

LA DIGESTIBILITÉ ILÉALE RÉELLE DES ACIDES AMINÉS CHEZ LE PORC MÉTHODES D'ESTIMATION ET INTÉRÊT PRATIQUE

P. LETERME, A. THÉWIS

Faculté des Sciences Agronomiques, UER de Zootechnie
2, passage des Déportés, B-5030 Gembloux - Belgique

La mesure de la digestibilité iléale réelle des acides aminés alimentaires chez le porc nécessite une distinction entre le flux d'acides aminés alimentaires non digérés qui atteignent la fin de l'intestin grêle et celui des acides aminés endogènes provenant des sécrétions digestives non réabsorbées. Cet article passe en revue les méthodes de mesure directes et indirectes disponibles pour y parvenir: le régime protéoprive (classique ou amélioré), la méthode par régression, la méthode à l'homoarginine, la dilution isotopique avec marquage des animaux ou des aliments et les méthodes *in vitro*. Il aborde ensuite les principaux cas où la connaissance de cette digestibilité réelle s'avère intéressante (matières premières pauvres en protéines, riches en substances antinutritionnelles, etc). Une discussion est ensuite menée sur l'intérêt d'utiliser les teneurs en acides aminés réellement digestibles d'un aliment lors de la formulation d'un régime pour porc, sur l'utilité de prendre en compte les pertes endogènes générées par les constituants du régime et sur la validité de la digestibilité réelle comme prédicteur de la disponibilité d'un acide aminé pour le porc.

The true ileal digestibility of amino acids in pigs : methods of estimation and practical interest.

The estimation of the true ileal digestibility of dietary amino acids in pigs requires the distinction between the flow of undigested dietary amino acids reaching the end of the small intestine and the flow of endogenous amino acids coming from the digestive secretions that are not reabsorbed. This article reviews the direct and indirect methods available: N-free diet (classic or improved), the regression method, the homoarginin method, the isotope dilution technique using labelled animals or labelled dietary proteins and the *in vitro* methods. The cases where the knowledge of the true digestibility seems to be interesting are then studied (feedstuffs poor in proteins, rich in antinutritional factors, etc). Thereafter, different subjects are brought up for discussion: the practical use of true digestibility values, the necessity of taking the endogenous losses into account and the validity of the true digestibility as a predictor of the availability of an amino acid for the pig.

INTRODUCTION

La qualité d'une protéine destinée à l'alimentation porcine se juge à son profil en acides aminés (AA) et à sa digestibilité. Depuis les travaux de ZEBROWSKA (1973), nous savons qu'une valeur de digestibilité des protéines -et donc des AA- mesurée au niveau fécal ne signifie pas grand chose. Le gros intestin est incapable d'absorber les AA et il héberge une microflore abondante qui, par ses fermentations, modifie le profil et la quantité des AA venant de l'intestin grêle. L'utilisation de canules permet néanmoins l'accès à la fin de l'intestin grêle (iléon) pour y mesurer la digestibilité dite *iléale* des AA.

Cependant, les digesta collectés à ce niveau de l'intestin ne contiennent pas que des AA alimentaires non digérés. Une proportion très importante d'AA endogènes provenant des sécrétions digestives est également présente. La digestibilité des AA mesurée à ce niveau n'est donc qu'*apparente*. Grâce à la technique de dilution isotopique à l' ^{15}N , nous savons que cette fraction endogène peut représenter plus de la moitié de l'azote total (GEBHARDT et al, 1977 ; DE LANGE et al, 1990). Le flux d'AA endogènes à l'iléon est très variable et dépend de facteurs tels que le niveau d'ingestion ou la composition de l'aliment (fibre et facteurs antinutritionnels). Si la fraction endogène est déduite des matières azotées collectées à l'iléon des porcs, il est possible d'estimer la digestibilité *iléale réelle* des AA alimentaires.

La mesure de ce paramètre est cependant difficile. D'autre part, on peut légitimement se demander si l'intérêt est à la mesure des moyens déployés. La différence entre digestibilités apparente et réelle est-elle importante ? Ne faut-il pas prendre en compte les pertes endogènes en AA ? Existe-t-il un moyen simple d'estimer correctement cette digestibilité réelle et/ou les flux d'AA endogènes ?

Cette synthèse est proposée pour tenter de répondre à ces questions sur la base des données actuellement disponibles dans la littérature. Après avoir rappelé les principales sources d'azote endogène dans le tube digestif du porc, nous passerons en revue les différentes techniques existantes pour distinguer les AA alimentaires des AA endogènes à l'iléon. Nous étudierons ensuite les cas où cette distinction paraît nécessaire et verrons comment en tenir compte en pratique.

1. SOURCES D'AZOTE ENDOGÈNE

De 22 à 29 g d'azote endogène (135 à 180 g de protéines brutes) sont déversés quotidiennement dans l'intestin grêle d'un porc de 50 kg (SOUFFRANT, 1991). Ces protéines proviennent de la salive, des sécrétions stomacales, du suc pancréatique, de la bile, des enzymes intestinales, du mucus, des cellules desquamées et de l'urée plasmatique excrétée. La quantité est fonction du niveau et de la composition du régime ingéré. Les trois quarts environ sont réabsorbés avant d'atteindre l'iléon (SOUFFRANT et al, 1986 ; 1993) mais ce coefficient diffère selon les sécrétions et la composition du régime. Les inhibiteurs protéolytiques, par exemple, forment un complexe indigestible avec les protéases pancréatiques qui empêche leur réabsorption et provoque une hypersécrétion pancréatique. Les fibres aussi peuvent augmenter les flux endogènes (effet abrasif sur la paroi, production accrue de mucus), soit entraver la réabsorption des matières endogènes lorsqu'elles sont sous forme soluble.

Une partie des pertes iléales endogènes est inéluctable et provient de la desquamation naturelle des cellules épithéliales et de l'hydrolyse des enzymes digestives. L'autre partie est variable et *spécifique* de la matière première étudiée. Elle implique surtout les mucines, les cellules desquamées et les enzymes pancréatiques. La microflore joue un rôle déterminant dans la dégradation de ces matières endogènes et dans le recyclage de l'urée en protéines microbiennes. L'importance de cette microflore dans l'intestin grêle, longtemps négligée, est de plus en plus étudiée. L'azote microbien représenterait de 25 à 50 % de l'azote total des digesta iléaux (DIERICK et al, 1983 ; SCHULZE et al, 1994). L'effet exact des micro-organismes sur la digestibilité des protéines alimentaires ou la réabsorption des sécrétions digestives demeure obscur. Selon LIEN et al (1994), les bactéries incorporent indifféremment les AA alimentaires et endogènes dans la même proportion que celle rencontrée dans les digesta. On ignore toutefois si cette flore remanie les AA.

2. TECHNIQUES DE MESURE

2.1. Le régime protéoprive

2.1.1. Méthode classique

Le moyen le plus simple d'estimer les flux iléaux endogènes consiste à mesurer les flux d'AA chez des porcs recevant un régime sans protéines (protéoprive). La quantité de chaque AA endogène atteignant ce niveau est alors déduite des digesta collectés dans l'essai protéique, ce qui permet de calculer la digestibilité réelle des AA alimentaires. Cette manière de procéder est donc indirecte.

Le régime protéoprive se compose de différentes sources d'hydrates de carbone (amidon de maïs, sucre, fibres), d'huile et d'un complexe minéral-vitaminé. Les fibres servent de lest et sont supposées exercer un effet sur les sécrétions digestives. Le taux de fibres dans le régime et le niveau d'ingestion des porcs sont généralement identiques à ceux utilisés pour l'essai de digestibilité des matières protéiques. Les flux sont exprimés par unité de matière sèche ingérée et les données obtenues sont utilisées pour corriger les digestibilités apparentes de toutes les matières premières. C'est la correction de *digestibilité vraie*, opposée à la *digestibilité réelle*. Cette dernière nécessite la mesure de l'excrétion endogène par des techniques plus spécifiques prenant en compte fidèlement la composition de l'aliment et notamment les facteurs susceptibles d'influencer les sécrétions.

Malgré un schéma expérimental simple, les protocoles varient d'un laboratoire à l'autre (tableau 1) et offrent des valeurs de flux allant du simple au triple (5.2 à 18.7 g d'AA/kg MSI). De tels écarts s'expliquent par la multitude de combinaisons possibles entre les différents paramètres qui entrent en jeu et influencent les flux endogènes. Une harmonisation des conditions d'utilisation est requise pour atténuer cette variabilité. Les principaux paramètres qui interviennent dans l'application de la méthode sont les suivants :

1. Le laps de temps qui sépare le début du traitement protéoprive de la période de collecte varie de 2 à 9 jours selon les auteurs. Entre ces deux extrêmes, une adaptation de l'organisme est possible car les flux de proline et de glycine sont toujours élevés (3.6 à 7.8 g AA/kg MSI) lorsque le temps d'attente est long (SAUER et al, 1977 ;

Tableau 1 - Détail des protocoles utilisés pour le régime protéoprive par différents laboratoires.

Source	Type de canule	Poids des porcs (kg)	Niveau d'ingestion (kg/l)	Type de fibre	Taux de fibre (%)	Taux amidon/sucre (%)	Temps avt collecte (j)	Temps de collecte (h)
(1)	Rééminente	45-65	1,3-1,7	Alphafloc (*)	5 à 15	63/17-27	6	24
(2)	Rééminente	90	1,4	Solkafloc (*)	0-5	87-97/0	3-5-7	3 x 12
(3)	Anastomose	20-25	1,0	Cell. bois	6-9	45/44	4	48
(4)	T-canule	35-45	1,8	Alphafloc (*)	5	57/30	9	24
(5)	T-canule	55	1,4	Alphafloc (*)	3	80/10	7	24
(6)	T-canule	60	1,6	Alphafloc (*)	3-10	70-80/10	10	2 x 24
(7)	Anastomose	35	1,2	Cell. papier	4	83/5	4	3 x 12
(8)	T-canule	45-90	0,8 à 1,6	Cell. bois	3 à 15	69-83/10	2	3 x 2
(9)	Anastomose	65	1,4	Cell. papier	3 à 12	75-87/6	2	3 x 12

Sources : (1) SAUER et al (1977) - (2) TAVERNER et al (1981) - (3) GREEN et al (1987)

(4) ADEOLA et al (1986) - (5) DE LANGE et al (1989a) - (6) DE LANGE et al (1989b)

(7) MARISCAL-LANDIN et al (1990) - (8) FURUYA et KAJI (1992) - (9) LETERME et al (1992)

(*) Alphafloc et Solkafloc sont des marques commerciales de cellulose de bois

ADEOLA et al, 1986; DE LANGE et al, 1989a) et modérés (0.4 à 0.8 g AA/kg MSi) dans le cas contraire (GREEN et al, 1987; LETERME et al, 1992). Ceci prend toute son importance lorsque les flux endogènes sont estimés sur base de l'azote total. En effet, selon les auteurs mentionnés, le flux de proline représente de 6 à 46 % de celui des AA totaux! Le métabolisme particulier de cet AA en état protéoprive peut donc altérer les mesures d'AA endogènes à l'iléon.

2. Les fibres incorporées dans les régimes protéoprives sont supposées imiter l'effet des fibres alimentaires sur les pertes endogènes. Cependant, la source de fibres utilisée est toujours la cellulose de bois dont l'effet sur les pertes endogènes est pratiquement nul (LETERME et al, 1992). Il semble illusoire de vouloir respecter le même taux de fibres que celui de l'aliment protéique étudié. L'erreur sera d'autant plus importante que la matière première étudiée sera riche en fibres. Il est délicat d'isoler les fibres de l'aliment protéique car leurs propriétés sont modifiées au cours du traitement (LETERME et al, 1994a). Le choix de la méthode d'analyse est aussi important pour fixer le niveau de fibres du régime. Le fractionnement de Van Soest, par exemple, ne convient pas pour les Légumineuses.

3. Par commodité pour l'utilisation des résultats lors des corrections, les flux endogènes sont rapportés à la matière sèche ingérée. Ce mode d'expression est une source importante d'erreur lorsqu'elle ne prend pas en compte le poids de l'animal. Selon FURUYA et KAJI (1992), les pertes quotidiennes sont invariables, quel que soit le niveau d'ingestion alors qu'elles varient en fonction du poids corporel. En fait, ceci est surtout valable pour des niveaux d'ingestion limités. Lorsqu'ils sont élevés, les flux endogènes sont bien corrélés au niveau d'ingestion. Il est, de toute façon, préférable de mesurer les flux endogènes sur des animaux de même poids et ayant le même niveau d'ingestion que ceux recevant l'aliment protéique.

Quoi qu'il en soit, la privation de protéines alimentaires altère la synthèse des sécrétions digestives. En effet, les sécrétions digestives sont stimulées par la présence des constituants qu'elles doivent digérer (LAPLACE et al, 1986) et les besoins

du tube digestif en AA sont énormes: le seul remplacement des cellules desquamées représente 10 % des synthèses protéiques totales de l'organisme (ALPERS et KINZIE, 1973). Les pertes iléales endogènes sont d'ailleurs corrélées positivement au niveau d'ingestion protéique (KRAWIELITZKI et al, 1977; BUTTS et al, 1993). Cela revient donc à dire que le régime protéoprive sous-estime le niveau des pertes endogènes. Pour remédier à cet inconvénient, une méthode simple a été proposée.

2.1.2. Méthode améliorée

Afin de mesurer les flux endogènes en conditions normales d'alimentation protéique, des chercheurs néo-zélandais proposent de compléter le régime protéoprive par une protéine totalement digestible (MOUGHAN et SCHUTTERT, 1991; BUTTS et al, 1991, 1992a). L'organisme est nourri normalement mais les AA collectés à l'iléon proviennent uniquement de sécrétions digestives. La caséine a été choisie pour sa digestibilité très élevée et son profil équilibré en AA.

L'approche est séduisante mais n'est applicable que si la digestion de la protéine est totale. Or, cela ne semble pas être le cas de la caséine. Conscients du problème, MOUGHAN et BUTTS proposent l'utilisation de caséine préalablement hydrolysée par voie enzymatique, composée exclusivement d'AA libres, de di- et tripeptides. L'hydrolysate n'est pas totalement digestible mais l'azote non digéré se trouve sous forme d'AA libres ou d'oligopeptides dans les digesta. Les molécules peuvent être écartées des digesta collectés par tamisage moléculaire (*cut-off*: 10 kDa), pour autant que la fraction endogène n'en contienne que des quantités négligeables. Les chercheurs néo-zélandais tiennent ces petites molécules des matières endogènes pour négligeables mais elles représentent quand même plus de 10 % de l'azote total. De notre côté, à l'aide de tamis moléculaires ou de la filtration sur gel, nous avons obtenu des valeurs allant de 20 à 27 % des AA totaux (LETERME et al, 1994b).

BUTTS et al (1992b) évoquent des problèmes méthodologiques pour expliquer l'importance de ces petites molécules dans la fraction endogène. Nous pensons plutôt que le *cut-off*

du tamis utilisé (10 kDa) était inadapté car le poids moléculaire des tripeptides n'excède pas 600 Da. L'utilisation de filtres retenant des grands peptides (jusqu'à 10 kDa) semble inapproprié. Des plus petits filtres, disponibles sur le marché, conviendraient mieux. D'autre part, le niveau d'incorporation de caséine (10 %) pourrait probablement être revu à la baisse. La proposition de MOUGHAN et BUTTS est donc surtout liée aux possibilités techniques existantes. L'affirmation selon laquelle les sécrétions endogènes contiennent peu de petits peptides et d'AA libres exige des preuves plus tangibles. Il faudrait trouver une source d'AA totalement digestibles, ce qui réglerait le problème. Néanmoins, un mélange d'AA libres ne convient pas car ces derniers n'ont aucun effet sur le niveau des sécrétions digestives (BUTTS et al, 1993). D'autre part, les hydrolysats de caséine contiennent pratiquement 60 % d'AA libres. Une source d'AA constituée uniquement de petits peptides serait préférable. Quoiqu'il en soit, cette amélioration est certainement très appréciable pour qui utilise le régime protéoprive comme méthode d'estimation des flux endogènes à l'iléon des porcs.

2.2. Méthode par régression

La méthode par régression consiste à mesurer le flux d'AA à l'iléon de porcs recevant des régimes à teneurs décroissantes en protéines et à extrapoler le flux pour un ingéré nul en protéines. Cette valeur correspond à l'excrétion endogène des porcs. L'extrapolation peut se faire pour chaque AA. Pour atteindre une précision suffisante, il est nécessaire d'utiliser au moins 3 niveaux de protéines.

Dans la littérature, les taux de protéines utilisés varient de 6 à 25 % répartis en 3 ou 4 niveaux, soit un taux d'incorporation de la matière première de 19 à 97 %. Les protocoles suivis, par contre, divergent d'un auteur à l'autre: certains utilisent des protéines purifiées, d'autres des matières premières complètes. Ceci se répercute sur la composition du régime, notamment sur le taux de fibres. Plusieurs laboratoires incluent un régime protéoprive dans leur droite de régression et les porcs sont souvent utilisés au cours de plusieurs périodes successives (LEIBHOLZ, 1982 ; FURUYA et al, 1986 ; MARISCAL-LANDIN et al, 1990).

Par rapport au régime protéoprive, la méthode par régression présente l'avantage de travailler en conditions physiologiques normales. En théorie, elle devrait aussi tenir compte de l'effet des constituants d'une matière première qui exercent une influence sur les sécrétions endogènes. Les flux mesurés correspondent donc chaque fois à une matière première déterminée. Malheureusement, elle souffre de plusieurs inconvénients:

1. elle exige des protocoles lourds et coûteux en porcs et en main d'oeuvre ;
2. elle postule que l'effet spécifique des constituants alimentaires sur les sécrétions demeure constant, quel que soit le taux d'incorporation de la matière première dans le régime, ce qui est incorrect. L'augmentation du taux d'incorporation d'une matière protéique dans un régime augmente proportionnellement les pertes iléales ou fécales endogènes (KRAWIELITZKI et al, 1977 ; BUTTS et al, 1993). L'extrapolation à une ingestion nulle en N est donc peu caractéristique d'une matière première ;
3. elle est inadaptée pour l'étude des protéines hautement

digestibles et le niveau de précision dépend du nombre de niveaux protéiques utilisés. Cependant, des teneurs élevées en protéines sont parfois impossibles à atteindre en raison de la composition des aliments étudiés (céréales : 9 à 12 % de protéines). Des niveaux trop élevés doivent aussi être évités pour ne pas perturber le métabolisme. À l'opposé, une teneur trop faible rejoint les problèmes du régime protéoprive.

La méthode par régression n'apporte pas d'avantages par rapport au régime protéoprive puisqu'elle estime les flux endogènes pour une ingestion nulle en azote. Par contre, elle est plus lourde à mettre en oeuvre. Elle est de plus en plus délaissée.

2.3. La méthode à l'homoarginine

La protéine alimentaire étudiée est traitée chimiquement pour transformer les monomères de lysine en homoarginine (HA) : c'est la *guanidination*. L'HA est absorbée de la même manière que la lysine par la paroi intestinale mais ne participe pas au métabolisme. De ce fait, elle n'apparaît pas dans les sécrétions digestives et toute l'HA retrouvée à l'iléon est d'origine alimentaire alors que la lysine n'est que d'origine endogène. Il est possible d'en déduire la digestibilité iléale réelle de la lysine alimentaire et le flux de lysine endogène à l'iléon.

Si l'absorption de l'HA par l'intestin et son absence dans les sécrétions ont été vérifiées, on ignore dans quelle mesure l'absence de lysine perturbe le métabolisme. De plus, l'HA interfère sur le cycle de l'urée, ce qui augmente le taux d'ammoniac dans le sang et peut intoxiquer l'animal. Le temps de mesure doit donc être limité. La guanidination complète de la protéine exige le respect de conditions très strictes de pH et de température mais aussi l'accès à tous les monomères de lysine. Ceci n'est possible qu'avec des protéines isolées et n'ayant pas subi de traitement thermique. C'est pourquoi elle n'est utilisée que pour des protéines destinées à la nutrition humaine. La présence de sels toxiques après transformation exige la dialyse des protéines traitées. Enfin, le produit obtenu a très mauvais goût et de nombreux chercheurs ont abandonné l'idée d'utiliser cette technique pour cette simple raison (HAGEMEISTER et ERBESDOBLER, 1985 ; MOUGHAN et RUTHERFURD, 1990 ; SCHMITZ et al, 1991).

En conclusion, la technique des protéines isolées à l'HA ne permet que la mesure de la digestibilité réelle d'isolats protéiques non chauffés et du flux de lysine endogène dans les intestins.

2.4. La technique de dilution isotopique

La technique de dilution isotopique fait appel à un isotope stable (non radioactif) de l'azote: l'azote-15 (^{15}N). Il existe à l'état naturel (0.3663 % de l'azote total de la biosphère) et est facilement dosé par spectrométrie de masse ou d'émission. Les chercheurs en nutrition font appel à ^{15}N pour distinguer les fractions d'azote endogène et alimentaire présentes dans les intestins. Le principe consiste à enrichir l'une des deux fractions en ^{15}N et à mesurer sa dilution par la fraction non marquée dans les digesta collectés à l'iléon. Connaissant l'enrichissement initial en ^{15}N des constituants marqués, il est possible de calculer leur dilution dans la lumière intestinale et d'en déduire la quantité de chaque source d'azote. Sur base de ce principe, différentes voies peuvent être suivies pour

distinguer les deux sources d'AA à l'iléon.

2.4.1. Marquage des sécrétions endogènes protéiques

Les sécrétions endogènes protéiques sont enrichies en ^{15}N par perfusion intraveineuse d'un AA marqué capable de transaminer dans la circulation sanguine des porcs. L'AA est incorporé dans toutes les protéines de l'organisme, y compris celles des sécrétions digestives qui sont déversées dans la lumière intestinale. La dilution de l' ^{15}N dans l'azote alimentaire par rapport à l'enrichissement initial du pool précurseur des sécrétions endogènes (en général les AA libres du sang) permet de déduire le flux d'azote endogène. Afin de disposer de valeurs pour chaque AA, il faut recourir au régime protéoprive qui fournit le profil qualitatif des pertes endogènes. La conjugaison de ce dernier et du flux d'azote endogène permet d'estimer le flux de chaque AA à l'iléon.

La technique est récente et différents paramètres doivent faire l'objet de vérifications avant que sa validité ne puisse être confirmée. Les principaux paramètres litigieux sont les suivants:

1. La technique est basée sur un AA et il n'est pas établi que son métabolisme reflète celui des autres AA. La glycine, par exemple, ne convient pas car l'enrichissement en ^{15}N des digesta est plus élevé que celui trouvé dans la fraction des AA libres du sang (SOUFFRANT et al, 1981). La leucine est le seul AA utilisé car il est peu désaminé dans le foie et échange facilement son radical $-\text{NH}_2$ avec d'autres AA (processus de transamination), ce qui communique le marquage en ^{15}N à d'autres AA. La perfusion d'une solution complète d'AA marqués n'est pas financièrement envisageable.
2. La ^{15}N -leucine perfusée fait partie du pool d'AA libres du sang. La méthode se base sur l'hypothèse selon laquelle les sécrétions azotées sont synthétisées uniquement à partir de cette source d'AA et présentent le même enrichissement que le pool sanguin. En fait, la paroi intestinale et les glandes annexes prélèvent leurs matériaux de synthèse à la fois dans le sang et la lumière intestinale mais à des degrés divers. Le pancréas et les cellules produisant le mucus, par exemple, se fournissent surtout dans le pool sanguin tandis que les cellules au sommet des villosités intestinales marquent leur préférence pour les AA alimentaires (ALPERS, 1972 ; SIMON et al, 1983 ; LIEN et al, 1994). Le pool sanguin est néanmoins prédominant. D'autre part, la double source d'approvisionnement rend l'hypothèse d'égalité d'enrichissement AA sanguins/sécrétions impossible. Il faudrait vérifier l'importance relative de chaque précurseur ou prendre une autre référence.
3. Le pool précurseur choisi par les pionniers de la technique et leurs successeurs était la fraction déprotéinisée du sang, c'est-à-dire soluble dans une solution d'acide trichloroacétique ou TCA (DE LANGE et al, 1990). Ceci aboutit à une nette surestimation des flux endogènes. En effet, LIEN et al (1994) ont montré que les AA libres ne représentent qu'un tiers de l'azote total de cette fraction. Le reste, constitué d'azote non protéique (dont l'urée) a un enrichissement en ^{15}N beaucoup plus faible que celui des AA libres. A titre d'exemple, dans un essai de LIEN et al (1994), la proportion d'azote endogène dans les digesta était de 84 % en prenant comme référence l'enrichissement de la fraction TCA-soluble du sang et de 45 %

seulement en prenant celui des AA libres du sang. Toutes les données de flux endogènes et de digestibilités réelles obtenues par cette technique et publiées à ce jour sont donc surestimées.

4. Un plateau stable n'est pas facile à obtenir et la durée de perfusion est longue pour assurer un marquage uniforme de tous les pools corporels. D'autre part, l'enrichissement du pool sanguin fluctue au cours du temps postprandial. Selon LIEN et al (1994), l'enrichissement en ^{15}N -leucine du sang peut être plus élevé de 40 % lorsque la collecte de sang se fait au moment du repas, par rapport à une collecte effectuée quelques heures après le repas.
5. Comme la leucine transamine facilement, son ^{15}N s'incorpore dans les autres AA à chaîne ramifiée (isoleucine, valine) et tous les AA non essentiels. Cet échange permanent empêche de prendre comme référence l'enrichissement de chaque AA dans le sang. LIEN et al (1994) ont malgré tout tenté cette expérience mais sans prouver d'équivalence d'enrichissement entre un AA du plasma et ce même AA dans les sécrétions digestives.
6. Le coût de cette technique est prohibitif (1g ^{15}N -leucine = \pm 1500 FF).

Tous ces paramètres doivent être améliorés avant que la méthode ne puisse être validée. Néanmoins, l'atout majeur de cette dernière est de marquer directement les constituants endogènes déversés dans la lumière. De plus, elle peut être appliquée indifféremment à l'étude de toute source protéique.

En conclusion, la technique du marquage des sécrétions digestives est intéressante pour distinguer les flux iléaux totaux d'azote alimentaire et endogène chez le porc. Les résultats publiés jusqu'à présent surestiment la fraction endogène en raison d'artefacts de mesure simples à éviter. Cependant, les difficultés à définir le pool précurseur des sécrétions endogènes et à extrapoler les valeurs obtenues pour l'azote total à tous les AA vont limiter son utilisation.

2.4.2. Marquage des aliments

Les premières recherches effectuées sur les pertes endogènes iléales et fécales ont eu recours à des aliments marqués à l' ^{15}N . Elles ont permis aux chercheurs de prendre conscience de l'importance de la fraction endogène. KRAWIELITZKI et al (1977) ont mesuré les pertes fécales d'azote endogène chez le rat en combinant l'utilisation d'aliments marqués et la méthode par régression. GEBHARDT et al (1977) ont travaillé au niveau du duodénum et de l'iléon de porcs recevant du fromage blanc séché, marqué à l' ^{15}N . Ils ont montré que le rapport N endogène/N alimentaire évolue au cours du temps postprandial. Par la suite, ZEBROWSKA et al (1982) et PARTRIDGE et al (1985) ont utilisé respectivement du froment et de l'orge marqués pour étudier les flux d'azote endogène à différents niveaux du tube digestif du porc ou du rat mais sans déterminer de digestibilité.

Notre équipe a étudié la possibilité d'utiliser des aliments marqués pour l'estimation de la digestibilité iléale réelle des AA alimentaires chez le porc (LETERME et al, 1993, 1994c). Des graines de pois ont été enrichies en ^{15}N par l'application d'engrais marqué sur la culture. L'avantage principal réside dans le fait que tous les AA sont enrichis et qu'il est possible d'établir le rapport endogène/ alimentaire de chacun d'eux

dans les digesta iléaux. Afin d'éviter une réincorporation des AA alimentaires dans les sécrétions digestives, un seul repas marqué peut être distribué aux animaux. Initialement, nous pensions que la mesure de la proportion d'azote endogène devait se faire sur les digesta les plus enrichis en ^{15}N , c'est-à-dire ceux émis entre 4 et 8 heures après le repas.

Cependant, le recyclage des AA alimentaires dans les matières endogènes s'est avéré beaucoup plus rapide qu'attendu: moins d'un quart d'heure après le repas, la présence de ^{15}N est déjà décelée dans le sang des animaux et moins d'une heure après dans le suc pancréatique (LETERME et al, 1993). Nous ignorons pour l'instant à partir de quel moment l' ^{15}N apparaît dans les sécrétions endogènes au niveau de l'iléon. Il est probable qu'il en apparaît durant le laps de temps signalé ci-dessus. Cela signifie que les matières endogènes sont contaminées par de l' ^{15}N , ce qui contribue à sous-estimer leur quantité dans les digesta iléaux. HAGEMEISTER et ROOS (1991) sont arrivés aux mêmes conclusions avec de la ^{15}N -caséine et estiment que 19 % des sécrétions digestives sont contaminées après 6 à 12 heures postprandiales. Le problème du recyclage rapide a été confirmé au cours d'un second essai où cette technique a été comparée à celle de la perfusion de ^{15}N -leucine dans le sang (LETERME et al, 1994c). Les proportions d'azote endogène mesurées à l'iléon étaient inférieures avec l'aliment marqué (50 vs 71 % respectivement). Les résultats obtenus avec la perfusion de ^{15}N -leucine ont toutefois été considérés comme surestimés, pour les raisons évoquées plus haut. Les mêmes conclusions ont été tirées pour la digestibilité réelle des AA.

Des disparités significatives ont été constatées entre les deux techniques au niveau de l'excrétion endogène de chaque AA et de la digestibilité réelle de chaque AA alimentaire. De plus, le profil en AA des matières endogènes obtenu avec les aliments marqués était tout à fait différent de celui obtenu avec le régime protéoprive. L'écart pour la digestibilité moyenne des AA se limitait toutefois à 3 unités. Pour l'ensemble de l'essai, il a été conclu que la méthode des aliments marqués sous-estimait la digestibilité réelle des AA en raison du recyclage rapide des AA alimentaires dans les sécrétions digestives tandis que la ^{15}N -leucine la surestimait pour des raisons de choix du pool précurseur des synthèses endogènes. Les futurs essais devront déterminer le temps réel d'apparition de ^{15}N dans les sécrétions digestives des porcs recevant des aliments marqués et régler le problème de la référence ou du pool précurseur dans le cas de l'autre méthode.

2.5. Méthodes *in vitro*

La digestibilité des protéines alimentaires peut aussi être mesurée *in vitro* en reproduisant l'activité des différentes protéases du tube digestif en éprouvette. Comme les digestibilités mesurées ne sont pas influencées par des pertes endogènes, la digestibilité estimée peut être qualifiée de réelle. Les valeurs obtenues sont d'ailleurs plus élevées que les digestibilités iléales apparentes mesurées *in vivo*. Des équations de régression sont proposées pour relier ces deux données (DIERICK et al, 1988; BOISEN et EGGUM, 1991).

Classiquement, l'échantillon analysé subit une attaque à l'HCl-pepsine, pour simuler la pré-digestion gastrique, suivie d'une digestion par les protéases pancréatiques. Du liquide intestinal prélevé sur des porcs est parfois aussi utilisé comme source d'enzymes. La technique ne donne de résultat

que pour l'azote total car c'est la protéolyse qui est mesurée en isolant, par centrifugation, les protéines indigestibles précipitées. Lorsqu'on désire estimer la digestibilité de chaque AA, il est nécessaire de mesurer le contenu en AA des protéines indigestibles. La mesure peut aussi se faire en mesurant l'évolution de pH de la solution car la protéolyse libère des protons qui abaissent le pH proportionnellement à la quantité de protéines digérées (DIERICK et al, 1988; BOISEN et EGGUM, 1991). SAVOIE (1991) a proposé une cellule de digestion qui permet de mesurer la digestibilité de chaque AA. La protéolyse a lieu dans un sachet de dialyse et les AA et petits peptides traversent la membrane (*cut-off* de 1000 Da) et sont récupérés dans une solution tampon.

Les valeurs de digestibilité obtenues dépendent de nombreux paramètres techniques tels que la spécificité enzymatique, l'activité enzymatique, la mouture de l'échantillon, le temps d'incubation ou la précipitation des protéines indigestibles (BOISEN et EGGUM, 1991). On peut déplorer la seule présence de protéases dans les traitements alors que dans le tube digestif, d'autres enzymes interviennent dans la digestion des nutriments et facilitent l'accès des protéases aux protéines alimentaires.

Récemment, JAGUELIN et al (1994) ont comparé les valeurs de digestibilité obtenues *in vitro* avec les valeurs apparentes et vraies mesurées *in vivo* pour différentes matières premières. Moyennant une correction pour les teneurs en fibres ou en cendres, selon l'aliment considéré, la précision des équations de prédiction était excellente ($r^2 = 0.99$), tant pour les valeurs apparentes que vraies. On peut cependant regretter que le flux endogène utilisé pour transformer la digestibilité *in vivo* apparente en digestibilité vraie ait été, par définition, identique pour toutes les matières premières. Ceci explique que les coefficients de régression et de variation étaient très proches pour les deux valeurs de digestibilité.

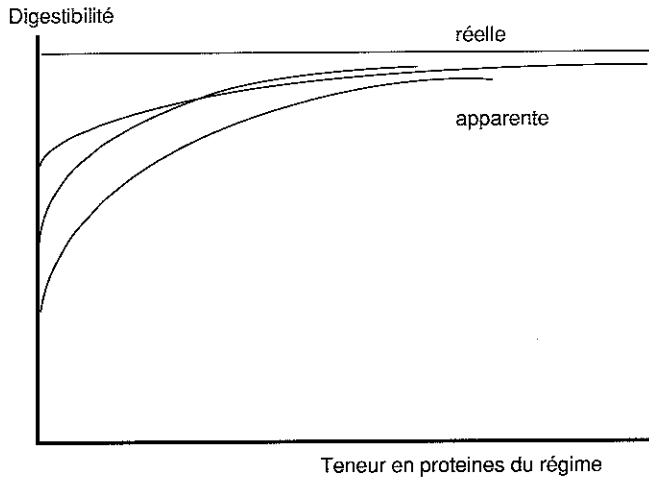
BOISEN et FERNÁNDEZ (1994) souhaitent estimer les valeurs de digestibilité apparente des protéines à partir de tests *in vitro* ! Pour cela, ils considèrent que la différence entre les valeurs apparentes *in vivo* et les valeurs *in vitro* correspond à la fraction d'azote endogène. Celle-ci serait proportionnelle à la quantité de protéines indigestibles et est prise en compte dans le calcul de digestibilité *in vitro*. La prédiction de la digestibilité apparente *in vivo* est nettement améliorée par cette procédure ($r^2 = 0.57$) par rapport à la relation directe ($r^2 = 0.21$). Ces coefficients demeurent toutefois faibles par rapport à la fiabilité que l'on désire obtenir par de telles méthodes.

3. CAS OÙ LA DIGESTIBILITÉ ILÉALE RÉELLE EST INTÉRESSANTE

3.1. Aliments pauvres en protéines

Les travaux d'EGGUM (1973) ont parfaitement illustré l'importance de l'ingéré protéique sur la mesure de digestibilité apparente et réelle des protéines alimentaires : plus l'ingéré est élevé, plus la digestibilité apparente se rapproche de la valeur réelle (figure 1). Cependant, il est parfois difficile de faire ingérer de grandes quantités de protéines aux animaux, que ce soit pour des raisons d'appétence, de présence de substances toxiques et surtout de composition de la matière première. C'est le cas des céréales : leur teneur en protéines excède rarement 14 % de la matière sèche.

Figure 1 - Évolution des digestibilités apparente et réelle d'AA alimentaires en fonction de l'ingéré protéique (inspiré d'EGGUM, 1973)



Avec des céréales de faible teneur en protéines, comme l'orge, la digestibilité apparente de la thréonine est particulièrement faible (< 70 %). Ceci peut s'expliquer par la présence importante de cet AA dans le mucus de la fraction endogène (25 à 35 % de la chaîne peptidique des mucines). L'excrétion de mucus à l'iléon est d'ailleurs proportionnelle à la quantité de fibres insolubles dans le régime (MARISCAL-LANDIN et al, 1994 ; LIEN et al, 1994). Ceci démontre que l'usage des régimes protéoprives pour estimer séparément les flux endogènes est délicat. Ces régimes devraient contenir des fibres de même nature que celles des aliments étudiés.

Pour pallier l'inconvénient de l'influence du régime sur la mesure de digestibilité, FAN et al (1994) proposent de déterminer la quantité minimum de chaque AA à incorporer dans le régime. Ceci se fait en calculant le point d'inflexion de la courbe de chaque AA reliant l'évolution de la digestibilité apparente à la teneur en protéines du régime (figure 1). Malheureusement, le niveau change pour chaque AA. Les chercheurs de l'Institut de Recherche sur la Biologie des Animaux domestiques de Rostock (RFA) considèrent que chaque AA dans l'aliment doit représenter 15 fois son niveau d'excrétion endogène à l'iléon mesuré à l'aide d'un régime protéoprive (HENNIG, communication personnelle). FAN et SAUER (1994) proposent d'éviter la méthode directe pour déterminer la digestibilité apparente d'aliments pauvres en protéines et d'utiliser plutôt la méthode de substitution et le calcul par différence.

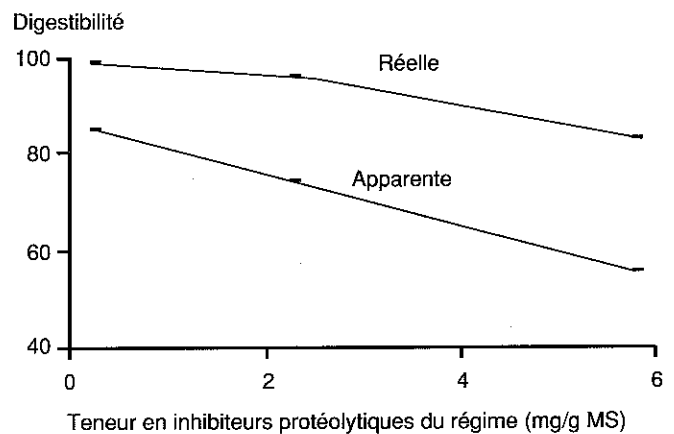
L'importance de la fraction endogène dans les digesta iléaux lors de la distribution d'un régime pauvre en protéines explique peut-être l'avantage de la digestibilité iléale vraie sur l'apparente lors de l'additivité des digestibilités. Pour rappel, il y a additivité lorsque la digestibilité d'un régime constitué de plusieurs matières premières est la même que celle calculée à partir des digestibilités individuelles de chaque constituant. Avec du froment, de l'orge et du maïs supplémentés en tourteau de soja, FURUYA et KAJI (1991) avaient démontré que l'additivité des valeurs de digestibilité vraie était plus précise. Récemment, HENNIG et SOUFFRANT (1994) ont obtenu une additivité parfaite de la digestibilité iléale apparente des régimes à base de maïs complémentés en tourteaux de coton, tournesol, lin, soja ou colza. La teneur en

protéines des régimes d'épreuve pour la mesure de digestibilité était dans ce cas beaucoup plus élevée que celle des céréales, ce qui diminue d'autant l'importance de la fraction endogène. Nous ignorons toutefois dans quelle mesure la digestibilité réelle offrirait un avantage par rapport à la digestibilité vraie.

3.2. Aliments riches en substances antinutritionnelles

La plupart des matières premières contiennent des substances antinutritionnelles. Si certaines sont inoffensives, d'autres, en particulier celles des graines de Légumineuses, peuvent exercer un effet déterminant sur la digestion et l'excrétion d'azote endogène à l'iléon (figure 2). Leur effet exact sur la digestion a longtemps été une énigme. Les techniques de dilution isotopique permettent maintenant de mieux comprendre les phénomènes.

Figure 2 - Effet des inhibiteurs protéolytiques sur les digestibilités iléales apparente et réelle des protéines alimentaires chez le porc (selon JANSMAN et al, 1994a)



La présence d'inhibiteurs protéolytiques réduit la digestibilité iléale apparente des AA chez le porc. Le complexe indigestible qu'elles forment avec les protéases pancréatiques est éliminé par l'intestin grêle mais chacun s'accorde à dire que l'effet antinutritionnel n'est pas dû à cette exportation. La diminution de la quantité de trypsine dans la lumière intestinale augmente la sécrétion pancréatique par effet *feed-back*. Cette surproduction provoquerait une perte iléale accrue des enzymes pancréatiques qui serait à l'origine des flux supplémentaires d'azote. JANSMAN et al (1994a) ont confirmé à l'aide de ¹⁵N que la diminution de la digestibilité apparente des protéines de soja riches en inhibiteurs tryptiques était surtout due à une augmentation des flux endogènes.

Les conclusions doivent cependant être nuancées pour leur application en pratique. C'est surtout la digestibilité des acides aminés soufrés qui est affectée par les facteurs antitryptiques. Contrairement à une idée généralement reçue, ce ne sont pas tellement les sécrétions pancréatiques qui entraînent ces pertes. Les inhibiteurs protéolytiques représentent de 6 à 8 % des protéines du soja, par exemple, mais contiennent de 30 à 50 % de leurs AA soufrés. Il s'agit surtout de la cystéine qui représente à elle seule 20 % des AA de l'inhibiteur de BOWMAN-BIRK (qui est thermorésistant).

Les tannins ont la faculté de se complexer à des protéines, tant alimentaires qu'endogènes. Dès lors, ils diminuent à la fois la digestibilité réelle des protéines et la réabsorption des sécrétions endogènes mais n'augmentent pas le niveau des sécrétions digestives (JANSMAN et al, 1994b). Les lectines se fixent à la paroi intestinale, provoquent la désorganisation de l'architecture des cellules épithéliales, activent la production de mucus et perturbent l'activité des enzymes intestinales. L'accélération de la multiplication des cellules épithéliales empêche leur développement jusqu'à maturité, ce qui entrave l'absorption des AA et des peptides (PUSZTAI, 1989). Ici aussi, un effet a été mis en évidence à l'aide de ^{15}N , à la fois sur la digestion des protéines et les pertes endogènes (JANSMAN et al, 1994a). Notons cependant qu'aucun effet des lectines purifiées de pois n'a été mis en évidence chez le porcelet.

Ces trois exemples illustrent l'intérêt de connaître l'effet d'une substance antinutritionnelle et de distinguer les conséquences sur la digestibilité réelle des protéines alimentaires et l'excrétion de matières azotées endogènes.

3.3. Autres cas

L'estimation de la digestibilité iléale réelle des AA alimentaires se justifie dans tous les cas où l'excrétion endogène prend une importance démesurée sur celle des AA alimentaires indigestibles à l'iléon. Nous avons évoqué les matières premières pauvres en protéines et les substances antinutritionnelles. Nous pourrions aussi citer les matières premières ayant subi un traitement thermique, les farines animales dont la qualité hétérogène est notoire, les issues de blé et autres sous-produits de l'agro-industrie. La demande pour ces derniers est de plus en plus vive mais on ignore encore tout de la qualité de leurs protéines et de leur effet sur les sécrétions digestives. Cependant, les techniques de mesure doivent être capables de déceler les anomalies. Par exemple, un traitement thermique excessif affecte surtout la lysine mais qu'en est-il de la capacité de la technique de dilution isotopique à déceler l'effet précis sur la digestibilité réelle de cet AA ?.

4. BESOINS ET APPORTS ALIMENTAIRES RÉELS

Le nutritionniste formule des régimes de manière à fournir à l'animal tous les nutriments dont il a besoin pour un niveau de performance ou de production donnés. Ces besoins sont déterminés en mesurant la réponse des animaux à l'apport croissant d'un AA essentiel, les autres étant apportés en quantité suffisante. Cette réponse correspond le plus souvent à la rétention azotée par l'animal. En pratique, les animaux reçoivent un régime de base équilibré (sauf pour l'AA étudié), supplémenté par des doses croissantes de l'AA étudié. Au départ, les mesures ne se basaient que sur la composition en AA du régime. La validité des résultats était donc liée à la qualité des matières premières utilisées. Ceci ne pose pas de problèmes lorsqu'un nutritionniste utilise des formules identiques à celles utilisées pour la détermination des besoins mais aboutit à des erreurs importantes dans le cas contraire. Depuis quelques années, l'estimation des besoins se fait sur base de régimes de digestibilité iléale apparente (SCHUTTE et al, 1990; BURGOON et al, 1992) ou vraie (SÈVE et al, 1993). Ils doivent donc être exprimés en AA apparemment ou vraiment digestibles. Ici encore, l'origine des matières premières utilisées pour formuler le régime de base peut s'avérer importante.

Pour contourner le problème, WANG et FULLER (1989) ont utilisé un régime à base de protéines totalement digestibles (caséine) supplémenté par des quantités importantes d'AA de synthèse. Les besoins sont exprimés dans ce cas en quantités d'AA réellement digestibles.

Il semble donc que le choix d'utilisation de la digestibilité iléale apparente, vraie ou réelle des AA alimentaires soit lié au mode d'expression des besoins des animaux. La validité de l'utilisation des valeurs de digestibilité réelle en pratique est discutée plus loin.

5. PRISE EN COMPTE DES PERTES ENDOGÈNES

Avec la méthode de WANG et FULLER (1989), les pertes endogènes sont prises en compte dans les besoins. Ces pertes correspondent à un niveau minimum inévitable puisque le régime semi-synthétique utilisé ne contenait pas d'ingrédients susceptibles d'influencer significativement les flux iléaux endogènes. L'utilisation d'autres matières premières induirait probablement une excrétion iléale supplémentaire d'azote endogène par rapport à ce niveau de base. Il faudrait d'abord vérifier si cet accroissement des pertes doit être pris en compte dans la formulation des régimes. SÈVE et al (1994) ont récemment suggéré de diviser les pertes endogènes en deux fractions: l'une correspondant au niveau de base inévitable (fraction *non spécifique*) et l'autre liée aux facteurs alimentaires (fraction *spécifique*). Pour pouvoir appliquer ce système, la première fraction devrait être mesurée par exemple avec le régime protéoprive sans fibres, et il faudrait trouver une relation entre la perte endogène spécifique et le facteur alimentaire qui l'induit.

Les chercheurs de Rennes ont établi une relation étroite entre le taux de fibres insolubles du régime et la perte de mucus à l'iléon (MARISCAL-LANDIN et al, 1994). Ceci indique surtout une perte de thréonine endogène puisque les mucines qui atteignent l'iléon contiennent jusqu'à 35 % de cet AA. Mais le mucus n'est pas la seule source d'azote endogène dont les pertes sont accrues par la présence de fibres insolubles: les cellules épithéliales sont aussi rejetées en plus grand nombre (JIN et al, 1994). SCHULZE et al (1994) ont établi une relation entre le taux de fibres du régime et les pertes d'azote total endogène chez des porcelets. JANSMAN et al (1994a,b) ont fait de même pour les inhibiteurs protéolytiques, les lectines et les tannins. Les valeurs absolues publiées par ces auteurs sont toutefois surestimées en raison de l'artefact de mesure mentionné plus haut pour la technique de marquage des sécrétions à l' ^{15}N .

Cette approche a des limites pratiques. Tout d'abord, l'importance relative de l'endogène spécifique par rapport au non spécifique doit être établie. SCHULZE et al (1994) n'ont, par exemple, mesuré qu'un accroissement de 5 mg d'azote par gramme de fibre NDF incorporée dans un kg d'aliment destiné à des porcelets de 10 kg. De plus, les essais susmentionnés ont utilisé des niveaux de fibres ou de substances nutritionnelles très élevées, non rencontrés en pratique. La détermination du facteur alimentaire susceptible d'accroître les pertes endogènes est aussi délicat. SCHULZE et al (1994) et SÈVE et al (1994) ont travaillé avec les fibres NDF des sons de blé mais cette méthode d'analyse ne convient pas pour toutes les matières premières. Nous avons, par exemple, montré que l'effet des fibres de graines de pois était plus corrélé à la teneur en fibres solubles et à leur capacité de

rétenion en eau (LETERME et al, 1994a). Chez les Légumineuses en général, il s'agit probablement d'un ensemble de facteurs (fibres solubles, antinutritionnels). Si c'est le cas, nous ignorons dans quelle mesure leur effet est additif.

BOISEN et FERNÁNDEZ (1994) considèrent qu'il existe une relation étroite entre les pertes endogènes et la fraction indigestible d'une matière première. Cette dernière pourrait être estimée à l'aide de tests *in vitro*. Cependant, les corrélations obtenues par ces chercheurs sont loin d'être satisfaisantes. VAN LEEUWEN et al (1993) ont estimé les pertes endogènes à l'aide d'équations intégrant la composition en AA du régime et la digestibilité iléale apparente de l'azote des régimes, mais ici aussi la précision laissait à désirer.

En pratique, la formulation des aliments devrait apporter une correction pour les AA endogènes éliminés. Cela ne revient pas à travailler avec des valeurs apparentes de digestibilité car il faut considérer la perte d'AA endogènes spécifiques comme une dépense pour l'organisme, qui s'ajoute à la dépense de croissance. Mais elle se fait avec un rendement jusqu'à présent inconnu, de sorte qu'il est difficile de proposer un système de correction approprié. Néanmoins, certaines pertes importantes peuvent déjà être prises en compte comme, par exemple, celle de la thréonine en présence de quantités importantes de fibres insolubles de céréales. Le cas des AA soufrés des graines de Légumineuses correspond plutôt à une faible digestibilité.

6. DIGESTIBILITÉ ET DISPONIBILITÉ DES ACIDES AMINÉS

La disponibilité d'un AA correspond à la proportion de cet AA qui sera utilisée lorsqu'il constitue le facteur limitant du régime. Ce critère intègre deux composantes: l'une métabolique, l'autre digestive. Cette dernière correspond à la mesure de digestibilité réelle. La première représente plutôt la quantité de cet AA retenue par l'organisme. Elle ne correspond pas forcément à la quantité de l'AA réellement digérée. SÈVE (1994) rappelle que le rendement d'utilisation métabolique d'un AA varie souvent plus selon des paramètres liés à l'animal et au mode d'alimentation pratiqué qu'en fonction des caractéristiques propres à la matière première étudiée. L'excès relatif d'autres AA que le limitant dans le régime joue également un rôle.

D'autre part, les AA essentiels peuvent être absorbés par l'intestin sous une forme inutilisable par l'organisme (BATTERHAM, 1992). Ce phénomène concerne surtout les aliments traités à la chaleur. VAN BARNEVELD et al (1994a, b) ont fait subir un traitement thermique d'intensité croissante à des graines de pois protéagineux. La digestibilité iléale apparente de la lysine était peu affectée alors que la rétention de lysine diminuait considérablement. Un ajout de lysine de synthèse permettait de rétablir une partie de la rétention, démontrant l'absorption de l'AA sous une forme inutilisable.

CONCLUSIONS

Les flux d'AA endogènes à l'iléon des porcs sont tels qu'il semble désormais difficile de ne pas en tenir compte. Ils sont très variables et dépendants de la composition des aliments. La digestibilité réelle des AA alimentaires ne peut donc être estimée qu'en prenant ces flux en considération. On peut toutefois s'interroger sur l'intérêt pratique de ces valeurs

réelles. En effet, les teneurs en AA apparemment digestibles prennent déjà en compte les pertes endogènes de l'animal. En théorie, il ne serait donc plus nécessaire d'envisager de correction lors de la formulation, d'autant que des tables d'alimentation fournissent déjà des teneurs en AA apparemment ou vraiment digestibles!

En fait, le problème tient à la fois à la grande hétérogénéité de composition des matières premières et à la méthodologie utilisée pour estimer les digestibilités et les flux endogènes. Ces derniers, obtenus avec le régime protéoprive, ne sont pas spécifiques d'une matière première en particulier. La digestibilité vraie n'apporte donc de correction que pour la perte endogène non spécifique, commune à tous les aliments. Les valeurs de digestibilité apparente des protéines des céréales, par exemple, dépendent de leur teneur en protéines et en fibres. Le taux protéique va déterminer la proportion d'azote alimentaire à l'iléon tandis que les fibres vont à la fois influencer la digestibilité réelle des protéines et le niveau des pertes endogènes. Seule la digestibilité réelle permettra d'effectuer une comparaison objective de la valeur nutritive de différents lots.

Comme la composition en AA des matières endogènes qui atteignent l'iléon est très différente de celle des protéines alimentaires indigestibles, il semble périlleux de prendre la teneur en AA apparemment digestible pour estimer la quantité d'AA qui sera réellement disponible pour l'animal. En d'autres termes, la présence de quantités importantes d'AA endogènes dans les digesta peut masquer la valeur nutritive réelle de l'aliment.

L'utilisation de teneurs en AA réellement digestibles devra cependant faire la preuve de son efficacité en pratique. Pour l'instant, nous manquons cruellement de données à ce propos. Si nous écartons le problème de disponibilité réelle des AA, nous devons savoir comment utiliser correctement les valeurs de besoins des porcs en AA réellement digestibles. Les données de besoins en AA apparemment digestibles nous semblent trop liées à la méthodologie d'estimation, sauf dans le cas où les aliments sont formulés à partir des mêmes matières premières que celles utilisées pour les besoins.

Actuellement, nous ignorons dans quelle mesure les pertes endogènes importantes doivent être corrigées par un apport supplémentaire en AA. L'élimination d'AA endogènes spécifiques constitue une dépense pour le porc qui s'ajoute à la dépense de croissance et dont le rendement demeure inconnu. Les besoins établis par WANG et FULLER (1989) ne tiennent compte que de la perte non spécifique. Cette quantité correspond peut-être à celle estimée à l'aide des régimes protéoprives.

Pour connaître la fraction additionnelle spécifique des facteurs alimentaires, seule la technique de dilution isotopique à l'¹⁵N semble susceptible de fournir des estimations précises. Elle n'est pas utilisable en routine mais pourrait établir des relations entre les pertes endogènes spécifiques et le niveau des facteurs alimentaires qui les induisent. Pour y arriver, il faudrait d'abord identifier correctement ces constituants alimentaires pour chaque catégorie de matières premières, de même que les sécrétions digestives impliquées. De telles équations seraient très intéressantes pour compléter les équations de prédiction de digestibilité apparente obtenues sur base de la composition des aliments, telles que proposées par SÈVE et al (1994). Elles pourraient aussi améliorer

les méthodes de prédiction *in vitro*, comme celles développées par JAGUELIN et al (1994).

De telles perspectives ne sont envisageables qu'avec des méthodes de recherche fiables. Les techniques de dilution isotopiques à l'¹⁵N semblent répondre à ces exigences mais un certain nombre de problèmes méthodologiques doivent encore être résolus. Les données publiées récemment par LIEN et al (1994) et LETERME et al (1994c) indiquent qu'il s'agit le plus souvent d'artefacts de mesure simples à corriger.

En attendant, l'estimation des valeurs de digestibilité vraie pourrait être améliorée afin d'approcher les valeurs réelles. A cette fin, les régimes protéoprives pourraient incorporer des sources de fibres solubles, dont l'effet semble moins neutre, en terme de stimulation de l'excrétion endogène, que les fibres insolubles. L'idéal serait de disposer de fibres purifiées de la matière première étudiée, pour autant que les propriétés soient maintenues! Il faudrait aussi trouver une solution pour

les protéines animales.

D'autre part, le régime protéoprive classique doit être abandonné car il pénalise trop le niveau des pertes endogènes. Il pourrait être complété par une protéine totalement digestible, comme l'ont proposé MOUGHAN et BUTTS. L'hydrolysate de caséine ne donne pas entière satisfaction mais les problèmes sont peut-être liés au taux d'incorporation élevé (10 %) et au fait que 60 % des AA apportés sont sous forme libre. Une protéine entière totalement digestible devrait être recherchée et le taux d'incorporation minimal requis dans les régimes devrait être estimé. Ces améliorations permettraient de prendre en compte une partie des pertes endogènes spécifiques et rapprocheraient les valeurs 'vraies' des valeurs 'réelles' de digestibilité des AA alimentaires.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient chaleureusement M. Bernard SÈVE pour son analyse critique du manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEOLA O., YOUNG L., MC MILLAN E., MORAN E. Jr, 1986. *J. Anim. Sci.*, 63, 1862-1869
- ALPERS D., 1972. *J. Clin. Invest.*, 51, 167-173
- ALPERS D., KINZIE J., 1973. *Gastroenterology*, 64 (3), 471-496
- BATTERHAM E., 1992. *Nutr. Res. Rev.*, 5, 1-18
- BOISEN S., EGGUM B., 1991. *Nutr. Res. Rev.*, 4, 141-162
- BOISEN S., FERNÁNDEZ J., 1994. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 111-113
- BURGOON K., KNABE D., GREGG E., 1992. *J. Anim. Sci.*, 70, 2493-2500
- BUTTS C., MOUGHAN P., SMITH W., 1991. *J. Sci. Food Agric.*, 55, 175-187
- BUTTS C., MOUGHAN P., SMITH W., 1992a. *J. Sci. Food Agric.*, 59, 291-298
- BUTTS C., MOUGHAN P., SMITH W., 1992b. *J. Sci. Food Agric.*, 59, 415-417
- BUTTS C., MOUGHAN P., SMITH W., REYNOLDS G., GARRICK D., 1993. *J. Sci. Food Agric.*, 62, 235-243
- DE LANGE C., SAUER W., MOSENTHIN R., SOUFFRANT W., 1989a. *J. Anim. Sci.*, 67, 746-754
- DE LANGE C., SAUER W., SOUFFRANT W., 1989b. *J. Anim. Sci.*, 67, 755-763
- DE LANGE C., SOUFFRANT W., SAUER W., 1990. *J. Anim. Sci.*, 68, 409-418
- DIERICK N., VERVAEKE I., DECUYPERE J., HENDERICKX H., 1983. *Rev. Agric., Bruss.*, 36, 1691-1711
- DIERICK N., VERVAEKE I., DECUYPERE J., HENDERICKX H., 1988. *Rev. Agric., Bruss.*, 41, 633-654
- EGGUM B., 1973. A study of certain factors influencing protein utilization in rats and pigs. Report of the National Institute of Animal Science n° 406, Copenhagen; 173 p.
- FAN M., SAUER W., 1994. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 103-106
- FAN M., SAUER W., LIENK., 1994. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 25-27
- FURUYA S., NAGANO R., KAJI Y., 1986. *Jpn. J. Zootech. Sci.*, 57, 859-870
- FURUYA S., KAJI Y., 1991. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 32, 321-331
- FURUYA S., KAJI Y., 1992. *Br. J. Nutr.*, 64, 569-587
- GEBHARDT G., ZEBROWSKA T., SOUFFRANT W., KÖHLER R., 1977. In: *Stable Isotopes in the Life Sciences*. IAEA Ed., Vienna, pp 383-393
- GREEN S., BERTRAND S., DURON M., MAILLARD R., 1987. *J. Sci. Food Agric.*, 41, 29-43
- HAGEMESTER H., ERBESDOBLER H., 1985. *Proc. Nutr. Soc.*, 44, 133A
- HAGEMESTER H., ROOS N., 1991. *Proc. 6th Int. Symposium on Protein Metabolism and Nutrition*, vol. 2; Herning (Dk); pp 36-38
- HENNIG U., SOUFFRANT W., 1994. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 107-110
- JAGUELIN Y., FÉVRIER C., SÈVE B., LECHEVESTRIER Y., MARISCAL-LANDÍN G., LEROUX P., LEBRETON Y., 1994. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 114-117
- JANSMAN A., SCHULZE H., VAN LEEUWEN P., VERSTEGEN M., 1994a. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 322-324
- JANSMAN A., VERSTEGEN M., HUISMAN J., VAN DEN BERG J., 1994b. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 366-369
- JIN L., REYNOLDS L., REDMER D., CATON J., CRENSHAW J., 1994. *J. Anim. Sci.*, 72, 2270-2278
- KRAWIELITZKI K., VÖLKER T., SMULIKOWSKA S., BOCK H., WÜNSCHE J., 1977. *Arch. Anim. Nutr.*, 27, 609, 627
- LAPLACE J. P., CORRING T., RÉRAT A., DEMARNE Y. 1986. In: J. Perez, P. Mornet, A. Rérat (Eds) *Le porc et son élevage: bases scientifiques et techniques*. Maloigne Publ., Paris, pp 65-120
- LEIBHOLZ J., 1982. *Br. J. Nutr.*, 48, 509-517
- LETERME P., PIRARD L., THEWIS A., 1992. *Anim. Prod.*, 54, 163-165
- LETERME P., THEWIS A., GENOT L., FRANCOIS E., WATHELET B., 1993. In: M. Verstegen, L. den Hartog, G. van Kempen, J. Metz (Eds) *Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences*, EAAP Publ. 69, Pudoc Scientific Publ., Wageningen (Ni), 49-54
- LETERME P., VAN LEEUWEN P., THEWIS A., HUISMAN J., 1994a. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 67-70
- LETERME P., MONMART T., MORANDI P., THEWIS A., 1994b. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds) *Proc. Vlh Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs*, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 60-63
- LETERME P., THEWIS A., VAN LEEUWEN P., HUISMAN J., FRANCOIS E., 1994c. In: W. Souffrant, H. Hagemester (Eds)

- Proc. Vth Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 21-24
- LIEN K., SAUER W., MOSENTHIN R., SOUFFRANT W., 1994. In: W. Souffrant, H. Hagemeister (Eds) Proc. Vth Int. Symp. on Digestive Physiology in Pigs, Bad Doberan (D), EAAP Publ. 80, 31-34
 - MARISCAL-LANDIN G., LEBRETON Y., SÈVE B., 1990. Journées Rech. Porcine en France, 22, 215-222
 - MARISCAL-LANDIN G., SÈVE B., COLLEAUX Y., LEBRETON Y., 1994. J. Nutr. (sous presse)
 - MOUGHAN P., RUTHERFURD S., 1990. J. Sci. Food Agric. 52, 179-192
 - MOUGHAN P., SCHUTTERT G., 1991. J. Nutr., 121, 1570-1574
 - PARTRIDGE I., SIMON O., BERGNER H., 1985. Arch. Anim. Nutr., 35, 163-173
 - PUSZTAI A., 1989. In: J. Huisman, T. van der Poel, I. Liener (Eds) Recent advances of research in antinutritional factors in legume seeds. Pudoc, Wageningen, 17-29
 - SAUER W., STOTHERS S., PARKER R., 1977. Can. J. Anim. Sci., 57, 775-784
 - SAVOIE L., 1991. In: M. Fuller (Ed) In vitro digestion for pigs and poultry. CAB Publ., Wallingford UK, 146-161
 - SCHMITZ M., HAGEMEISTER H., ERBESDOBLER H., 1991. J. Nutr. 121, 1575-1580
 - SCHULZE H., VAN LEEUWEN P., VERSTEGEN M., HUISMAN J., SOUFFRANT W., AHRENS F., 1994. J. Anim. Sci., 72, 2362-2368
 - SCHUTTE J., BOSCH M., LENIS N., DE JONG J., VAN DIEPEN J., 1990. Neth. J. agric. Sci., 38, 597-607
 - SÈVE B., GANIER P., HENRY Y., 1993. Journées Rech. Porcine en France, 25, 255-262
 - SÈVE B., MARISCAL-LANDIN G., FÉVRIER C., LECHEVESTRIER Y., 1994. Journées Rech. Porcine en France, 26, 259-266
 - SÈVE B., 1994. INRA Prod. Anim. 7 (4), (sous presse)
 - SIMON O., ZEBROWSKA T., BERGNER H., MÜNCHMEYER R., 1983. Arch. Anim. Nutr., 33, 9-22
 - SOUFFRANT W., KÖHLER R., MATKOWITZ R., GEBHARDT G., SCHMANDKE H., 1981. Arch. Anim. Nutr., 31, 675-683
 - SOUFFRANT W., DARCY-VRILLON B., CORRING T., LAPLACE J., KÖHLER R., GEBHARDT G., RÉRAT A., 1986. Arch. Anim. Nutr., 36, 269-274
 - SOUFFRANT W., 1991. In: M. Verstegen, J. Huisman, L. den Hartog (Eds) Digestive Physiology in Pigs. EAAP Publication 54, Pudoc, Wageningen, 147-166
 - SOUFFRANT W., RÉRAT A., LAPLACE J., DARCY-VRILLON B., KÖHLER R., CORRING T., GEBHARDT G., 1993. Reprod., Nutr., Dev., 33, 373-382
 - TAVERNER M., HUME R., FARRELL D., 1981. Br. J. Nutr., 46, 149-159
 - VAN BARNEVELD R., BATTERHAM E., NORTON B., 1994a. Br. J. Nutr. 72, 243-256
 - VAN BARNEVELD R., BATTERHAM E., NORTON B., 1994b. Br. J. Nutr. 72, 257-275
 - VAN LEEUWEN P., JANSMAN A., VAN KEMPEN G., VERSTEGEN M., HUISMAN J., 1993. Livest. Prod. Sci., 36, 255-272
 - WANG T., FULLER M., 1989. Br. J. Nutr., 62, 77-89
 - ZEBROWSKA T., 1973. Roczn. nauk Roln., B95, 85-90
 - ZEBROWSKA T., SIMON O., MÜNCHMEYER R., WOLF E., BERGNER H., ZEBROWSKA H., 1982. Arch. Anim. Nutr., 32, 431-444