR et AL sur l'urémie et sur le recyclage ruminal de l'urée. D'autre part ces expérimentations déjà évoquées de Delgado-Elorduy *et al* (1996a et 1996b) ont permis de montrer qu'un apport accru d'amidon lent induisait effectivement une augmentation du flux de glucose absorbé. Cependant le niveau de sécrétion de lactose et de lait n'a pas été affecté par le régime.

#### 5 / Influence de la vitesse de dégradation de l'amidon sur les paramètres zootechniques

##### 5.1 / Ingestion de matière sèche

A partir des 44 comparaisons disponibles avec des résultats d'ingestion il apparaît que la MSI est significativement accrue de  $0,43 \pm 0,15$  kg/j pour les régimes AL par rapport aux régimes AR. Lorsque les 33 comparaisons relatives aux vaches laitières sont considérées seules, l'effet reste aussi marqué ( $0,57 \pm 0,16$  kg MSI/j). En outre, lorsqu'on étudie les 20 comparaisons concernant des vaches laitières produisant plus de 30 kg de lait brut

par jour, l'écart devient égal à  $0,63 \pm 0,18$  kg MSI/j. Il est probable que les régimes de type AR entraînent à des régulations par rétroactions homéostatiques plus marquées de l'ingestion en raison des fermentations ruminales et des absorptions d'AGV plus intenses et brutales qu'elles engendrent. Ces observations sont à rapprocher des résultats de la synthèse d'Owens *et al* (1997), qui montre que l'accroissement de la vitesse de digestion de l'amidon par traitement hydrothermique réduit la quantité de MS ingérée.

##### 5.2 / Performances zootechniques

Peu de publications récentes font référence à des comparaisons de sources amyliées de type AR et AL chez le bovin en croissance. Il semble par contre que plus d'informations soient disponibles sur ce sujet en considérant les bulletins des stations expérimentales américaines et une synthèse de ceux-ci a déjà été effectuée par Owens *et al* (1997). Seuls les résultats de production et de composition du lait sont donc considérés ici. Sur la base des 30 comparaisons faites sur vaches laitières en production, il n'apparaît pas d'influence du type d'amidon sur la production laitière brute. Néanmoins les réponses de la production de lait (Rep PL, kg/j) et de l'ingestion (Rep MSI, kg/j) sont positivement et significativement liées :

Rep PL = 0,80 Rep MSI  
(n = 30 ; R = 0,56 ; etr = 1,6)

A partir des 29 comparaisons disponibles sur le taux protéique (TP, g/kg), il apparaît que ce dernier est significativement abaissé de  $0,50 \pm 0,17$  g/kg pour les régimes AL en comparaison des régimes AR. La production totale de protéines n'est pas modifiée par la nature de l'amidon. La réponse (AR-AL) de la sécrétion protéique du lait (Rep MP, g/j) est en fait très corrélée à celle du lait brut :

Rep MP = 13,7 + 33,2 Rep PL  
n = 29 ; R = 0,93 ; etr = 26,2

Il est à noter que le taux protéique de cette réponse marginale de la production au type d'amidon est de 33,2 g/kg.

Dans la base de données, on disposait de 29 comparaisons avec mesures du taux butyreux du lait. Lorsque l'influence de l'expérimentation est prise en compte, il apparaît un accroissement significatif du TB ( $1,20 \pm 0,54$  g/kg) pour AL en comparaison de AR. Cette influence est a priori en contradiction avec les résultats des essais dans lesquels du glucose était infusé dans le duodénum et où la conséquence a été une chute du TB (Lemosquet *et al* 1997). Cette apparente contradiction entre les résultats s'explique sans doute par le fait que les régimes de type AR entraînent une entrée importante et brutale d'AGV, de propionate en particulier (voir ce qui a été écrit plus haut), ce qui a un effet insulino-trope et abaisse le TB et la sécrétion de lipides, en raison notamment d'une moindre disponibilité en précurseurs courts (acétate et  $\beta$ -hydroxybutyrate) et d'une moindre mobilisation des

précurseurs lipidiques du tissu adipeux (Casper et Schingøthe 1989, Casper *et al* 1990). Les présents résultats suggèrent que l'effet insulinothrompe des fermentations ruminales serait plus marqué que celui de l'absorption intestinale de glucose, ce qui va dans le sens des résultats de Landau *et al* (1995). Par contre, Schmidely *et al* (1996) n'ont pas observé de différence de réponse à court terme de la glycémie et de l'insulinémie entre des aliments concentrés de type AR et AL. Les différences, sans doute importantes, de dynamique entre ces deux flux d'entrée sont vraisemblablement décisives vis-à-vis des phénomènes observés.

En outre, les effets observés sont liés à la valeur du taux butyreux dans l'essai considéré. En effet, comme le montre la figure 9, l'influence de la vitesse de digestion de l'amidon est d'autant plus marquée que le TB est faible, c'est-à-dire que l'animal reçoit déjà une ration excédentaire en énergie. Cette interaction, déjà remarquée sur un nombre plus faible de données (Sauvant *et al* 1994), est cohérente avec ce qui a été indiqué à propos du pH ruminal (cf. figure 5) ou d'autres paramètres fermentaires du rumen. La teneur en amidon du régime et le niveau de production laitière sont également liés au TB. Quand ces deux paramètres sont pris comme covariables dans l'analyse, la différence AL-AR du TB est de 1,0 g/kg de lait dans le cas de l'amidon et de 1,2 g/kg dans le cas de la production laitière. D'autre part, la réponse du TB (Rep TB, g/kg) est significativement liée à celle de la production laitière brute :

$$\text{Rep TB} = -1,27 - 0,87 \text{ Rep PL}$$

(n = 29 ; R = 0,64 ; etr = 2,26)

Les chutes de TB les plus marquées sont donc en partie associées aux réponses de production laitière brute les plus fortes. Un phénomène de dilution semble donc également intervenir pour expliquer les chutes de TB. La réponse de la sécrétion lipidique (Rep MG, g/j) est significativement influencée par le type d'amidon (AL - AR = 39,4 ± 12,6 g/j). En outre celle-ci est positivement liée à la réponse de la

production laitière, avec cependant une relation moins précise que dans le cas de la sécrétion des protéines :

$$\text{Rep MG} = -38,6 + 10,2 \text{ Rep PL}$$

(n = 29 ; R = 0,32 ; etr = 65,5)

Enfin, si on suppose que la teneur en lactose du lait n'est pas modifiée, il en résulte que l'exportation d'énergie par le lait (Rep ENL) est significativement modifiée par la vitesse de digestion de l'amidon (AL - AR = -393 ± 220 kcal/j). La réponse de l'exportation de l'énergie est liée à celle de l'ingestion d'énergie nette calculée sur la base de la dMO mesurée dans 17 comparaisons (Rep ENI, kcal/j) :

$$\text{Rep ENL} = 0,206 \text{ Rep ENI}$$

(n = 17 ; R = 0,45 ; etr = 1323)

La valeur de ce coefficient de régression suggère que près de 80 % des variations de l'ingéré énergétique sont amorties par les réserves corporelles.

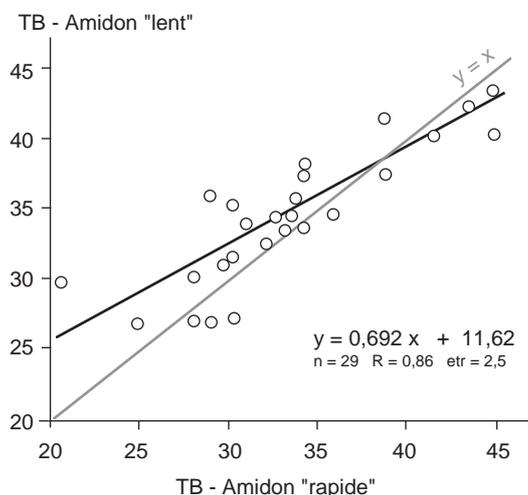
## Conclusions

Cette analyse bibliographique quantitative confirme les revues précédentes montrant les larges variations possibles de la vitesse de digestion de l'amidon des aliments dans le réticulo-rumen. Elle confirme en particulier que le contrôle de la vitesse de digestion de l'amidon est le principal moyen de maîtriser la répartition de la digestion de la matière organique entre les différents segments digestifs. En effet, les fractions digestibles des constituants pariétaux sont digérées à raison de 90 % environ au niveau du réticulo-rumen. La répartition de la digestion des protéines est contrôlable, mais pas dans le but de modifier les produits terminaux énergétiques. Par rapport à la connaissance préalable du sujet, la présente étude présente peu d'hypothèses explicatives sur les phénomènes observés, en particulier pour la digestion post-ruminale (Huntington 1997). Par contre, elle a l'intérêt de fournir des résultats complémentaires et quantifiés des réponses de différents paramètres nutritionnels et zootechniques à la vitesse de digestion de l'amidon. Pour le praticien, les aspects qui nous semblent les plus intéressants à retenir sur l'influence de la vitesse de digestion de l'amidon sont les suivants.

La vitesse de digestion de l'amidon influence la quantité de matière organique fermentescible par les microbes et, de ce fait, la protéosynthèse microbienne. Les équations proposées permettent d'avoir une méthode d'estimation de la teneur en MOF des aliments. Cependant lorsque la teneur en amidon digestible dans le rumen s'accroît au-dessus d'un seuil de 25 % MS environ, il semble y avoir une relative inhibition de la protéosynthèse ruminale et une quasi absence de réponse à la vitesse de digestion de l'amidon.

Les fermentations ruminales sont d'autant plus sensibles à la vitesse de dégradation de l'amidon qu'elles se caractérisent déjà par un

**Figure 9.** Interaction entre taux butyreux du lait et vitesse de digestion de l'amidon.



**La composition du lait est influencée par la vitesse de digestion de l'amidon.**

pH et une proportion d'acétate faible et, au contraire, une proportion de propionate élevée. Dans ces conditions, qui correspondent en général à des régimes à digestibilité élevée, les amidons lents présentent l'intérêt d'une plus grande sécurité par rapport aux risques d'acidose latente.

Les résultats regroupés ont permis de montrer que les formes d'amidon à faible vitesse de dégradation entraînaient une baisse systématique de la concentration énergétique du régime. Cet aspect semble avoir été jusqu'à présent assez largement négligé alors qu'il pourrait avoir un impact non négligeable dans le cas d'animaux dont le niveau de production implique une densité énergétique élevée du régime et un transit rapide. En effet, tous les régimes à amidon lent ont présenté des valeurs énergétiques inférieures aux 0,92 à 0,95 UFL/kg MSI généralement recommandées pour des femelles en début de lactation. Ces observations montrent qu'il serait souhaitable de mettre en place des recherches dont le but serait de mieux comprendre les causes de la limitation de la capacité amylolytique de l'intestin grêle du ruminant (Shirazi-Beechey *et al* 1996, Huntington 1997).

A partir des différentes données publiées, nous avons fait une proposition de démarche permettant d'estimer d'une façon relative simple, c'est-à-dire à partir de la dégradabilité *in situ* de l'amidon, la quantité de glucose disponible dans l'intestin. Une première validation de cette approche a été faite.

Le nombre non négligeable d'essais consacrés à l'étude des interactions entre les vitesses de dégradation des glucides et de

l'azote ne mettent pas en évidence d'interaction entre ces facteurs. Ces résultats signifient que la combinaison dysharmonieuse de ces vitesses de dégradation ne présente pas de résultats aussi défavorables qu'on pourrait a priori le penser. Ceci veut dire pratiquement qu'il n'est sans doute pas nécessaire d'intégrer dans la formulation des aliments et des régimes une contrainte forte sur cet aspect.

Il apparaît qu'un accroissement de la vitesse de dégradation de l'amidon réduit significativement les quantités de matière sèche ingérées. L'accroissement du taux protéique du lait avec les aliments à amidon rapide est peut-être la conséquence directe d'une croissance accrue des micro-organismes de la panse. En effet, l'accroissement du flux de protéines microbiennes obtenu par ce type d'amidon permettrait un meilleur équilibre des acides aminés pour les synthèses mammaires de protéines. En contrepartie, les amidons rapides ont tendance à diminuer la teneur en matière grasse du lait. Ces résultats montrent donc que le rapport TP/TB du lait que l'on cherche aujourd'hui à maximiser est favorablement modifié lorsque le régime contient des amidons rapides par rapport aux lents.

Cet ensemble de résultats montre donc que, suivant la composante considérée, un avantage apparaît pour l'une ou l'autre forme d'amidon. Ceci veut dire que le choix entre les deux natures d'amidon devrait se faire en considérant le plus précisément possible le contexte zootechnique et alimentaire de l'élevage considéré ainsi que les objectifs de réponse recherchés.

## Références bibliographiques

- Aldrich J.M., Muller L.D., Varga G.A., Griel L.C., 1993. Nonstructural carbohydrate and protein effects on rumen fermentation, nutrient flow and performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 77, 1091-1105.
- Archimède H., Sauvant D., Hervieu J., Ternois F., Poncet C., 1996. Effects of the nature of forage and concentrate and their proportion on ruminal characteristics of non lactating goats, consequences on digestive interactions. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 58, 267-282.
- Archimède H., Sauvant D., Schmidely P., 1997. Quantitative review of ruminal and total tract digestion of mixed diet organic matter and carbohydrates. *Reprod. Nutr. Dev.*, 37, 173-189.
- Axe D.E., Bulsen K.K., Harmon D.L., Lee R.W., Miliken G.A., Avery T.B., 1987. Effect of wheat and high moisture sorghum grain fed singly and in combination on ruminal fermentations, solid and liquid flows, site and extent of digestion and feeding performance of cattle. *J. Anim. Sci.*, 64, 897-906.
- Carey D.A., Caton J.S., Biondini M., 1993. Influence of energy source on forage intake, digestibility, *in situ* forage degradation, and ruminal fermentation in beef steers fed medium quality brome hay. *J. Anim. Sci.*, 71, 2260-2269.
- Casper D.P., Schingoethe D.J., 1989. Lactational response of dairy cows to diets varying in ruminal solubilities of carbohydrate and crude protein. *J. Dairy Sci.*, 72, 928-941.
- Casper D.P., Schingoethe D.J., Wade A.E., 1990. Response of early lactation dairy cows fed diets varying in source of NSC and crude protein. *J. Dairy Sci.*, 73, 1039-1050.
- Chen K.H., Huber J.T., Theurer C.B., Swingle R.S., Simas J., Chan S.C., Wu Z., Sullivan J.L., 1994. Effect of steam flaking of corn and sorghum grains on performance of lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 77, 1038-1043.
- Cole N.A., Johnson R.R., Owens F.N., 1976a. Influence of roughage level and corn processing method on the site and extent of digestion by beef steers. *J. Anim. Sci.*, 43, 490-496.
- Cole N.A., Johnson R.R., Owens F.N., Males J.R., 1976b. Influence of roughage level and corn processing method on microbial protein synthesis by beef steers. *J. Anim. Sci.*, 43, 497-503.

- Cone J.W., 1991. Degradation of starch in feed concentrate by enzymes, rumen fluid and rumen enzymes. *J. Sci. Food Agric.*, 54, 23-34.
- Cone J.W., Cliné-Theil W., Malestein A., Van't Klooster A.T., 1989. Degradation of starch by incubation with rumen fluid. A comparison of different starch sources. *J. Sci. Food Agric.*, 49, 173-183.
- Cullen A.J., Harmon D.L., Nacarajo J.G., 1986. *In vitro* fermentation of sugars, grains and by-products feeds in relation to initiation of ruminal lactate production. *J. Dairy Sci.*, 69, 2616-2621.
- Delgado-Elorduy A., Alio A., Lozano O., Tagari H., Cueno P., De Young D., Gheniwa G., Simas J., Yu P., Santos F., 1996a. Net absorption and hepatic metabolism of glucose and L-lactate in lactating cows fed diets containing 40 % dry rolled or steam-flaked sorghum grain. *J. Dairy Sci.*, 79, Suppl. 1, 178, n° 193.
- Delgado-Elorduy A., Theurer B., Huber T., Sadik M., Alio A., Lozano O., Tagari H., Cueno P., De Young D., Chenniwa G., Simas J., Yu P., Santos F., 1996b. Visceral and hepatic nitrogen metabolism in lactating dairy cows fed diets with steam processed corn flaked at different densities. *J. Dairy Sci.*, 79, Suppl. 1, 178, n° 194.
- De Peters E.J., Taylor S.J., 1985. Effects of feeding corn or barley on composition of milk and diet digestibility. *J. Dairy Sci.*, 68, 2027-2032.
- De Smet A.M., Bøever J.L., Brabander D.L., Vanacker J.M., Boucque C.V., 1995. Investigation of dry matter degradation and acidotic effect of some feed-stuffs by means of *in sacco* and *in vitro* incubations. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 51, 297-315.
- Feng P., Hunt C.W., Pritchard G.T., Parish S.M., 1995. Effect of barley variety and dietary barley content on digestive function in beef steers fed grass hay-based diets. *J. Anim. Sci.*, 73, 3476-3484.
- Grings E.E., Ruffler R.E., Deitelhoff, 1992. Evaluation of corn and barley as energy sources for cows in early lactation fed alfalfa basal diet. *J. Dairy Sci.*, 75, 193-200.
- Herrera-Saldana R.E., Huber J.T., 1989. Influence of varying protein and starch degradabilities on performance of lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 72, 1477-1483.
- Herrera-Saldana R.E., Huber J.T., Poore M.H., 1990. Dry matter, crude protein and starch degradability of five cereal grains. *J. Dairy Sci.*, 73, 2386-2389.
- Huntington G.B., 1997. Starch utilisation by ruminants : from basics to the bank. *J. Anim. Sci.*, 75, 852-867.
- INRA, 1978. L'alimentation des ruminants. R. Jarige (ed), 598 p. INRA, Paris.
- Khorasani G.R., De Boer G., Robinson B., Kennelly J.J., 1994. Influence of dietary protein and starch on production and metabolic responses of dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 77, 813-824.
- Kung L., Tung R.S., Carmeron B.R., 1992. Rumen fermentation and nutrient digestion in cattle fed diets varying in forage and energy source. *Anim. Feed Sci.*, 39, 1-12.
- Landau S., Bor A., Leibovich H., Zoref Z., Nitsan Z., Nadar Z., 1995. The effect of ruminal starch degradability in the diet of Booroola crossbred ewes on induced ovulation rate and prolificacy. *Anim. Reprod. Sci.*, 38, 97-108.
- Lemosquet S., Rideau N., Rulquin H., Favardin P., Simon J., Vérité R., 1997. Effects of duodenal glucose infusion on the relationship between plasma glucose and insulin in dairy cows. *J. Dairy Sci.* (accepté).
- Malestein A., Van't Klooster J.A., Pains R.A., Connette G.M., 1984. Concentrate feeding and ruminal fermentation. 3. Influence of concentrate ingredients on pH and 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., 1994. Influence du pH ruminal sur la digestion des parois végétales, en relation avec les modifications de l'activité fibrolytique de l'écosystème microbien. Doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Matatu B., Teller E., Focant M., Mignolet E., Gigounon B., Vanbelle M., Hofstraeten W., Van Aelten, Skorko-Sajko H., 1993. Effect of the degradability of starch in fat supplemented diets on the composition of milk in dairy cows. 44e réunion de la FEZ, Aarhus, Danemark.
- Mc Carthy R.D., Klusmeyer T.H., Vicini J.L., 1989. Effect of source of protein and carbohydrate on ruminal fermentation and passage of nutrients to the small intestine of lactating cows. *J. Dairy Sci.*, 72, 2002-2016.
- Michalet-Doreau B., Sauviant D., 1989. Influence de la nature du concentré, céréale ou pulpe de betterave, sur la digestion chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 2, 235-244.
- 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.
- Oliveira J.S., Huber J.T., Simas J.M., Theurer C.B., Swingle R.S., 1995. Effect of sorghum grain processing on site and extent of digestion of starch in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 78, 1318-1327.
- Overton T.R., Cameron M.R., Elliott J.P., Clark J.H., 1995. Ruminal fermentation and passage of nutrients to the duodenum of lactating cows fed mixtures of corn and barley. *J. Dairy Sci.*, 78, 1981-1998.
- Owens F.N., Secrist D.S., Hill W.J., Gill D.R., 1997. The effect of grain source processing on performance of feedlot cattle, a review. *J. Anim. Sci.*, 75, 868-879.
- Poncet C., Michalet-Doreau B., Mc Allister T., Rémond D., 1995. Dietary compounds escaping rumen digestion. In : M. Journet, E. Grenet, M.H. Farce, M. Thériez, C. Demarquilly (eds), Recent developments in the nutrition of herbivores. Proc. IVth. Int. Symp on the nutrition of Herbivores, 167-204. INRA, Paris.
- Robinson P.H., Sniffen C.J., Van Soest P.J., 1985. Influence of level intake on digestion and bacterial yield in the forestomach of dairy cattle. *Can. J. Anim. Sci.*, 65, 437-444.
- Robinson P.H., Tamminga S., Van Vuuren A.M., 1987. Influence of declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on rumen ingesta quantity, composition and kinetics of ingesta turnover in dairy cows. *Livest. Prod. Sci.*, 17, 37-62.

- Robinson P.H., Khorasani G.R., Kennelly J.J., 1995. Evaluation of linseed meal for dairy cows : interaction with grain source on forestomach and whole-tract digestion. *Can. J. Anim. Sci.*, 76, 209-214.
- Rode L.M., Satter L.D., 1988. Effect of amount and length of alfalfa hay in diets containing barley or corn on site of digestion and rumen microbial protein synthesis in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.*, 68, 445-454.
- Sauvant D., Chapoutot P., Archimède H., 1994. La digestion des amidons par les ruminants et ses conséquences. *INRA Prod. Anim.*, 7, 115-124.
- Sauvant D., Van Milgen J., 1995. Dynamic aspects of carbohydrate and protein breakdown and the associated microbial matter synthesis. In : Engelhardt et al (eds), *Proc. 8th Int. Symp. on Ruminant Physiology*, 71-91. Verlag, Stuttgart.
- Schmidely P., Archimède H., Bas P., Rouzeau A., Munoz S., Sauvant D., 1996. Effects of the synchronization of the rate of carbohydrate and nitrogen release of the concentrate on rumen fermentation, plasma metabolites and insulin in the dry pregnant goat. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 63, 163-178.
- Shirazi-Beechey S.P., Wood I.S., Dyer J., Scott D., King T.P., 1996. Intestinal sugar transport in ruminants. In : Engelhardt et al (eds), *Proc. 8th Int. Symp. on Ruminant Physiology*, 117-133. Verlag, Stuttgart.
- Sutton J.D., 1981. Concentrate feeding and milk composition. In : *Recent advances in animal nutrition*. Haresign W. Butterworths, London.
- Tamminga S., Van Straalen W.M., Subnel A.P.J., Meijer R.G.M., Steg A., Wever C.J.G., Block M.C., 1994. The dutch protein evaluation system : the DVE/OEB system. *Livest. Prod. Sci.*, 40, 139-145.
- Tisserand J.L., Demarquilly C., 1995. Digestion et absorption dans le gros intestin. In : R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.H. Farce, M. Journet (eds), *Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion*, 583-599. INRA, Paris.
- Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin. *Bull. Tech. CRZV Theix, INRA*, 70, 19-34.
- Voigt J., Platkowski B., Krawielitzki R.K., Trautmann K.O., 1977. Die wirkung der physikalische form von trockengrunfutter und verschiedener stärkequellen auf den ort der verdauung der kohlenhydrate und des proteins sowie die bakterielle proteinsynthese im pansen der kuh. *Tierernahrung*, Heft 6, Band 27.
- Voigt J., Jentsch W., Schönhuse U., Beyer M., Kreienbring F., 1993. Einfluss der stärkeherkunft gerste, mais und kartoffeln und ihrer rationsanteile auf die nährstoffverdaulichkeit und die energieverwertung bei wiederkäuern. *Arch. Anim. Nutr.*, 44, 369-382.
- Weiss W.P., Fisher G.M., Erikson G.R., 1989. Effect of source of NDF and starch on nutrient utilization by dairy cows. *J. Dairy Sci.*, 72, 2308-2315.
- Zinn R.A., 1990. Influence of flake density on the comparative feeding value of steam-flaked corn for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.*, 68, 767-775.
- Zinn R.A., Adam C.F., Tamayo M.S., 1994. Interaction of feed intake level on comparative ruminal and total tract digestion of dry-rolled and steam flaked corn. *J. Anim. Sci.*, 73, 1239-1245.

## Abstract

### *Nutritional and zootechnical consequences of variations in starch degradation rate in ruminants.*

A data base was pooled with 52 comparisons between two diets containing starch fraction having either a rapid or a slow degradation rate in the reticulo-rumen. This base was treated with appropriate statistical methods to test the effects and to calculate empirical models of rumen digestion response and animal performances to these variations in starch degradation rate. Decreasing starch degradation rate decreased the amount of fermentable organic matter and microbial growth, however, microbial growth efficiency was not affected. With slow starch sources, rumen pH and the proportion of ruminal acetate were higher while the proportion of propionate and its concentration in fluid were lower. There was a systematic decrease of total tract starch and organic matter digestibility, and thus diet energy density, with a slow versus a rapid starch degradation rate.

Nine of the published trials were based on a factorial 2 x 2 combinations of starch and nitrogen degradation rates. No interactions appeared between these two parameters for the measured items.

Decreasing the starch degradation rate was accompanied by a systematic increase in the level of dry matter intake. In contrast, a specific analysis of trials performed on dairy cows indicated that raw milk yield was not altered by changes in the starch degradation rate. However the milk contents in fat and protein were respectively significantly increased or decreased when slow starch diets were compared to rapid ones.

Sauvant D., 1997. Conséquences digestives et zootechniques des variations de la vitesse de digestion de l'amidon chez les ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 10 (4), 287-300.