

Nouveaux critères d'évaluation de la qualité des aliments concentrés et co-produits pour les ruminants

D. SAUVANT, P. CHAPOUTOT, S. GIGER-REVERDIN, F. MESCHY

UMR INRA-INAPG Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris - France

RESUME - L'évaluation de la qualité des aliments concentrés et co-produits en tant que déterminant des réponses nutritionnelles et zootechniques des animaux ruminants soulève un certain nombre de problèmes et de questions spécifiques. La valeur énergétique globale reste un critère essentiel à évaluer de façon précise ; d'autre part, il est maintenant bien admis qu'il convient de chercher à exprimer les aliments concentrés et les co-produits en terme de flux de nutriments énergétiques absorbables : amidon (glucose), acides gras longs et acides gras volatils. L'état de la connaissance et les travaux de modélisation ne sont pas identiques entre ces trois nutriments. Compte tenu des publications récentes sur la question, la prévision de la valeur azotée, autre critère essentiel, a été rappelée pour mémoire. L'évaluation de la qualité minérale de ces aliments a connu un regain d'intérêt, avec notamment la mise au point d'un nouveau système pour le phosphore. En outre, l'équilibre électrolytique de ces aliments est devenu récemment un sujet d'intérêt majeur. Les critères liés aux risques sanitaires sont tout à fait essentiels compte tenu de la réputation des aliments concentrés et de certains coproduits. Dans ce domaine, sont passés en revue les critères de fibrosité et d'encombrement, l'évaluation de la teneur en éléments glucidiques rapidement fermentescibles, le pouvoir tampon et l'acidogénicité *in vitro* à court terme ainsi que la dégradation à court terme de la matière sèche *in sacco*.

New items to assess the quality of concentrates and by-products for ruminants

D. SAUVANT, P. CHAPOUTOT, S. GIGER-REVERDIN, F. MESCHY

UMR INRA-INAPG Physiologie de la Nutrition et Alimentation, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris - France

SUMMARY - The assessment of the quality of concentrates and by-products, considered as determinant of nutritional and zootechnical responses of ruminants, raises some problems and specific issues. The global energy value remains an essential item that must be accurately evaluated. It is now well admitted that it is necessary to express nutritive values of concentrate and by-products in terms of flows of absorbable energy nutrients : starch (glucose), long chain fatty acids and volatile fatty acids. The state of knowledge and modelling works are not the same between these three nutrients. These aspects are only simply recalled, taking into account recent publications on the prediction of the nitrogen value. The interest for the assessment of mineral quality of these feeds has been renewed with the development of a new unit system for phosphorus. Moreover, the electrolytic balance of these feeds has recently become a topic of interest. Criteria related to safety risks are important to be known, considering the reputation of the concentrate and by-products. In this area, the criteria of fibrosity and fill, the evaluation of the quickly fermentable carbohydrate contents, the buffer capacity and short term *in vitro* acidogenesis and the short term disappearance of dry matter *in situ* are reviewed.

INTRODUCTION

Jusqu'à des temps récents, la qualité des aliments concentrés et des co-produits était essentiellement fondée sur leurs valeurs nutritives énergétique, azotée, minérale et vitaminique. Les critères sur lesquels l'attention était focalisée ne concernaient que la composante nutritive procurant un intérêt technique et économique à l'aliment considéré.

Au cours des années 90, le développement du concept de "lois de réponse multiples aux régimes et aux pratiques alimentaires" (impact sur les performances, sur la qualité des produits, sur l'environnement, sur la santé et sur le bien être animal..., Sauvant 1992 et Sauvant, 1999) a remis en partie en cause les fondements et la finalité de la nutrition et de l'alimentation animales. En effet, face à cette évolution, les **concepts classiques**, de valeur nutritive et de couverture des besoins, sont devenus insuffisants et il importe de repenser et d'en trouver de nouveaux, de manière à pouvoir définir une nouvelle évaluation des aliments qui soit plus adaptée et de type "**multicritères**".

Ce texte est consacré à faire le point sur de nouveaux critères d'évaluation de la qualité des **aliments concentrés et des co-produits** en tant que vecteurs des réponses zootechniques des ruminants. Les données relatives à ces aliments ont été actualisées dans les tables INRA-AFZ

(2002) ainsi que plus récemment dans les logiciels INRATION et Prévalim (Baumont *et al.*, 1999).

1. LES PROBLEMES, PRINCIPES, SPECIFICITE

Dans le cas des aliments concentrés et co-produits, le problème est plus difficile à raisonner dans l'absolu, car, dans la plupart des situations, ils sont utilisés en complément de fourrages. De plus les mesures *in vivo* de ces aliments sont effectuées au sein de rations mixtes. Ceci implique au moins deux types de contraintes :

- les critères d'évaluation de la qualité doivent être **cohérents** entre les concentrés, les co-produits et les fourrages de manière à pouvoir permettre de raisonner simultanément **l'ensemble d'une ration**, ou d'un **système alimentaire**, vis-à-vis des réponses induites.

- les critères d'évaluations des concentrés et co-produits doivent être raisonnés prioritairement à travers des **modèles de réponses induites par des rations** qui tiennent compte des phénomènes d'interactions entre fourrages et concentrés (Sauvant, 2003).

La problématique générale est la suivante : on cherche à expliquer et à prédire un **vecteur de n réponses zootechniques R_i** ($i = 1, n$) à partir d'un ensemble de **m caractéristiques alimentaires C_j** ($j = 1, m$). Ce sont sur ces caractéristiques que nous nous focaliserons. Elles sont de différents types :

- Une première partie de ces caractéristiques Cj correspond aux **critères classiques** (énergie, PDI...). La question est alors de chercher à savoir dans quelle mesure elles peuvent être utilisées en l'état, non seulement comme vecteurs d'éléments nutritifs, mais également pour prédire certaines réponses.

- Une seconde partie des Cj correspond à **des flux d'éléments** peu considérés, ou peu connus jusqu'alors, issus des aliments ou de l'environnement, et susceptibles de présenter une influence sur la qualité des produits (Polyphénols...) ou bien un impact défavorable sur l'ensemble de la **chaîne alimentaire** (Polluants Organiques Persistants... Bertrand et Duhem, 2004 ; Ducoulombier-Crepineau *et al.*, 2004).

- Une troisième partie des Cj correspond à des **critères connus et mesurables**, mais jusqu'alors peu usités en raison de leur manque de signification nutritionnelle assez précise. Il s'agit alors de reconsidérer ces critères et leurs **effets biologiques** pour voir s'ils n'expliquent pas certaines réponses animales intéressantes à prendre en compte. Ces caractéristiques ne correspondent pas forcément à des flux de nutriments (*cf.* les critères de fibrosité, d'encombrement...).

- Une quatrième partie des Cj correspond à des **critères mal connus, ou difficiles à mesurer**, qu'il serait nécessaire de pouvoir disposer pour expliquer et prédire une réponse connue et digne d'intérêt. C'est dans ce groupe qu'on retrouve des allégations de qualité, assez souvent appliquées à des aliments commercialisés. La question est alors de démontrer la relation critère de qualité-effet revendiqué.

Un autre aspect important à prendre en compte dans l'optique "lois de réponse" est la nécessaire **segmentation** des unités alimentaires en différents **éléments nutritifs**, ou groupes d'éléments, jouant un rôle déterminant pour certaines réponses animales. Dans ce domaine, la voie a été tracée par l'exemple de l'azote (voir plus loin). Actuellement, c'est essentiellement l'énergie qui est "visée" par ces préoccupations (*cf.* ci-dessous).

2. LA PREVISION DES VALEURS ENERGETIQUES

Les unités d'énergie agrègent différents flux d'éléments présentant des **effets physiologiques spécifiques**, parfois antagonistes, ayant donc des impacts différentiels sur les réponses animales. Il convient donc de chercher à exprimer les aliments en termes de **flux absorbés des principaux éléments nutritifs énergétiques**. Plusieurs équipes travaillent dans cette optique depuis plus de 10 ans, mais le travail ne peut progresser que lentement dans ce domaine en raison de la lourdeur des expérimentations. De plus cette approche "flux de nutriments vecteurs d'énergie" va de pair avec la mise au point de **modèles explicatifs de prévision** des flux digestifs, d'une part, et des flux métaboliques, d'autre part. Or, ces activités de modélisation sont souvent beaucoup plus lourdes à faire aboutir qu'on ne le pense souvent. Des "chantiers" sont en route, des données sont rassemblées et des premiers modèles sont construits dans le domaine des flux d'amidon et glucose, d'acides gras longs, d'AGV...

2.1. LA PREVISION DES FLUX GLOBAUX D'ENERGIE

L'appréciation précise de la valeur énergétique globale d'un aliment reste une question primordiale et sujette à débat. En

effet, l'énergie est souvent un **facteur limitant** ou excédentaire des régimes ce qui présente un impact important sur les réponses zootechniques. En outre, l'énergie représente de loin la composante nutritive **la plus coûteuse** d'un régime alimentaire.

2.2. DEMARCHE GENERALE PROPOSEE

L'approche classique évalue le flux de matière organique digestible (MOD) associé à chaque aliment. Celui-ci est ensuite interprété en flux d'énergie digestible (ED). En tenant compte des pertes énergétiques du CH₄ et de l'urine, l'ED est transformée en énergie métabolisable (EM) puis en énergie nette (EN). Ces transformations ont été modélisées empiriquement (INRA, 1988) et actualisées pour les concentrés et co-produits (INRA-AFZ, 2002).

La précision des modèles utilisés pour évaluer l'ED et l'EM est connue, par contre le passage EM >>> EN se fait à l'aide d'équations (*cf.* kl, km, kf... INRA, 1988) dont peu connaissent le degré de précision. En outre, l'EN obtenue agrège plusieurs fonctions (entretien + gain pour les UFV et entretien + lait + variations de poids pour les UFL) qu'il conviendrait de pouvoir considérer séparément dans une optique "lois de réponses". Il faut même chercher à distinguer les différentes réponses des constituants produits (lait, Sauvant, 2003) ou déposés (carcasse).

2.3. L'ACTUALISATION DE LA PREDICTION DE LA DMO

Les valeurs de digestibilité de la MO (dMO) et les valeurs énergétiques pour les ruminants présentées dans les tables INRA-AFZ (2002) ont été élaborées à partir de résultats de digestibilité mesurés *in vivo* sur plus de 300 matières premières. Ensuite, des modèles de prédiction de la dMO, en fonction des critères analytiques représentatifs des constituants pariétaux (cellulose brute, NDF, ADF), ont été étudiés par groupe et en optimisant la procédure statistique. Ainsi, six modèles de prédiction pour des familles majeures d'ingrédients ont été calculés (Sauvant *et al.*, 2002). Ces équations sont assez précises puisque les valeurs d'ETR obtenues sont souvent proches de la valeur de l'incertitude de la mesure (environ 3 % de dMO). Si c'est souhaité par les utilisateurs, il est possible de fournir plus d'équations combinant les différents prédicteurs possibles et d'indiquer les niveaux de précision à en attendre.

2.4. LES METHODES ALTERNATIVES D'EVALUATION DES CONTENUS ENERGETIQUES

Compte tenu de la lourdeur des mesures de digestibilité *in vivo*, plusieurs familles de **méthodes alternatives** ont été proposées pour évaluer plus facilement, voire en routine, la digestibilité des concentrés et co-produits. Contrairement aux études *in vivo*, elles présentent l'intérêt d'évaluer spécifiquement ces aliments.

- Une partie des méthodes proposées fait appel à **des incubations in vitro avec du jus de rumen**. La méthode classique de Tilley et Terry (1963) a été supplantée par la méthode du "gaz-test" de Hohenheim (Menke *et al.*, 1979) qui présente l'intérêt d'être bien standardisée et de s'appuyer sur des mesures de production de gaz faciles à lire. Des variantes de cette méthode, bien adaptées à des mesures en cinétique, ont été proposées par Cone *et al.* (1996) aux Pays-Bas.

- Les méthodes consistant à incuber les aliments dans des **sachets de nylon** placés dans le rumen ont également été appliquées (méthodes *in sacco* ou *in situ*). Celles-ci nécessitent, comme les précédentes, de disposer d'animaux canulés du rumen. Leur intérêt réside dans la possibilité de prédire, outre la **valeur énergétique** par les mesures de dégradabilité à 48 ou 72 heures d'incubation, les **cinétiques de dégradation** des principaux constituants chimiques des aliments : **matière sèche, azote, amidon, parois**... Celles-ci peuvent ensuite être interprétées pour estimer les quantités disparues à un temps donné, ou bien compte tenu d'un taux d'écoulement des particules hors du rumen (6 %/heure dans le système PDI français). Grâce en particulier au travail de synthèse des informations publiées, réalisé par Chapoutot (non publié), les tables INRA-AFZ (2002) ont indiqué, pour les aliments concentrés et des co-produits, les valeurs les plus probables des paramètres des cinétiques de dégradation *in sacco* de la MS, de l'azote et de l'amidon.

- Une autre famille de méthode *in vitro* consiste à incuber les aliments avec des **préparations enzymatiques**. En France, Aufrère et Michalet-Doreau (1988) ont proposé d'employer une combinaison d'actions de cellulase et de pepsine. Cette méthode a été calibrée et des jeux d'équations sont disponibles pour prédire les dMO et les valeurs énergétiques des principales familles de concentrés et co-produits.

- Les méthodes les plus simples à appliquer en routine, en particulier grâce au calibrage de la réflectance infra-rouge, restent les **analyses chimiques**. A ce niveau, le principal problème reste celui des significations biochimique et biologique des constituants pariétaux dosés. Au cours des dernières décennies, l'ancestrale méthode de Weende (cellulose brute) a été largement remplacée par la méthode de Van Soest (NDF, ADF, ADLignine) dont les résultats sont biochimiquement plus réalistes et qui explique mieux les réponses d'efficacité digestive des animaux. Ce changement a permis de gagner en précision de prédiction, en particulier grâce à l'ADLignine pour les mélanges d'aliments (Sauvant, 1981 ; Giger-Reverdin *et al.*, 1994). Par contre, le dosage de l'AD Lignine ne permet pas de disposer d'une équation générale qui permettrait de prédire assez précisément les variations de la digestibilité au sein des différents groupes d'aliments concentrés et co-produits (Chapoutot, non publié).

2.5. LE DEBAT SCIENTIFIQUE ENTRE LES PAYS

Même au sein de l'Europe, les **systèmes d'unités d'énergie** diffèrent assez largement dans leur conception et dans les hiérarchies des aliments auxquelles elles aboutissent (Vermorel et Coulon, 1998). Ces différences, et les problèmes qui en découlent, mériteraient d'être supprimés par une harmonisation effective des systèmes. Différentes actions ont déjà eu lieu pour tenter de progresser dans ce sens (par exemple le séminaire de la FEZ en juin 2005 : "*Harmonization of Feed Unit Systems*"). Malheureusement les débats progressent peu et rien de concret ne semble se dessiner dans ce sens pour les prochains mois.

3. LA PREDICTION DES FLUX DIGESTIFS DES NUTRIMENTS ENERGETIQUES ABSORBABLES

Si on considère que, pour les nutriments azotés en tant que vecteurs énergétiques, la question est pour l'instant suffisamment avancée, il reste à se pencher sur la prédiction des flux digestifs **d'amidon, d'acides gras volatils et d'acides gras longs** pour s'en tenir aux principaux nutriments.

3.1. LES FLUX DIGESTIFS D'AMIDON

Il s'agit d'un aspect important de l'évaluation des concentrés et co-produits amylacés. Des cinétiques de mesures de dégradation *in sacco* de l'amidon ont été publiées depuis plus de 10 ans par différents laboratoires. Une première synthèse sur cette question (Sauvant *et al.*, 1994), a été complétée par une synthèse bibliographique quantitative qui soit la plus exhaustive possible (48 références et 302 traitements, Offner *et al.*, 2003). Les principaux résultats de cette synthèse ont été incorporés dans les tables INRA-AFZ (2002) avec indications des paramètres a, b, c et DTAMsac de la cinétique de dégradation de l'amidon. Ceci permet, par exemple, d'estimer la teneur en amidon "soluble" probable des aliments (*cf.* la partie "sécurité"). Dans le domaine de l'impact des traitements technologiques, nos suggestions de valeurs de DTAMsac de l'amidon ont souvent été les premières proposées dans la littérature.

Dans une seconde étape (Offner & Sauvant, 2004), nous avons rassemblé en une base les données des essais publiés sur bovins dans lesquels des flux digestifs d'amidon avaient été mesurés. Cette base intégrait 87 publications correspondant à 316 traitements. Les valeurs de DTAMsac de toutes les rations de cette base ont été calculées à l'aide de la base précédente. Dans la phase suivante, ces valeurs de DTAMsac ont été utilisées pour prédire la digestibilité de l'amidon dans le rumen (dAMru, %) en intégrant l'effet du niveau d'ingestion de matière sèche, rapporté au poids vif (MSI%PV):

$$\mathbf{dAMru = 43,92 + 0,68 \times DTAMsac - 8,27 \times MSI\%PV}$$

(n = 179, etr = 11,9%)

La teneur en amidon des aliments (AM%MS) permet de calculer les teneurs en amidon digéré (AMDru, %MS) et non digéré (AMNDru, %MS) dans le rumen

$$\mathbf{AMDru = AM\%MS \times dAMru/100}$$

$$\mathbf{AMNDru = AM\%MS \times (100 - dAMru)/100}$$

Ce dernier critère a permis de prédire la digestibilité, dans l'intestin grêle (dAMig, %), de l'amidon non digéré dans le rumen :

$$\mathbf{dAMig = 74,0 - 1,22 \times AMNDru}$$

$$\mathbf{(nexp = 18, n = 51, etr = 10,8\%)}$$

pour en déduire la teneur en amidon digestible dans l'intestin grêle des aliments (AMDig, %MS), qui fournit du glucose potentiellement absorbable :

$$\mathbf{AMDig = AMNDru \times dAMig/100}$$

Enfin, à partir des 55 résultats de digestibilité de l'amidon dans le gros intestin (dGI, %) il est apparu que cette valeur pouvait être considérée comme constante et égale à 50 % du flux d'amidon entrant dans cet organe.

L'ensemble de ces équations a été validé sur des données de flux fécaux d'amidon (Offner et Sauvant, 2004). A l'aide des équations citées ci-dessus, il est donc possible de prédire les **flux digestifs d'amidon** les plus probables pour les différents aliments dont on connaît la DTAMsac. Si on ne la connaît pas, il est possible de prendre la valeur moyenne indiquée dans la table INRA-AFZ. Le tableau 1 fournit quelques exemples de valeurs de ces flux.

Pour une évaluation en routine, la mesure de la dégradabilité *in sacco* de l'amidon constitue une méthode lourde et coûteuse. Pour éviter cet inconvénient, nous avons proposé d'employer une méthode de **dégradabilité *in vitro* de l'amidon** à l'aide d'une amylase 'Calbiochem' pour prédire la DTAMsac des aliments amyliacés (Chapoutot *et al.*, 2003). Il existe en effet une relation assez précise entre les teneurs en amidon dégradé *in sacco* (AMDsacco, %MS) et hydrolysable *in vitro* par l'amylase (AMHyd, %MS) :

$$\text{AMDsacco} = 4,33 + 0,91 \text{ AMHyd} \quad (\text{n} = 19, \text{etr} = 3,8 \% \text{MS})$$

Au registre des critères simples, on peut également indiquer que la mesure de la **densité** constitue un bon critère pour évaluer la DTAMru des maïs et sorgho ayant subi différents types de traitement hydro-thermiques (Offner *et al.*, 2002).

3.2. LES FLUX DE MOF ET LES CRITERES DERIVES

Les teneurs en matière organique fermentescible (MOF%MS) des aliments doivent pouvoir être évaluée très précisément compte tenu de leurs "rôles clefs".

Les études sur les flux digestifs d'amidon permettent d'améliorer la prédiction de MOF des aliments amyliacés. Dans le système PDI, version 1988, il a été proposé d'appliquer à la MOF un coefficient multiplicateur simple mais peu précis pour tenir compte des variations de digestibilité ruminale de l'amidon (Vérité *et al.*, 1987). Grâce aux nouvelles données, la soustraction de la quantité AMNDru dans le calcul de la MOF

$$\text{MOF} = \text{MOD} - \text{MAT} (1\text{-DTN}) - \text{AMNDru} - \text{EE} - \text{AGVensilage}$$

permet d'être plus précis que précédemment dans l'estimation de la teneur en MOF, donc en PDIE, de certains concentrés, co-produits et rations. Ces nouvelles valeurs (exemples dans le tableau 1) ont été intégrées dans les calculs des valeurs PDIE des aliments des tables INRA-AFZ (2002). Il est également possible d'estimer la MOF à partir de la DTMSsac, dans ce cas les aliments riches en parois digestibles, qui sont dégradés

plus lentement, sont dévalorisés (pulpes de betteraves, coques de soja...), par contre les produits riches en lipides sont surestimés à moins de faire une correction spécifique.

Les acides gras volatils (AGV) absorbés représentent les flux d'énergie les plus importants et les plus difficiles à prédire. De larges différences séparent les modèles de prédiction des flux d'AGV absorbés (Sauvant, 1996). Dans ce domaine, des progrès seront vraisemblablement accomplis grâce aux nouveaux travaux expérimentaux sur l'absorption des AGV (Nozière *et al.*, 2003) et par l'interprétation de la base de données "Flora" des flux de nutriments plasmatiques rassemblée à l'INRA de Theix (Vernet *et al.*, 2004).

En attendant, il est possible de calculer une estimation grossière de cette quantité d'AGV produits dans le rumen, cohérente avec l'approche PDI. La MOF permet la synthèse de MAT microbienne avec une efficacité de 0,145 (Vérité *et al.*, 1987). La MO microbienne (MOM) étant formée d'environ 50 % de protéines, près de 30 % de la MOF est transformée en MOM, le reste étant transformé en AGV + gaz. La partition des flux de carbone entre les AGV et les gaz étant de l'ordre de 75/25, on peut aboutir à une estimation du flux de MO transformé en AGV produits dans le rumen (MOagv, %MSI) :

$$\text{MOagv} = 0,525 \times \text{MOF}$$

Il est intéressant de noter que cette MOFagv calculée, donc la MOF, est le meilleur critère que nous ayons trouvé pour prédire le pH *in vitro* obtenu pour les 14 aliments étudiés dans la partie acidogénicité (cf. ci-dessous)

$$\text{pH} = 6,34 - 0,007 \text{ MOagv} \quad (\text{n} = 14, \text{ETR} = 0, 09)$$

Outre son manque de validation, cette approche présente l'inconvénient d'ignorer le **profil des AGV** produits, or il est connu que les variations de ce profil en fonction des rations, qui traduisent les variations du "statut énergétique du rumen" (Sauvant et Van Milgen, 1996), ont une influence marquée sur la partition des flux métaboliques et les réponses animales, la composition de leurs produits particulièrement. Il est bien sûr illusoire de penser pouvoir prédire individuellement les profils d'AGV induits par les aliments concentrés et co-produits. La solution à cette question du profil des AGV ne pourra être obtenue que par une approche "ration" (Archimède *et al.*, 1997).

Tableau 1 : exemples de nouveaux critères de qualité pour quelques aliments concentrés et co-produits (abréviations dans le texte)

Aliments	NDF %MS	Amidon %MS	Sucres scl. %MS	UFLkg MS	MOF% MS	pH in vitro	DT Amidon %	Am. Dig. Rum. %MS	Am. Dig. Int. G. %MS	DMS4h in sacco %	AG Dig. g/kgMS	BACA
Avoine	37,2	41,1	1,3	0,88	54,6	5,87	93	40,63	0,34	51,27	3,64	-21
Blé	14,3	69,8	2,7	1,18	77,62	5,84	94	69,48	0,23	56,74	0,8	-18
Maïs	12	74,2	1,9	1,22	48,41	6,04	60	56,71	9,21	24,06	2,68	0
Orge	21,6	60,2	2,5	1,09	68,75	5,77	89	57,88	1,65	49,68	1,03	22
Sorgho	10,8	74,1	1,2	1,22	46,81	6,1	60	56,63	9,21	39,71	2,21	37
Son de Blé	45,5	22,7	7,6	0,94	59,38	5,87	96	22,75	0	39,61	2,32	204
Glutenfeed	38,4	20,5	1,9	1,06	64,17	5,86	85	19,15	0,97	35,92	2	200
T.Colza	31,9	0	8,7	0,96	56,54	5,95	0	0	0	32,48	1,44	-60
T.Coprah	54,6	0	11,3	1,04	50,68	5,96	0	0	0	51,15	6,14	128
T.Soja	13,9	0	9,4	1,21	64,09	6,01	0	0	0	31,45	1,04	329
Manioc	9,7	76,2	2,2	1,03	67,44	5,7	84	70,67	3,71	77,77	0,23	43
Coques Soja	63,1	0	1,7	1,01	69,12	6	0	0	0	9,61	1,672	268
Citrus Pulp	21,6	3,3	22,7	1,08	76,93	5,82	0	0	0	39,53	0,97	48
Pulpes Bot. Desh.	45,4	0	7,5	0,99	72,16	5,89	0	0	0	12,16	0,11	68

3.3 LES FLUX DIGESTIFS D'ACIDES GRAS LONGS

Pour estimer la digestibilité des acides gras longs dans les tables INRA-AFZ (2002), nous avons appliqué l'équation proposée par Sauvant et Bas (2001) pour prédire le flux duodénaux des acides gras longs (AG_{duo}, %MSI) à partir de leur teneur dans le régime (AG_{alim}, %MSI) sur la base d'une analyse des données de régimes alimentaires disponibles dans la littérature :

$$AG_{duo} = 0,83 AG_{alim} + 0,84$$

$$(n = 116 \text{ nexp} = 38 ; r = 0,97 ; ETR = 0,54)$$

Avec une digestibilité intestinale des acides gras passant au duodénum estimée à 75 %, la digestibilité dans l'intestin grêle des acides gras ingérés (dAG en %) se calcule ainsi :

$$dAG = 100 \times (AG_{alim} - (1 - 0,75) * AG_{duo}) / AG_{alim}$$

soit :

$$dAG = 79 - (21 / (MG \times \text{Coefficient AG/MG} / 100))$$

Dans cette équation, MG représente la teneur en matières grasses. Le coefficient AG/MG est le taux d'acides gras dans la matière grasse (en %) indiqué dans les mêmes tables. Une limite majeure de cette approche concerne les difficultés du dosage des AG des aliments et des contenus digestifs. Les digestibilités ainsi obtenues sont négatives pour des matières premières ayant de faibles teneurs en matières grasses. Cela provient du fait que l'activité microbienne du rumen synthétise des lipides, les cellules microbiennes étant riches en acides gras (Sauvant et Bas, 2001).

Dans ce domaine, les connaissances évoluent rapidement. En effet, un travail très récent conduit en collaboration entre les laboratoires de l'URH (INRA de Clermont Fd Theix) et de l'UMRPNA (INRA INA P-G), permettra de progresser sensiblement dans le domaine de la prévision des flux digestifs des AG chez le ruminant à partir des caractéristiques des aliments. D'une part, un nouveau jeu d'équations globales plus précises viendra actualiser les équations proposées ci-dessus (Schmidely *et al.*, en cours de publication) ; d'autre part, de nouvelles équations, appliquées aux AG, permettront de prédire les quantités absorbées des différents AG d'intérêt nutritionnel, en particulier les AG insaturés et les isomères de type "trans" (Glasser *et al.*, en cours de publication).

Ces travaux vont permettre un progrès substantiel dans l'évaluation de la "valeur lipidique" des aliments dont l'impact sur la qualité des produits est devenu un centre d'intérêt majeur. Les aliments concentrés et co-produits sont particulièrement concernés par ces aspects car ils présentent un large éventail de teneurs et de profils de composition en acides gras. En outre, ces deux équipes, plus l'équipe TALL de l'URH, entament une collaboration sur la prévision des réponses de la composition en AG de la matière grasse du lait à partir des flux absorbés prédits par les deux dernières références citées.

4. PREVISION DE LA VALEUR AZOTEE

La valeur azotée des aliments concentrés et des co-produits est un critère essentiel de leur valorisation. Dans ce domaine, les systèmes PDI et AADI proposés par l'INRA ont eu une avance par rapport aux propositions équivalentes

faites dans d'autres pays. En outre, dans le cas du système PDI (Vérité, Delaby, 1998) et des systèmes LysDI et MetDI (Rulquin *et al.*, 1993), mais également pour 7 autres AA essentiels, des lois de réponses intéressantes de la sécrétion du lait ont été obtenues. De plus, les valeurs PDI de ces aliments ont été largement actualisées par P. Chapoutot et J.L. Peyraud dans les tables INRA-AFZ : valeurs de DT *in sacco* de N et de fractions azotées entrant dans l'intestin grêle, références plus complètes sur l'impact des traitements technologiques etc. Ces différents aspects ne seront toutefois pas détaillés dans cet article.

5. EVALUATION DE LA QUALITE MINERALE

Les apports journaliers recommandés (AJR) antérieurs confondaient, tant en France qu'à l'étranger, teneur et valeur nutritionnelle pour les éléments minéraux des aliments concentrés et des co-produits. Les travaux récents permettent d'intégrer l'efficacité de l'utilisation de ces apports alimentaires par l'animal, soit de façon globale (NRC, 2001) soit par "familles" ou groupes d'aliments pour le **phosphore** (Meschy, 2002), ce qui a été le cas des tables INRA-AFZ (2002) ; mais aussi pour le **calcium** (Meschy et Corrias, 2005). Il semble préférable, que pour une formulation plus ajustée aux besoins de l'animal, les AJR se dirigent vers une expression en **éléments absorbables**. Ceci présente aussi l'intérêt d'être en cohérence avec les apports alimentaires des autres nutriments de la ration. La compilation des données dans des bases de données extraites de la littérature ou d'origines diverses permet de préciser les teneurs en éléments minéraux des aliments concentrés (sl) mais elle doit obéir à certaines règles de sélection. Par exemple, il est actuellement hasardeux d'accepter des données issues de "NIRS" compte tenu de la difficulté de calibrage de la méthode pour les minéraux.

Si l'on écarte les pulpes de betteraves et d'agrumes ainsi que les co-produits d'origine animale qui ont des compositions minérales particulières et, sur la base des tables INRA-AFZ (2002), les aliments concentrés se caractérisent, comparativement aux besoins des animaux, par une concentration élevée en phosphore ($6,65 \pm 3,60$) et magnésium ($2,83 \pm 1,75$) et faible en calcium ($3,55 \pm 4,69$).

Au delà de la composition ou valeur minérale stricte, c'est à dire en rapport direct avec les AJR, il convient de s'intéresser aux **grands équilibres biologiques** dans lesquels les éléments minéraux sont susceptibles d'intervenir. Ainsi, l'**équilibre électrolytique** des aliments (bilan alimentaire en cations et en anions ou BACA, bilan électrolytique ou BE) a été reconnu comme un des paramètres pouvant expliquer les variations de l'état d'acidose métabolique. En effet, l'absorption des cations comme Na^+ ou K^+ induit une sortie d'ions H^+ , alors que l'absorption d'anions comme Cl^- ou S^{2-} se fait en échange d' HCO_3^- et peut donc être considéré comme acidogène. Les notions de BE et de BACA ont été respectivement proposées par Mongin et Sauveur (1973) et Dishington (1975). Ces deux bilans sont très corrélés entre eux ($BE = BACA + 150$) et des valeurs de BACA de rations inférieures à 120 à 150 meq/kg MS correspondent à une acidogénicité trop élevée et doivent être corrigées (Apper-Bossard *et al.*, 2004, Meschy et Peyraud, 2004). Ces derniers travaux ont permis

de dégager des réponses zootechniques intéressantes des bovins aux critères de BACA ou de BE des rations. Les tables INRA-AFZ (2002) présentent des valeurs moyennes de BE et de BACA pour les concentrés et co-produits, des exemples sont cités dans le tableau 1. Il existe des "familles" d'aliments à BACA faibles (pulpes de betteraves et céréales) ou élevés (mélasses, vinasses, tourteaux et farines de luzerne). Tout comme pour les fourrages, ce paramètre est très fortement lié à la teneur en potassium des aliments, à l'exception des sous-produits du maïs.

6. EVALUATION DES CRITERES DE RISQUE SANITAIRE

Dans cette partie nous privilégions les critères permettant d'expliquer et de prévoir les phénomènes de **déviations fermentaire et d'acidose du rumen** (ainsi que les différents troubles qui y sont associés). Ces problèmes sont en effet de plus en plus fréquents avec l'accroissement des potentiels de production et l'augmentation de l'apport des aliments concentrés. Compte tenu des mécanismes déterminants de ces troubles digestifs, **différents types de critères** sont utilisés. Certains ont pour but de prédire le **recyclage salivaire des tampons** dans le rumen, d'autres **l'encombrement des aliments**, d'autres leur teneur en **glucides rapidement fermentescibles**, d'autres enfin la rapidité et l'importance de la dégradation ruminale des aliments. Enfin, l'équilibre électrolytique des aliments, évoqué plus haut, est un des paramètres pouvant contrôler l'état d'acidose métabolique.

6.1. LES CRITERES DE FIBROSITE

Il est recommandé d'apporter un minimum de deux types de fibre dans les régimes : la **fibre chimique**, représentée par la teneur en paroi végétale (min.NDF > 35-40 %MS), et la **fibre physique**, évaluée par la taille moyenne des particules (min.TPart > 4mm). L'accroissement de ces deux types de fibre entraîne une augmentation du **travail masticatoire**, exprimé en min/kg MSI (*cf.* l'indice de mastication) : 1 min/point NDF autour de NDF = 35 % et 2 min/mmTPart autour de TPart = 4 mm (Sauvant et Mertens, 2001). Cette réponse augmente en conséquence le flux de la **sécrétion de salive** (environ 300 ml/min de mastication) et le **recyclage des tampons**, bicarbonates en particulier (environ 3,4g bicarbonate Na/min de mastication) et accroît le pH ruminal. Les relations entre le pH ruminal et ces deux critères de fibrosité ne sont pas linéaires (Sauvant, Mertens, 2001). Autour des valeurs seuils recommandées, on estime la chute du pH à 0,37 point pH/10 %NDF en moins et à 1,14 point pH/mmTPart en moins (Sauvant *et al.*, 2005).

Un débat demeure sur le meilleur critère de fibre physique, la TPart est assez lourde à mesurer, par contre la proportion de la MS retenue par un tamis de taille d'ouverture connue est au moins aussi pertinente et plus facile à mesurer (Sauvant et Mertens, 2002). Ainsi on estime que la proportion P2 de la MS, retenue par un tamis de 2 mm d'ouverture, doit être supérieure à 40 %MS.

Pour ces différents attributs de fibrosité physique, les aliments concentrés et co-produits sont très déficients. En effet, à l'exception de quelques co-produits (pulpes de betteraves, drèches de brasserie...), TPart est en général inférieur à 1 mm et P2 inférieur à 10-15 % MS. Il serait sans doute utile de chercher à privilégier des traitements technologiques permettant d'accroître ces valeurs.

Au niveau de la fourniture de fibres NDF on peut dire que les concentrés ont en général un poids très limité puisqu'ils ne représentent plus d'1/3 de l'apport de NDF ingérée que lorsque le régime contient plus de 50 %MS de concentré ou co-produit. C'est la conséquence du fait que les teneurs en NDF de ces aliments sont souvent inférieures à 40 %, excepté pour des co-produits. Néanmoins, certains d'entre eux possèdent une bonne valeur UF: les *glutenfeed* et autres co-produits du maïs grain, les coques de soja, les drèches de brasserie, certains tourteaux (Palmiste, Coprah...) et les pulpes de betteraves... (Tables INRA-AFZ, 2002). Ces aliments fibreux et de bonne valeur énergétique, qualifiés de "riches en cellulose facilement digestible", mériteraient un renouveau d'études dans le contexte actuel.

Dans certains pays, des mesures standardisées d'**indice de mastication** (IM) ont été systématiquement effectuées (De Brabender *et al.*, 1996). L'IM correspond à des minutes de mastication ingestive et mérycique/kg de MSI. Ces IM ont servi de base à des systèmes " d'Indexes de Structure " qui sont, par exemple, utilisés aux Pays-Bas et au Danemark. Des tables présentent donc des valeurs de ces IM, sachant que pour les rations il est recommandé de se situer au dessus du seuil de 40 min/kg MSI. Pour les aliments concentrés broyés, la valeur d'IM est inférieure à 10 min/kg MSI. Cependant, quelques co-produits riches en parois présentent des valeurs d'IM supérieures à 25-30 min/kg MSI (drèches de brasserie, pulpes de pomme de terre et de betteraves...). Il serait intéressant de faire des études plus systématiques des impacts des traitements technologiques sur les IM de ces aliments.

L'IM présente l'intérêt d'être intégratif des deux types de fibres, cependant il est lourd à évaluer systématiquement. Des alternatives de laboratoire ont donc été proposées, **la dépense électrique lors du broyage** des aliments est un critère *a priori* intéressant, cependant il ne semble pas être étroitement lié au travail masticatoire pour un ensemble divers d'aliments (De Brabender *et al.*, 1996).

6.2. L'ENCOMBREMENT

Le manque d'encombrement des rations peut être, en tant que tel, un facteur de risque de pathologie digestive (torsion de la caillette...) et les aliments concentrés et co-produits peuvent être critiqués pour leur manque d'encombrement. En France, un système des unités d'encombrement (UE) a été proposé par l'INRA (Faverdin *et al.*, 1987). Dans ce système, les aliments concentrés et les co-produits ne présentent pas, sauf exception, de valeur UE propre, celle-ci dépend de la valeur UE du fourrage associé et du coefficient de substitution, lui-même influencé surtout par le bilan énergétique de l'animal pour les animaux laitiers ou par le pourcentage de concentré pour les animaux producteurs de viande. Une autre approche plus mécaniste de l'encombrement a été proposée par Baumont *et al.*, (1996) sur la base des temps de séjour et des cinétiques de dégradation *in sacco*. La majorité des concentrés présente de faibles valeurs sur ces critères.

Des systèmes d'unités d'encombrement avec valeurs individualisées pour les concentrés et co-produits ont été proposés dans les tables alimentaires aux Pays Bas et au Danemark. Dans les deux cas, les valeurs ont été largement indexées sur la teneur en cellulose brute des aliments en

liaison avec la présentation physique (1 point de cellulose brute a beaucoup plus de pouvoir d'encombrement pour un fourrage que pour un aliment concentré).

Dans ces tables, les valeurs d'encombrement des concentrés et co-produits sont beaucoup plus faibles que celles des fourrages (0-0,5 vs. 1,5-4,2 au Danemark et vs. 0,7-1,7 aux Pays Bas). Sur ces critères, quelques co-produits, riches en parois se distinguent par des valeurs plus élevées que l'ensemble des concentrés (pulpes de betteraves, coques de soja, drêches de brasserie, *glutenfeed*, tourteau de palmiste...).

Etant donné que l'encombrement du rumen dépend surtout de la quantité de fibre NDF ingérée, on peut penser que ce critère est actuellement le meilleur pour évaluer le pouvoir d'encombrement physique des aliments concentrés et co-produits.

6.3. LA TENEUR EN ELEMENTS "GLUCIDIQUES" RAPIDEMENT FERMENTESCIBLES

L'acidogénicité à court terme dépend d'abord de la teneur en **éléments "glucidiques" rapidement fermentescibles**, il n'y a cependant pas de méthodes de routine simple et se suffisant à elles-mêmes, pour les évaluer. De plus il n'existe pas de modèles de réponses statistiquement intéressants des animaux aux variations de ces constituants dans les régimes. En effet, la teneur en **sucres solubles** (tableau 1), constituant très acidogène est insuffisante seule (les pulpes d'agrumes en sont très riches, plus de 20 %MS, le tourteau de coprah en est assez riche, plus de 10 %MS, par contre il y en a peu dans des aliments acidogènes tels que le manioc, l'orge...). La teneur en **substances pectiques**, qui sont très acidogènes, est malheureusement difficile à apprécier spécifiquement. Elle peut être approchée par exemple par la différence [Paroi "Carré"-Paroi "NDF"] qui est, par exemple, égale à environ 20 % MS pour les pulpes de betteraves, 15 % MS pour les pulpes d'agrumes, 10 % MS pour le lupin et les produits du soja... (INRA-AFZ, 2002). D'autre part, la teneur en **amidon** dit "**soluble**", ou digestible dans le rumen (*cf. ci-dessus*) est aussi un critère intéressant, cependant elle nécessite d'effectuer le dosage de l'amidon et l'évaluation de sa fermentescibilité à court terme.

6.4. LE POUVOIR TAMPON DES ALIMENTS

Le pouvoir tampon intrinsèque (PT) et le pH initial (pHi) des aliments sont deux méthodes originales qui visent à estimer l'acidogénicité intrinsèque des aliments avant toute fermentation (Giger-Reverdin *et al.*, 2002). Sur un ensemble de 24 matières premières ou fourrages couramment utilisés en France, le **pH initial** de l'aliment (pH de 10 g d'échantillon dans 200 ml d'eau distillée) a varié de 3,89 (ensilage de maïs) à 6,76 (*corn gluten feed*). Le **pouvoir tampon intrinsèque** reflète la capacité d'un aliment à maintenir le pH de son milieu aqueux avec une addition d'acide acétique. La plupart des ingrédients a un PT qui varie entre 0,20 (sorgho) et 2,20 (foin de luzerne), quelques-uns ont cependant des PT très élevés : *corn gluten meal* (4,51), drêches de brasserie (8,60) ou *corn gluten feed* (19,64). Les principaux facteurs chimiques de variation du PT sont les teneurs en minéraux (effet positif) et l'amidon (effet négatif). Il sera intéressant de chercher à mieux caractériser le rôle quantitatif du PT des aliments vis-à-vis

du pH ruminal. Rappelons au passage que la **capacité tampon d'une ration** peut être significativement améliorée par une supplémentation en bicarbonate à raison d'environ 1 % de la MSI (Meschy *et al.*, 2004).

6.5. L'ACIDOGÉNÉCITÉ IN VITRO À COURT TERME

L'acidogénicité *in vitro* à court terme dépend essentiellement de la nature des aliments puisque la hiérarchie entre matières premières est la même avec les différentes méthodes. Ce type de mesure est *a priori* intéressant car les résultats intègrent les effets de plusieurs des paramètres évoqués dans les parties 3 et 4 (*cf. ci-dessus*). Giger-Reverdin et Sauvant (2001) ont étudié un ensemble de 14 matières premières courantes étudiées au moins par 2 équipes différentes. Une analyse de variance-covariance de ces données, intégrant les effets équipe et durée d'incubation, a révélé des pouvoirs acidogènes significativement différents entre aliments. Les valeurs ajustées de pH ainsi obtenues sont présentées dans le tableau 1. Ces valeurs pourraient être incorporées avec intérêt dans un processus de formulation, cependant le nombre de matières premières ainsi caractérisées reste trop faible.

La méthode des gaz de Menke, évoquée plus haut, peut être utilisée en cinétique de court terme dans cette optique de prédiction du pouvoir acidogène (Giger-Reverdin *et al.*, 2002).

6.6. LA DEGRADATION A COURT TERME DE LA MS IN SACCO

Les valeurs moyennes de la dégradation à court terme de la MS *in sacco* (après 2 ou 4 heures d'incubation) explique de façon satisfaisante les valeurs ajustées du pH *in vitro* pour les 14 matières premières précédemment citées (tableau 1) **pH = 6,05 - 0,0037 DMS_{4h} (n = 14, ETR = 0,09)**

Ce type de résultat confirme ceux obtenus par Peyraud (2000) avec des régimes *in vivo*. La DMS_{4h} est un critère fréquemment mesuré dans la bibliographie (Chapoutot *et al.*, non publié) ce qui a permis d'en faire la synthèse dans les tables INRA-AFZ (2002). La DMS_{4h} varie de 5 à 75 %/MS environ et les ingrédients sont considérés comme acidogènes quand leur DMS_{4h} > 50 %. Les DMS_{4h} sont *a priori* additives et présentent donc l'avantage de pouvoir être utilisées pour la formulation des aliments composés ou des rations complètes.

CONCLUSIONS

Dans le domaine des aliments concentrés et des co-produits les tables INRA-AFZ (2002 et 2004) ont permis de faire le point sur les unités classiques : valeurs UFL, UFV, PDI, LysDI et MetDI. Cependant, un certain nombre de caractéristiques nouvelles y ont été également indiquées en vue de progresser dans le domaine de l'évaluation multicritères de ces aliments décrite dans ce texte. Dans le domaine des nutriments énergétiques des apports récents (amidon), à venir très prochainement (acides gras) ou à moyen terme (AGV) permettront de quantifier les principaux flux entrant dans l'organisme à partir des rations offertes. Ces flux devront ensuite être mis en correspondance avec les flux métaboliques (travail en cours à l'INRA-Theix) et les réponses zootechniques.

Dans le domaine des fibres et de l'encombrement, la place et le rôle des aliments concentrés et co-produits sont assez minimes en comparaison des fourrages. Quelques co-produits sont apparus intéressants sur différents critères de risque. Il serait souhaitable de chercher à mieux les connaître pour mieux les valoriser. Dans le domaine des effets acidogènes, mis à part le BACA, il n'existe pas encore de critère de laboratoire intégratif et simple à mesurer, les méthodes disponibles les plus fiables nécessitent l'emploi d'animaux porteurs de canule du rumen.

Un autre aspect important, compte tenu du fait que les aliments considérés sont souvent commercialisés, n'a pas pu être abordé, il s'agit de l'intégration de composantes économiques dans le processus de choix et d'application de nouveaux critères d'évaluation de la qualité (cf. l'exemple récent de Chapoutot et Pressenda, 2005, dans le cas des nouveaux systèmes Phosphore).

Apper E., Peyraud J.L., Meschy F. Faverdin Ph. 2004. Renc. Rech. Ruminants, 11, 251-257

Archimède H., Sauvant D., Schmidely Ph., 1997. Rep. Nut. Dev., 37, 173-189.

Aufrère J., Michalet-Doreau B., 1988. *Anim. Feed Sci. Technol.* 20, 203-218.

Baumont R., Barlet A., Jamot J. 1996. Renc. Rech. Rum., 3, 313-316.

Baumont R., Champciaux P., Agabriel J., Andrieu J., Aufrère J., Michalet-Doreau B., Demarquilly C., 1999. INRA Prod. Anim., 12, 183-194.

Bertrand S., Duhem K., 2004. In 11^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 15

Chapoutot P., Giger-Reverdin S., Dorléans M., Sauvant D., 2003. In 10^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 399

Chapoutot P., Pressenda F., 2005. INRA Prod. Anim., 18, 209

De Brabander D. L., De Boever J. L., De Smet A. M., Vanacker J. M. et Boucqué C. V., 1996. 16 pp. *Structuurwaardering in de Melkveevoeding.*, Ministerie van Middenstand en Landbouw, Brussels Belgium.

Cone J.W., Van Gelder A.H., Visscher G.J.W., Oudshoorn L., 1996. *Anim. Feed Sci. Technol.* 61, 113-128.

Dishington I.W. 1975. *Acta vet. Scan.* 16, 503-512

Ducoulombier-Crepineau C., Feidt C., Rychen G., 2004. In 11^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 23

Faverdin P., Hoden A., Coulon J.B., 1987. Bull. Tech., CRZV-INRA, 133.

Giger-Reverdin S., Aufrère J., Sauvant D., Demarquilly C., Vermorel M., 1994. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48, 73-98.

Giger-Reverdin S., 1995. *Anim. Feed Sci. Technol.* 55, 295-334.

Giger-Reverdin S., Maaroufi C., Bontems V., Jousse C., 2000. Cah. Options méditerr. 52, 39-42.

Giger-Reverdin S., Sauvant D., 2001. *Meta analysis of the acidogenicity of ingredients J. Dairy Sci.*, 84, Abstr 328).

Giger-Reverdin S., Duvaux-Ponter C., Sauvant D., Martin O., Nunes do Prado I., Muller R., 2002. *Anim. Feed Sci. Technol.* 96, 83-102.

Giger-Reverdin S., Desnoyers M., Sauvant D., 2005. In 12^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. 2005/12/07-08, INRA - Institut de l'Élevage (Eds).

INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, France. 471 pp.

INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Ed D. Sauvant, JM. Perez, G. Tran ; INRA Ed., Paris France. 301 pp.

Menke K.H., Raab L., Salewski A., Steingass H., Fritz D., Schneider W., 1979. *J. agric. Sci.* 93, 217-222.

Menke K.H., Steingass H., 1988. Res. Develop. 28, 7-55.

Meschy, F. 2002. In 9^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 279

Meschy F., Peyraud J.L. 2004. In 11^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. 2005/12/07-08, INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 255

Meschy F., Bravo D., Sauvant D., 2004. INRA Prod. Anim., 17, 11

Meschy F., Corrias R. 2005. Renc. Rech. Ruminants. 13, Ce numéro

Nozière P., Duval M., Brossard L., Courtial C., Hoch T., 2003. In 10^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 175

Offner A., Bach A., Sauvant D., 2002. *J. Dairy Sci. Abstr.* 1599

Offner A., Bach A., Sauvant D., 2003. *Anim. Feed Sci. Technol.* 106, 81-93.

Offner A., 2003. Thèse de Docteur de l'INAPG.

Offner A., Sauvant D., 2004. *Anim. Feed Sci. Technol.* 111, 41-56.

Peyraud J.L., 2000. In 7^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 183

Rulquin H., Vérité R., Guinard J., 2001. INRA Prod. Anim. 14, 265

Rulquin H., Guinard J., Vérité R., 1993. *Livest. Prod. Sci.*, 53, 1-13

Sauvant D., 1981. in Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants, Ed INRA, 237

Sauvant D., 1992. Rep. Nut. Dev., 32, 217

Sauvant D., Chapoutot P., Archimède H., 1994. INRA Prod. Anim. 7, 115.

Sauvant D., Van Milgen J., 1996. in *Ruminant Physiology* 8^e Int. Symp. Ed Enke, 71-91

Sauvant D., 1996. Ann. Zootech., 45, 215-235

Sauvant D., 1999. In 6^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 183

Sauvant D., Bas P., 2001. Prod. anim. 14, 303-310.

Sauvant D., Mertens 2001. *J. Dairy Sci.*, 84, abstr. 824

Sauvant D., Mertens 2002. *J. Dairy Sci.*, 84, abstr. 421

Sauvant D., Chapoutot P., Peyraud J.L., Meschy F., Doreau B., 2002. Valeur nutritive pour les ruminants (in ref. INRA-AFZ, 2002)

Sauvant D., 2003. In 10^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 151

Sauvant D., Giger-Reverdin S., Meschy F., 2005. *The control of rumen acidosis*, Alltech conf., Dublin (13-15 avril)

Tilley J.M.A., Terry R.A., 1963. J. br. Grassl. Soc. 18, 104-111.

Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Bull. Tech. CRZV Theix, 70, 19

Vérité R., Delaby L., 1998. In 5^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 185

Vermorel M., Coulon J.B., 1998. *J. Dairy Sci.*, 81, 846-855

Vernet J., Gely G., Leger S., Nozières P., Sauvant D., Ortigues-Marty I., 2004. In 11^e Renc. Recher. Rum., Paris, France. INRA - Institut de l'Élevage (Eds). 264