

Toute erreur dans l'alimentation des animaux domestiques a des répercussions économiques tant sur le coût des rations que sur la valeur commerciale des produits animaux, dans la mesure où la qualité de ces produits et les performances réalisées sont moindres. Aussi tous ceux (éleveurs, conseillers agricoles, techniciens des firmes d'aliment du bétail...) qui se préoccupent d'alimentation animale doivent-ils pouvoir disposer de données précises sur la composition, la valeur nutritive et l'ingestibilité (c'est-à-dire les quantités qui peuvent être ingérées) des nombreux aliments disponibles, sur les besoins nutritionnels et la capacité d'ingestion des différentes catégories de ruminants. Ces informations sont disponibles dans ce qu'on appelle couramment les « Tables ».

Jusqu'au début des années 60, les tables de référence pour ruminants étaient en France, à quelques modifications près, celles que le Pr A.M. Leroy avait élaborées dans les années 40 à partir d'un nombre limité d'expérimentations françaises ou étrangères. Elles servaient à la fois de base à l'enseignement et à la vulgarisation. Mais très vite, il est apparu indispensable de les réviser et de les compléter afin de tenir compte des progrès des connaissances sur les besoins des animaux et sur l'utilisation digestive et métabolique des aliments, et de l'évolution des techniques d'alimentation et d'élevage des animaux domestiques.

En 1965, un ouvrage de l'Agricultural Research Council (ARC) rassemblait l'information disponible à cette date sur les besoins nutritionnels des ruminants. L'ARC introduisait de nouveaux concepts, en matière d'énergie notamment, et le mode de calcul factoriel des besoins.

Par la suite, nos connaissances ont continué à s'accroître et à se préciser, notamment quant à la maîtrise des fermentations dans le rumen, l'utilisation de l'énergie, de l'azote et de certains minéraux (P, Ca, Mg, ...), la capacité d'ingestion des animaux, la composition, la digestibilité et l'ingestibilité des fourrages,

Bases rationnelles de l'alimentation des ruminants

la composition corporelle des animaux en croissance et la composition de leur gain de poids.

Dans le même temps, les demandes des utilisateurs augmentaient suite à l'évolution des conditions de la production animale. La productivité des animaux s'accroissait chaque année, de nouvelles formes de production (taurillons) apparaissaient ainsi que de nouveaux aliments et de nouvelles technologies (fourrages conditionnés, ensilages d'herbe et de maïs, tourteaux protégés...)

Aussi, dès 1973, R. Jarrige proposait-il aux chercheurs s'occupant d'alimentation des ruminants de mettre en place des recherches permettant une rénovation complète des bases de l'alimentation tout en les présentant sous une forme directement utilisable dans la pratique, et en conservant, autant que possible, les modes de raisonnement qui avaient fait leurs preuves, dans le calcul des rations notamment.

Ce travail s'est traduit par la sortie en 1978 du « Livre Rouge » intitulé « Alimentation des ruminants » (INRA 1978). Cet ouvrage présentait tout d'abord, de façon synthétique, les connaissances acquises à l'INRA et à l'étranger sur l'ingestion, la digestion et les métabolismes, connaissances qui ont permis d'élaborer de nouveaux systèmes d'expression des besoins des ruminants et de la valeur nutritive des aliments. Il comportait, en outre, des tables de la valeur des divers aliments disponibles, ainsi que des tables d'apports alimentaires recommandés pour les différentes catégories de ruminants.

1 / Les nouveaux systèmes

Pour composer les rations des animaux, les éleveurs doivent savoir dans quelle mesure les aliments peuvent se substituer les uns aux autres pour couvrir les besoins des animaux. Il est donc nécessaire d'exprimer les besoins des animaux et la valeur nutritive de tous les aliments (valeur énergétique, valeur azotée...) dans les mêmes unités. Des

méthodes de calcul et de prédiction de la valeur nutritive ont été élaborées, prenant en compte les diverses étapes de la transformation des aliments en tissus ou en produits de sécrétion, ainsi que leurs rendements de transformation. Ces ensembles de concepts et de modes de calculs constituent des « systèmes » de prédiction de la valeur énergétique, de la valeur azotée et de l'ingestibilité des aliments, des besoins et de la capacité d'ingestion des ruminants.

Ces systèmes se caractérisent par une valeur alimentaire pour chaque aliment (valeur énergétique, valeur azotée et ingestibilité) et un besoin pour chaque animal à chaque stade physiologique (besoins en énergie et en azote, capacité d'ingestion). L'objectif du rationnement consiste donc à couvrir les besoins des animaux par la somme des valeurs alimentaires des aliments consommés.

11 / Système d'évaluation de la nutrition énergétique

Le système des Unités Fourragères (UF) consiste à calculer, pour chaque aliment, la quantité d'énergie que l'animal qui l'ingère est capable d'utiliser pour la croissance et l'entretien de ses tissus ou de produire sous forme de lait (énergie nette), et de l'exprimer en « Unités Fourragères », par comparaison à la valeur énergétique nette d'un kg d'orge de référence, égale par définition à 1 UF. Adopté dès 1915 par les pays scandinaves (Danemark, Norvège, Suède), ce système nécessitait des essais d'alimentation dans lesquels on mesurait, pour chaque nouvel aliment, la quantité d'énergie fixée, par abattage, ou produite, par analyse. Ces mesures étaient très coûteuses et peu rapides. Le système a été introduit en France par A.M. Leroy dans les années 40, mais en adoptant un mode de calcul simple basé sur des mesures indirectes de la production de chaleur des animaux en chambres calorimétriques. La valeur UF des aliments était calculée à partir de leur teneur en matière organique digestible qui, multipliée par le coefficient 3,65, donnait leur teneur moyenne en énergie métabolisable dont on déduisait la perte moyenne d'énergie observée au cours de l'utilisation des aliments par les animaux (extra chaleur de 1 kcal/g de matière sèche ingérée). On négligeait donc les variations de la valeur calorifique de la matière organique digestible (MOD) et celle des pertes sous forme de gaz et d'urine suivant la composition de cette MOD. Surtout, la perte d'extra-chaleur ne tenait pas compte des différences importantes existant entre les espèces, les fonctions (entretien, lactation, croissance, engraissement...) et les aliments.

Après la seconde guerre mondiale, les connaissances sur la physiologie digestive des ruminants se sont améliorées et, surtout, on a assisté à partir de 1957 à une reprise des études de nutrition énergétique dans différents pays. Le développement technologique,

en particulier dans le domaine de l'électronique, a permis la réalisation de chambres calorimétriques permettant des mesures automatisées et précises des dépenses énergétiques des animaux. Les études ont permis d'une part de mettre en évidence les différences d'efficacité d'utilisation des produits terminaux de la digestion (glucose, acides gras longs, acides gras volatils...) d'autre part de quantifier les rendements d'utilisation de l'énergie métabolisable pour l'entretien, pour la lactation et pour l'engraissement selon les caractéristiques des aliments ou des rations. Parallèlement, l'amélioration des connaissances sur la composition chimique du gain de poids des ruminants en croissance et en finition et sur leurs particularités dans l'utilisation de l'énergie, grâce aux travaux réalisés notamment à l'INRA de Theix (équipe de J. Robelin) a permis de prévoir les besoins des animaux selon la race, le sexe, le type de production, le poids et le gain de poids. Cet ensemble de connaissances permettait de mettre au point de nouveaux systèmes d'appréciation de la valeur énergétique des aliments et des besoins des animaux.

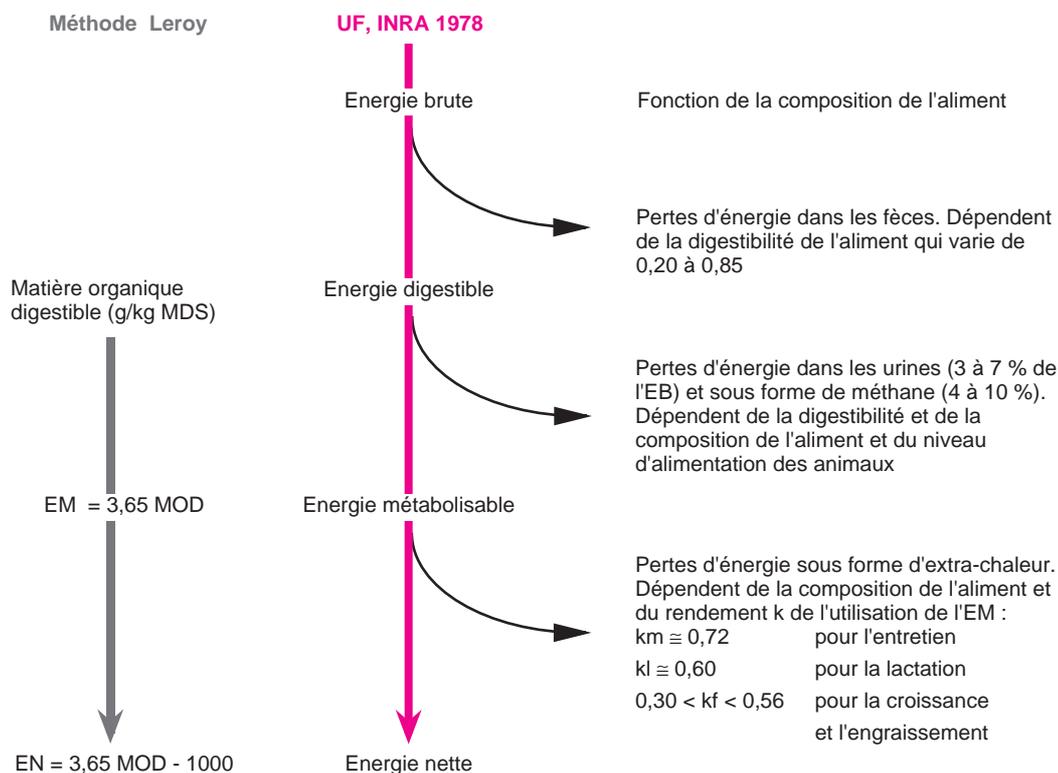
Du système des UF de Leroy, le nouveau système conserve la notion d'énergie nette parce qu'elle est la seule additive dans le calcul des rations, et son expression en UF (figure 1). Mais il adopte une démarche analytique qui repose sur une charpente physiologique solide. Cette démarche s'appuie en effet, pour chaque aliment, sur la connaissance de sa teneur en énergie brute (EB), celle de la digestibilité de l'énergie (dE) permettant le calcul de l'énergie digestible (ED), du coefficient de transformation de l'énergie digestible en énergie métabolisable (EM/ED), enfin des rendements (k) d'utilisation de l'énergie métabolisable en énergie nette pour les différentes fonctions :

$$EN = EB \times dE \times (EM/ED) \times k$$

la valeur de k variant suivant que l'énergie sert à couvrir les besoins d'entretien (km), de lactation (kl) ou d'engraissement (kf).

Pour les fourrages, les nombreuses mesures effectuées à l'INRA à partir de 1974 ont permis de proposer des équations permettant d'estimer l'énergie brute à partir des teneurs en cendres et en matières azotées et la digestibilité de l'énergie à partir de celle de la matière organique, celle-ci servant jusque là à prévoir, seule, la valeur énergétique des fourrages (Demarquilly *et al* 1978a). La variation du coefficient de transformation de l'énergie digestible en énergie métabolisable a pu être estimée de façon précise à partir des teneurs en matières azotées totales et cellulose brute de l'aliment et du niveau d'alimentation grâce au dépouillement de très nombreuses données obtenues dans le monde en chambres calorimétriques (M. Vermorel et J.C. Bouvier, 1978, non publié). Quant aux rendements k, ils étaient déjà bien connus par les études étrangères, sauf pour le jeune animal en croissance. Ces rendements sont plus élevés pour l'entretien que pour la lactation et pour la lactation que pour le dépôt de

Figure 1. Systèmes d'évaluation de la nutrition énergétique.



graisse, les différences s'accroissent quand la digestibilité des aliments diminue. La prise en compte des différences importantes entre k_l et k_f a conduit à une revalorisation importante de la valeur énergétique des fourrages pour la production laitière (cf plus loin).

La valeur énergétique d'un aliment varie donc non seulement avec ses caractéristiques et sa digestibilité, mais aussi pour les animaux en croissance et à l'engrais avec la nature et l'intensité de la production de l'animal. Il aurait donc été nécessaire de concevoir pour chaque aliment une valeur énergétique adaptée à chaque état physiologique de cet animal. On a toutefois pu couvrir correctement la quasi totalité de ces situations physiologiques en corrigeant les besoins des animaux en croissance et à l'engrais et en attribuant à chaque aliment seulement 2 valeurs UF : une pour la lactation (UFL), valable pour les femelles laitières et les animaux à l'entretien ou en croissance faible ou modérée car le rapport k_m/k_l est quasi constant, l'autre pour les animaux à croissance rapide, l'UFV (UF viande), intégrant à la fois les rendements d'utilisation de l'énergie métabolisable pour l'entretien et pour la croissance.

Les valeurs UF des aliments ont été légèrement modifiées en 1988 pour tenir compte des améliorations apportées dans l'estimation de l'énergie brute des aliments concentrés ainsi que dans le calcul de la digestibilité de l'énergie à partir de celle de la matière organique de ces aliments, grâce aux études effectuées à l'INRA de Theix entre 1978 et 1988.

L2 / Système d'évaluation de la nutrition azotée

Dans la plupart des pays, les apports alimentaires et les besoins des animaux en azote ont longtemps été exprimés en matières azotées digestibles (MAD), qui correspondent au bilan digestif apparent de l'ensemble des matériaux azotés.

Ce mode d'expression simple est ensuite devenu insuffisamment précis, notamment du fait de l'accroissement des performances animales, de la diversification des sources azotées et des objectifs d'efficacité alimentaire, de qualité des produits et de moindres rejets azotés. En effet, il souffre de plusieurs limites sérieuses puisqu'en particulier il ne considère pas :

- le rôle primordial des microbes du rumen (sur l'efficacité digestive globale, les remaniements protéiques et l'ingestion) dont il convient d'une part de savoir satisfaire les besoins azotés et énergétiques et d'autre part d'estimer les effets sur la fourniture de protéines à l'animal ;
- la part relative des différentes substances azotées absorbées : l'ammoniac dont l'utilité métabolique est nulle et les acides aminés qui, seuls, contribuent à satisfaire les besoins azotés de l'animal ;
- la composition en acides aminés (AA), dont certains peuvent être limitants.

Pour tenir compte de certains de ces inconvénients, des adaptations de détail avaient parfois été adoptées (équivalent-protéique,

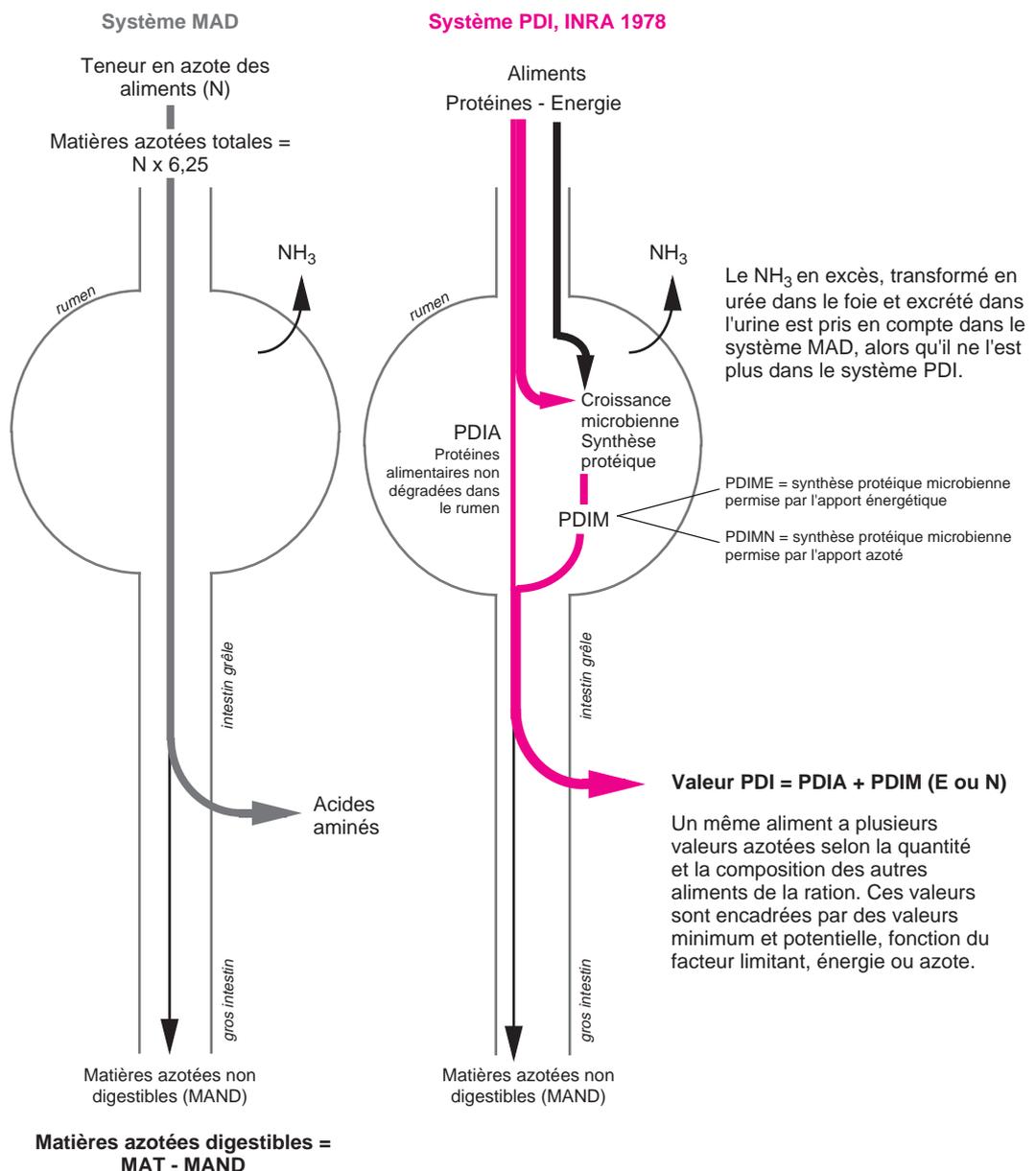
MAD corrigées, recommandations MAD différentes selon les régimes).

L'estimation des flux de protéines vraies absorbées dans l'intestin grêle représentait donc un objectif de progrès important. Ceci a été rendu possible avec les techniques de mesure des bilans intestinaux de protéines (fin des années 60), puis avec l'accumulation de données au niveau mondial permettant d'analyser et de quantifier les principaux facteurs de variation de l'activité de dégradation et de synthèse des microbes du rumen, et, enfin, avec le développement de méthodes permettant de caractériser la dégradabilité de l'azote des aliments de façon pertinente, mais simple (solubilité, méthodes *in vitro* ou *in situ*, méthodes enzymatiques...).

Il est ainsi devenu possible de prévoir correctement le flux d'acides aminés absorbés en considérant leur double origine (alimentaire non dégradé dans le rumen et microbienne).

L'INRA s'est attaché très tôt (1975) à développer un tel système d'évaluation de la nutrition azotée. Ce nouveau système, appelé système PDI (protéines digestibles dans l'intestin grêle), a été diffusé dès 1978 (Jarrige *et al* 1978). Il s'est avéré immédiatement fonctionnel et suffisamment précis et efficace pour la pratique (contrairement à quelques propositions étrangères contemporaines), sans doute parce qu'il provenait d'un travail commun à de nombreux chercheurs du Département Elevage et Nutrition des Animaux et de la mise en commun de toutes leurs données concernant aussi bien les aliments que les besoins et les réponses des animaux de toutes espèces. Il a été révisé en 1988 (Vérité *et al* 1987) pour intégrer quelques concepts nouveaux et tenir compte de très nombreuses données quantitatives nouvelles ce qui a permis une amélioration sensible, mais sans bouleversement majeur

Figure 2. Systèmes d'évaluation de la nutrition azotée.



(figure 2). Actuellement l'approche s'affine jusqu'au niveau du profil en acides aminés pour tenir compte du rôle limitant de certains d'entre eux. Depuis 1993, la lysine et la méthionine digestibles sont aussi prises en compte dans les besoins azotés des vaches laitières et la valeur des aliments.

Le système PDI est basé sur l'estimation conjointe des protéines alimentaires (PDIA) et microbiennes (PDIM) digérées dans l'intestin grêle dont la somme constitue la valeur PDI. Il attribue à chaque aliment 2 valeurs azotées potentielles selon que l'énergie (PDIE) ou l'azote (PDIN) disponibles dans le rumen est le facteur limitant de l'activité microbienne. Ainsi, selon le contexte nutritionnel, un aliment peut avoir une contribution différente à la valeur azotée de la ration.

L'évaluation des aliments démarre de la caractérisation d'une part de leurs aptitudes à fournir des nutriments aux microbes (énergie et azote disponibles dans le rumen) et d'autre part de l'aptitude de leurs protéines à être digérées spécifiquement dans l'intestin grêle (by-pass et digestibilité réelle). Par ailleurs, les besoins des animaux sont évalués à partir des caractéristiques de performances et de composition des produits et des rendements d'utilisation métabolique par fonction. Depuis la révision de 1988, la dégradabilité de l'azote est estimée par la méthode des sachets *in situ* dans le rumen et l'énergie disponible pour les microbes est appréciée par la quantité de matière organique fermentescible dans le rumen (MOF). L'imprécision attachée aux coefficients moyens est en partie atténuée par les bases de leur détermination originale : grand nombre de résultats expérimentaux provenant souvent de l'INRA et calculs liés et simultanés des différents paramètres.

Le système PDI a été adopté ou adapté par un certain nombre de pays européens et est en usage partiel dans certains autres. Par ailleurs, la structure de base du système PDI, certaines données (besoins, lois de réponse) ou certains concepts propres se retrouvent dans les systèmes proposés plus récemment (1985-1992) par d'autres pays (Pays-Bas, Danemark, par exemple). De même les propositions récentes concernant les acides aminés limitants suscitent beaucoup d'intérêt. Ceci est sans doute dû au pragmatisme de l'approche qui réalise un bon compromis entre les connaissances scientifiques et les besoins pratiques, à la richesse des données ayant servi à son élaboration pour une meilleure pertinence des valeurs, et à la diversité des outils mis à disposition (méthodes simplifiées d'évaluation telles que dégradabilité enzymatique, tables de valeurs de très nombreux aliments, logiciel INRAration, etc).

Néanmoins des progrès importants peuvent encore être faits. D'une part le système peut être amélioré tout en conservant sa structure actuelle par :

- un affinement de la prévision des flux de protéines microbiennes par une meilleure description de l'effet des conditions de milieu

du rumen sur l'efficacité d'utilisation de l'énergie par les microbes ;

- une meilleure connaissance des réponses à la fois des microbes et de l'organisme à des apports azotés limitants mettant en œuvre des mécanismes d'économie (recyclage, épargne métabolique) ;

- une extension de l'approche en terme d'AA limitants à tous les types de ruminants et de régimes.

D'autre part, il pourra bénéficier à l'avenir d'une approche plus mécaniste de la digestion dans le rumen avec des modèles plus complexes. D'ailleurs il convient de remarquer qu'il constitue actuellement l'étape la plus avancée dans la démarche actuelle qui vise à décrire l'alimentation non plus en terme de principes nutritifs globaux (énergie, protéines,...) mais en nutriments spécifiques (glucose, principaux AGV,...) pour mieux simuler les effets sur le fonctionnement des tissus et organes et sur la production qui en résulte.

13 / Le système de prédiction des quantités ingérées (UE)

Les ruminants consomment en général des rations dans lesquelles le fourrage occupe une place majoritaire. Cet aliment est le plus souvent offert à volonté car son coût est moindre que celui des aliments achetés dans le commerce. La qualité d'un rationnement va donc très largement dépendre de la précision avec laquelle sera estimée les quantités de fourrages ingérées.

De nombreux systèmes à l'étranger utilisent des équations très simples de prévision des quantités ingérées qui ne permettent pas de décrire avec précision les facteurs de variation de l'ingestion. Ils sont le plus souvent basés sur les performances observées de l'animal et prennent peu en compte la composition de la ration. Ce dernier aspect est pourtant particulièrement important lorsque la qualité et la nature de l'offre alimentaire varient de façon importante au cours de l'année ou suivant les régions géographiques.

Un système de prédiction des quantités ingérées ne doit pas se limiter à prédire les quantités ingérées des animaux bien alimentés ou recevant un régime très standard, car il ne servirait alors qu'à appliquer des recommandations alimentaires. Pour constituer un véritable outil de rationnement capable de faire face à la variété des systèmes d'élevage rencontrés en France, il est nécessaire de prédire avec une bonne précision l'ingestion de rations très diverses et d'en déduire les performances des animaux.

Le nouveau système de prévision des quantités ingérées élaboré par l'INRA en 1978 (Jarrige 1978, Demarquilly *et al* 1978) est celui des unités d'encombrement. Les caractéristiques d'ingestibilité des aliments sont décrites par une unité spéciale appelée « unité d'encombrement (UE) ». Cette UE est une fonction inverse de l'ingestibilité d'un aliment. En pratique, un aliment est d'autant

plus ingestible que son pouvoir rassasiant (physique ou métabolique) est faible et que l'animal éprouve de l'appétence pour celui-ci. Les animaux, eux, sont caractérisés par une capacité d'ingestion exprimée également en UE. Grâce à ce concept, les équations décrivant la capacité d'ingestion des animaux ne dépendent pas de la ration qu'ils consomment et les caractéristiques d'ingestibilité des fourrages n'ont pas besoin de prendre en compte les performances des animaux.

La valeur d'encombrement des fourrages a été déterminée par de très nombreuses mesures expérimentales sur moutons et bovins (C. Demarquilly et J.P. Dulphy). Ces mesures ont permis d'obtenir des équations de prédiction pour les grandes familles de fourrages. Ces équations sont tout d'abord calculées pour le fourrage vert. Si celui-ci a fait l'objet de conservation (foin, ensilage) des équations permettent de prédire les modifications de la valeur d'ingestibilité liées à ce mode de conservation (Dulphy *et al* 1987). Toutes ces équations de prédiction intègrent l'ensemble des mécanismes intervenant dans le déterminisme de l'ingestibilité car elles sont directement issues des mesures de quantités ingérées.

La valeur des aliments concentrés est très largement fonction du bilan énergétique de l'animal. Plus les besoins de l'animal sont couverts, plus la valeur UE de l'aliment concentré est importante car les phénomènes de rassasiement métabolique sont alors élevés. Si l'animal est dans une situation nutritionnelle déficitaire car il n'arrive pas à consommer des quantités suffisantes de fourrages, la valeur UE de l'aliment concentré n'est fonction que de son encombrement physique. Elle est alors très faible car les aliments concentrés se digèrent en général vite et transitent rapidement.

Les capacités d'ingestion des animaux ont été mesurées pour chaque espèce ou race de ruminants d'élevage et pour chaque type de production. Des équations de prédiction ont été établies à partir de nombreuses données expérimentales provenant des différentes installations expérimentales de l'INRA. Elles permettent de décrire aussi bien l'évolution de la capacité d'ingestion de femelles laitières au cours de leur lactation (Vaches laitières : Faverdin *et al* 1987, vaches allaitantes : Agabriel et Petit, 1987, brebis : Thériez *et al* 1987 et Bocquier *et al* 1987, chèvres : Morand-Fehr *et al* 1987) que celle des jeunes animaux pendant leur croissance (Geay *et al* 1987, Troccon 1987).

Le système des UE est additif, commun à tous les ruminants, et constitue un outil indispensable pour utiliser efficacement les systèmes énergétiques et azotés. L'automatisation de tous les calculs à l'aide d'un logiciel sur micro-ordinateur simplifie encore l'utilisation sur le terrain de ces systèmes. Ses nombreuses qualités font qu'il a été repris dans certains pays sous des formes assez voisines (Danemark, Pologne). Dans les autres pays, la prédiction des quantités ingérées

reste le point faible du rationnement, en particulier dès que la ration s'éloigne un peu de l'optimum nutritionnel.

A l'avenir, les modules de prévision de la capacité d'ingestion seront améliorés en vue de mieux décrire les variations inter-individuelles observées. Ceci est possible en particulier pour les vaches laitières en début de lactation grâce aux informations accumulées dans les bases de données des installations expérimentales de l'INRA. Les méthodes de prévision de l'ingestibilité pourraient également progresser en intégrant de nouvelles techniques de laboratoire plus efficaces (spectrométrie dans le proche infra rouge) sans remettre en cause les autres parties du système.

2 / Les besoins et les apports alimentaires recommandés

Les nouveaux systèmes d'expression des valeurs énergétique et azotée des aliments ont été, bien évidemment, accompagnés de nouveaux calculs des besoins des animaux et de nouvelles recommandations alimentaires. Ces besoins sont basés sur le même principe que ceux précédemment établis par le Pr A.M. Leroy, mais reposent sur des connaissances beaucoup plus précises des phénomènes de digestion, d'utilisation métabolique des nutriments et des quantités de protéines et de lipides corporels déposées dans les tissus ou exportées.

2.1 / L'énergie

Les besoins énergétiques des femelles laitières en gestation ou en lactation ont été calculés par la méthode factorielle en ajoutant les besoins correspondant à l'entretien, à la lactation, à la gestation et au gain de poids (constitution des réserves corporelles). En outre, pour les vaches laitières, l'influence du niveau d'alimentation sur la valeur énergétique nette des rations ainsi que les interactions digestives suivant la qualité des fourrages et le pourcentage de concentrés ont été prises en compte (Vermorel 1978, Vermorel *et al* 1987). La validité et la précision de ces besoins ont été vérifiées dans de nombreux essais d'alimentation avec divers types de régime sur des vaches produisant jusqu'à 45 kg de lait par jour.

La pratique du rationnement énergétique des bovins en croissance et à l'engrais a été aussi profondément modifiée. Jusqu'au début des années 60, elle ne prenait en effet en compte que le poids, l'âge et le gain de poids, quels que soient le sexe, la race et le mode de conduite antérieur des bovins.

Une première amélioration avait été apportée par l'établissement d'un tableau à double entrée précisant les besoins totaux selon le poids (de 50 en 50 kg) et le gain de poids (de 800 à 1 400 g/j) pour des taurillons et des bœufs (Béranger et Jarrige 1962). Il s'agissait

d'estimations fondées sur les premières observations des auteurs, sur la valeur calorifique du croît de bouvillons obtenue aux USA et sur les recommandations allemandes pour les taurillons.

Dix ans plus tard, grâce aux nombreuses données accumulées à l'INRA et dans les stations de contrôle des performances, on a pu relier les quantités d'énergie volontairement ingérées au poids et aux gains de poids des taurillons (Geay *et al* 1971, Jarrige *et al* 1971). Ces données montraient, pour la première fois, des différences importantes entre les races, ce qui a conduit l'INRA à entreprendre de nombreux travaux pour préciser les lois de variation de la croissance et de la composition du croît, les rendements d'utilisation de l'énergie métabolisable pour la croissance et l'engraissement et leurs lois de variation. Ces études ont associé des mesures en chambres respiratoires et des essais d'alimentation suivis d'abattage et d'analyses chimiques des carcasses. Elles ont permis d'élaborer des tables d'apports énergétiques recommandés (Geay *et al* 1978) qui distinguaient 11 types de bovins : mâles entiers, castrés et femelles selon leur poids, leur gain de poids, la précocité des animaux, le mode de conduite antérieur, l'âge... Ces tables ont été révisées et complétées en 1988 (Geay *et al* 1987) et couvrent maintenant une plus grande gamme de types d'animaux (17). Testées depuis durant plusieurs années par les Instituts Techniques et les Groupements de Producteurs, elles ont montré leur fiabilité et sont utilisées à l'étranger (Suisse et Italie).

2.2 / L'azote

Pour déterminer les besoins azotés, une approche basée sur les résultats d'essais d'alimentation et de bilans azotés a été préférée à l'approche factorielle et cela pour assurer une correspondance étroite entre l'évaluation de la valeur azotée des aliments et les besoins des animaux. En effet, contrairement à la valeur énergétique qui peut être mesurée avec précision en chambres respiratoires, la valeur PDI des aliments n'est qu'estimée. Les besoins en PDI pour l'entretien ont été estimés à partir des bilans azotés réalisés sur des animaux alimentés au voisinage de l'entretien. Ils prennent donc en compte les pertes d'azote fécal d'origine métabolique et les pertes d'azote imperceptibles (surface, croissance des poils et de la laine). Les valeurs d'efficacité d'utilisation des PDI pour la production résultent d'essais d'alimentation et prennent donc aussi en compte les pertes endogènes supplémentaires entraînées par l'alimentation normale des animaux en production.

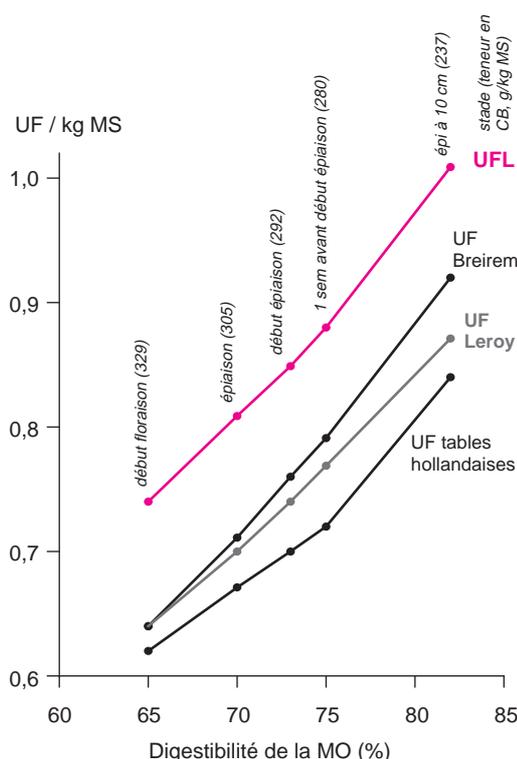
Les recommandations des apports en PDI sont égales aux besoins pour la majorité des catégories d'animaux. Elles sont cependant un peu inférieures pour les vaches allaitantes, les vaches laitières et les chèvres dans les premières semaines de lactation à cause de leur possibilité de mobiliser des protéines corporelles, mais en quantité très inférieure

aux lipides. Enfin elles tiennent compte aussi du fait que la ration doit fournir aux microbes du rumen suffisamment d'azote dégradable pour maximiser leur activité cellulolytique, condition nécessaire pour atteindre la digestibilité potentielle de la ration et des niveaux d'ingestion élevés. Dans l'avenir, il faudra tenir compte aussi de l'équilibre entre les acides aminés essentiels dans le mélange absorbé dans l'intestin grêle, équilibre qui est important pour les animaux à haut niveau de production. Par exemple, la méthionine et la lysine sont souvent limitants chez la vache laitière alimentée avec de l'ensilage de maïs, d'où le système LysDI et Met DI récemment proposé par Rulquin et Vérité (1993).

3 / Les nouvelles tables de la valeur des aliments

Au sortir de la deuxième guerre mondiale, les tables de la valeur nutritive des aliments étaient très incomplètes, notamment pour les fourrages, parce qu'établies à partir de peu de mesures de digestibilité, sur peu d'espèces végétales et surtout sur des espèces récoltées à des stades de végétation non précisés. Or on sait aujourd'hui l'importance du stade de végétation sur la valeur nutritive des four-

Figure 3. Valeur énergétique du ray-grass anglais au cours du 1^{er} cycle de végétation. Estimations soit à partir de la digestibilité de la matière organique mesurée in vivo et exprimée en UFL (INRA 1988), en UF Breirem (1954) et en UF Leroy, soit à partir de la teneur en cellulose brute observée aux différents stades de végétation en utilisant les équations de prédiction des tables hollandaises.



rages (figure 3). Que pouvaient en effet signifier les dénominations trouvées dans ces tables, telles que herbe de bonne qualité ou de moins bonne qualité et foin de pré (ou de luzerne) médiocre, ordinaire, bon et très bon. De plus, les UF Leroy sous-estimaient la valeur énergétique des fourrages par rapport à celle des concentrés (céréales, tourteaux...) notamment pour la production laitière. Enfin, ces tables ne donnaient aucune information sur la quantité de fourrage que peut ingérer l'animal, critère pourtant le plus important de la valeur alimentaire d'un fourrage.

Pour avoir une estimation plus précise de la valeur nutritive des fourrages on a eu ensuite recours à l'analyse chimique suivant la méthode de Weende (détermination des teneurs en cendres, matières azotées et cellulose brute) en utilisant les « Tables hollandaises » de prédiction (1958). L'estimation était très satisfaisante pour la teneur en matières azotées digestibles, mais très approximative pour la valeur énergétique. C'est ainsi que la table « graminées vertes », qui reposait sur une cinquantaine de mesures de digestibilité essentiellement effectuées sur l'herbe de la prairie naturelle des Pays-Bas, était utilisée pour prévoir la valeur énergétique de tous les fourrages verts de graminées produits en France, quels qu'en soient l'espèce et le numéro du cycle de végétation. Or on sait maintenant qu'il est nécessaire d'utiliser des équations spécifiques à chaque

espèce (figure 4) et même à chaque cycle de végétation.

C'est pour combler le manque de connaissances sur la digestibilité et l'ingestibilité des fourrages que l'INRA (C. Demarquilly et R. Jarrige) a entrepris dès 1963 l'étude systématique de ces paramètres et de la composition chimique des fourrages français. L'évolution de la valeur alimentaire sur pied de chaque espèce fourragère a été mesurée au cours des différents cycles de végétation ainsi que ses modifications sous l'action des processus de récolte et de conservation : fenaison, ensilage, déshydratation. Les résultats de ces études ont été publiés successivement dans :

- les tableaux de la valeur alimentaire des fourrages (Demarquilly et Weiss 1970) établis à partir de la mesure de la digestibilité de mille échantillons de fourrages verts et de deux cents fourrages conservés. Les valeurs énergétiques étaient exprimées en UF Breirem, UF engraissement proche des UF Tables Hollandaises, qui pénalisaient un peu moins les fourrages que l'UF Leroy par comparaison aux aliments concentrés. Les valeurs azotées étaient exprimées en matières azotées digestibles ;

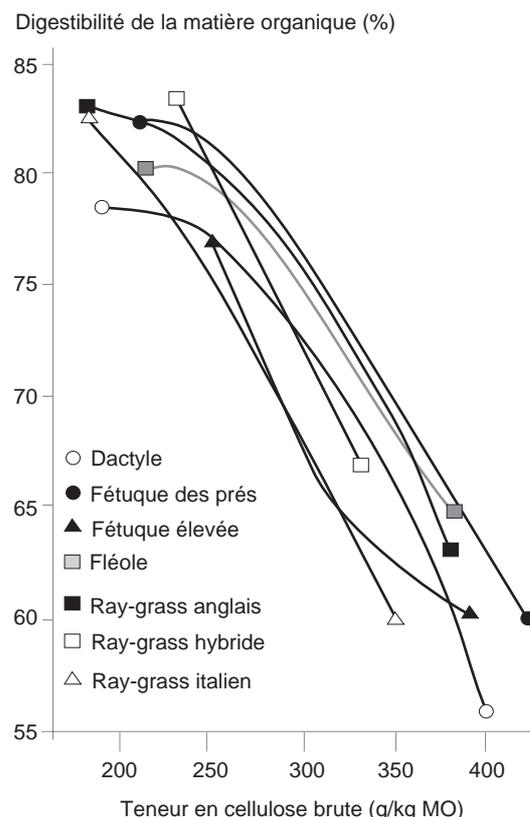
- les tableaux de la valeur nutritive des aliments (Demarquilly *et al* 1978b) établis sur un nombre encore plus élevé d'échantillons de fourrages (2 320 mesures de digestibilité). Pour les aliments concentrés, la composition chimique provenait du rassemblement par D. Sauvart de plusieurs milliers de résultats d'analyses réalisées en France, mais les digestibilités étaient empruntées aux principales tables étrangères en l'absence de mesures françaises. Les valeurs énergétiques et azotées étaient exprimées dans les nouvelles unités proposées par l'INRA, UFL et UFV pour l'énergie (Vermorel 1978) et PDIN et PDIE pour l'azote (Jarrige *et al* 1978) ;

- les tables de prévision de la valeur alimentaire des fourrages (Andrieu *et al* 1981), qui ont permis de prévoir à partir de l'analyse chimique de Weende, les valeurs énergétique et azotée ainsi que l'ingestibilité des fourrages verts et conservés dans les modes d'expression proposés par l'INRA en 1978. Adoptée de suite par le BIPEA (Bureau Interprofessionnel d'Etudes Analytiques), ces tables ont remplacé les tables hollandaises dans tous les laboratoires d'analyses français ainsi que dans les pays ayant adopté les nouvelles normes INRA ;

- les tables de la valeur nutritive des aliments (Andrieu *et al* 1988), pratiquement équivalentes pour les fourrages aux tableaux d'INRA 1978, qui ont permis de tenir compte des modifications apportées en 1988 aux calculs de la valeur PDI des aliments et de leur ingestibilité. En revanche elles contiennent beaucoup plus d'aliments concentrés et de sous-produits, dont les valeurs énergétiques, pour les principaux d'entre eux, ont été calculées à partir de mesures de digestibilité effectuées en France entre 1978 et 1987.

Tous ces tables et tableaux ont été établis à partir de mesures directes de composition

Figure 4. Liaisons entre la digestibilité de la matière organique et la teneur en cellulose brute pour les graminées au cours du 1^{er} cycle de végétation (Demarquilly et Jarrige 1981).



chimique, de digestibilité et de dégradabilité *in situ*. Parallèlement, des études de laboratoire se sont développées et ont permis de proposer des méthodes enzymatiques fiables de prévision de la valeur énergétique des aliments composés (Giger-Reverdin *et al* 1990) et des fourrages des prairies de mélange ou à flore complexe ne figurant pas dans les tables ou tableaux (Aufrère 1982, Aufrère et Demarquilly 1989) ainsi que la prédiction de la valeur azotée des aliments concentrés (Aufrère *et al* 1989). Bientôt, des méthodes de prévision de la valeur nutritive des aliments par spectrométrie dans le proche infra-rouge (NIRS), encore plus fiables et surtout plus rapides, devraient être proposées pour les fourrages (J. Andrieu *et al*, études en cours) et les aliments composés (Aufrère *et al* 1996).

Les premiers tableaux de 1970 mettaient en évidence l'importance du stade de végétation ou de l'âge des repousses sur la digestibilité et l'ingestibilité des fourrages français. Ils ont ainsi contribué au démarrage, avec la même méthodologie, d'études sur les fourrages et sous-produits méditerranéens (Espagne, Portugal et Afrique du Nord) et tropicaux (Cuba, Guadeloupe, Côte d'Ivoire et Sénégal) par des chercheurs ayant été formés à l'INRA de Theix. Ces travaux se sont traduits par la publication dans INRA 1989 des tables des fourrages et sous produits de la zone méditerranéenne (Tisserand et Alibes 1989) et des zones tropicales sèches (Richard *et al* 1989) et humides (Xandé *et al* 1989).

4 / Perspectives

La mise au point des systèmes INRA en 1978 et leur amendement en 1988 ont apporté une amélioration considérable dans le calcul de rations adaptées aux besoins et à la capacité d'ingestion des ruminants. Les études expérimentales réalisées sur des animaux très productifs montrent toutefois que l'amélioration des systèmes est encore nécessaire. La progression des connaissances sur le

métabolisme intermédiaire des ruminants laisse penser que cette amélioration est possible. Ainsi, récemment, un système d'évaluation des quantités de lysine et de méthionine absorbées au niveau intestinal et l'estimation des besoins des vaches laitières a été développé (Rulquin et Vérité 1993). Son application permet, dans le cadre du système PDI, d'augmenter la production de protéines et le taux protéique du lait des vaches fortes productrices recevant en particulier des régimes à base d'ensilage de maïs.

Cet exemple montre bien qu'il est nécessaire de faire évoluer les systèmes énergétique et azoté vers une quantification des principaux produits de la digestion. En effet, les quantités absorbées et leurs proportions respectives déterminent les réponses hormonales de l'organisme, influent sur les voies métaboliques et par suite sur la protéinogénèse, la lipogénèse et l'efficacité d'utilisation des aliments, pour l'énergie notamment. Elles peuvent de ce fait modifier non seulement l'efficacité d'utilisation de l'énergie donc la valeur énergétique nette des aliments, mais aussi l'orientation des productions vers la sécrétion de lactose, de protéines et de lipides chez les animaux producteurs de lait ou le dépôt des protéines et de lipides dans les tissus corporels chez les animaux producteurs de viande. Cela devrait permettre aussi de réduire en partie les rejets azotés, voire de gaz (méthane). Parallèlement il est nécessaire d'avoir une meilleure connaissance du métabolisme des organes splanchniques (tube digestif, foie...) qui contribuent pour 30 à 50 % aux dépenses totales de l'animal et sont en compétition avec les organes ou les tissus effecteurs (glande mammaire, muscle...). Des recherches de longue haleine et exigeantes en moyens sont en cours dans plusieurs laboratoires du Département sur la digestion, l'absorption et la régulation du métabolisme pour répondre à ces questions et essayer, par là, d'améliorer l'efficacité des productions et la qualité des produits, tout en réduisant la pollution.

Références bibliographiques

Agabriel J., Petit M., 1987. Recommandations alimentaires pour les vaches allaitantes. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 153-166.

Andrieu J., Demarquilly C., Wégat-Litré E., 1981. Tables de prévision de la valeur alimentaire des fourrages. In : C. Demarquilly (ed), Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants, 343-591. INRA Paris.

Andrieu J., Demarquilly C., Sauviant D., 1988. Tables de la valeur nutritive des aliments. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des bovins, ovins et caprins, 341-443. INRA Paris.

Aufrère J., 1982. Etude de la prévision de la digestibilité des fourrages par une méthode enzymatique. Ann. Zootech., 31, 111-130.

Aufrère J., Demarquilly C., 1989. Predicting organic matter digestibility of forage by two pepsin-cellulase methods. XVIth Int. Grassl. Congr. Nice, France, vol. 2, 877-878.

Aufrère J., Graviou D., Demarquilly C., Vérité R., Michalet-Doreau B., Chapoutot P., 1989. Aliments concentrés pour ruminants : prévision de la valeur azotée PDI à partir d'une méthode enzymatique standardisée. INRA Prod. Anim., 2, 249-254.

Aufrère J., Graviou D., Demarquilly C., Perez J.M., Andrieu J., 1996. Near infrared reflectance spectroscopy to predict energy value of compound feeds for swine and ruminants. Anim. Feed Sci. Technol., sous presse.

- Béranger C., Jarrige R., 1962. Production intensive de viande par les jeunes bovins. Bull. Tech. Inf. Ing. Services Agricoles n° 174.
- Bocquier F., Thériez M., Brelurut A., 1987. Recommandations alimentaires pour les brebis en lactation. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 199-211.
- Bulletin Technique du CRZV de Theix n° 70, INRA, 1987. Alimentation des ruminants : révision des systèmes et tables de l'INRA. 222 p.
- Demarquilly C., Jarrige R., 1981. Panorama des méthodes de prévision de la digestibilité et de la valeur énergétique des fourrages. In : C. Demarquilly (ed), Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants, 41-59. INRA Paris.
- Demarquilly C., Weiss P., 1970. Tableaux de la valeur alimentaire des fourrages. INRA SEI étude n° 42. INRA Versailles.
- Demarquilly C., Andrieu J., Sauvant D., 1978a. Composition et valeur nutritive des aliments. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des ruminants, chapitre 16, 469-518. INRA Paris.
- Demarquilly C., Andrieu J., Sauvant D., 1978b. Tableaux de la valeur nutritive des aliments. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des ruminants, chapitre 17, 519-584. INRA Paris.
- Dulphy J.P., Faverdin P., Micol D., Bocquier F., 1987. Révision du système des Unités d'Encombrement (UE). Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 35-48.
- Faverdin P., Hoden A., Coulon J.B., 1987. Recommandations alimentaires pour les vaches laitières. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 133-152.
- Geay Y., Béranger C., Jarrige R., 1971. Variations de la quantité d'énergie ingérée par des taurillons à l'engrais. X^e congrès International de Zootechnie, thème VII. Paris.
- Geay Y., Robelin J., Béranger C., Micol D., 1978. Besoins des bovins en croissance et à l'engrais. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des ruminants, chapitre 11, 297-343. INRA Paris.
- Geay Y., Micol D., Robelin J., Berge P., Malterre C., 1987. Recommandations alimentaires pour les bovins en croissance et à l'engrais. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 173-183.
- Giger-Reverdin S., Aufrère J., Sauvant D., Demarquilly C., Vermorel M., Pochet S., 1990. Prévision de la valeur énergétique des aliments composés pour ruminants. INRA Prod. Anim., 3, 181-188.
- INRA, 1978. Alimentation des ruminants. INRA Paris, 597 p.
- INRA, 1981. Prévision de la valeur nutritive des aliments des ruminants. INRA Paris, 471 p.
- INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins et caprins. INRA Paris, 471 p.
- INRA, 1989. Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. INRA and John Libbey Eurotext, Paris, Londres, 389 p.
- Jarrige R., 1978. Consommation d'aliments et d'eau. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des ruminants, chapitre 16, 177-206.
- Jarrige R., Béranger C., Geay Y., Grenet N., Malterre C., Robelin J., 1971. La production de viande par les jeunes bovins. INRA SEI étude n° 46, 167-184. INRA Versailles.
- Jarrige R., Journet M., Vérité R., 1978. Azote. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des ruminants, chapitre 3, 89-128. INRA Paris.
- Morand-Fehr P., Sauvant D., Brun-Bellut J., 1987. Recommandations alimentaires pour les caprins. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 213-222.
- Richard D., Guérin H., Fall S.T., 1989. Feeds of the dry tropics (Senegal). In : R. Jarrige (ed), Ruminant nutrition - Recommended allowances and feed tables, 325-345. INRA and John Libbey Eurotext, Paris, Londres.
- Rulquin H., Vérité R., 1993. Amino acid nutrition of dairy cows : productive effects and animal requirements. In : PC Garnsworthy and DJA Cole (eds), Recent advances in animal nutrition, 55-77. Nottingham University Press.
- Thériez M., Bocquier F., Brelurut A., 1987. Recommandations alimentaires pour les brebis à l'entretien et en gestation. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 185-197.
- Tisserand J.L., Alibes X., 1989. Feeds of the Mediterranean area. In : R. Jarrige (ed), Ruminant nutrition - Recommended allowances and feed tables, 305-323. INRA and John Libbey Eurotext, Paris, Londres.
- Troccon J.L., 1987. Recommandations alimentaires pour les veaux et génisses d'élevage. Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 167-172.
- Vérité R., Michalet Doreau B., Chapoutot P., Peyraud J.L., Poncet C., 1987. Révision du système des protéines digestibles dans l'intestin (PDI). Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 19-34.
- Vermorel M., 1978. Energie. In : R. Jarrige (ed), Alimentation des ruminants, chapitre 2, 47-88. INRA Paris.
- Vermorel M., Coulon J.B., Journet M., 1987. Révision du système des unités fourragères (UF). Bull. Tech. CRZV Theix, INRA, 70, 9-18.
- Xandé A., Garcia-Trujillo R., Caceres O., 1989. Feeds of the humid tropics (West Indies). In : R. Jarrige (ed), Ruminant nutrition - Recommended allowances and feed tables, 347-363. INRA and John Libbey Eurotext, Paris, Londres.