

Acides aminés digestibles dans l'intestin. Le système AADI et les recommandations d'apport pour la vache laitière

L'intérêt porté par la filière laitière aux accroissements de taux protéique provoqués par des suppléments d'acides aminés nous a conduits à élaborer un système permettant d'évaluer pour chaque acide aminé les apports de la ration et les recommandations d'apport aux animaux. Ce système complète le système PDI car il estime la composition en acides aminés des PDI en fonction de la ration ingérée. D'abord développé pour la lysine et le méthionine, ce système peut être utilisé pour optimiser l'apport d'autres acides aminés comme la leucine et l'histidine qui sont aussi susceptibles d'être limitants.

De nombreux résultats expérimentaux (cf Rulquin *et al* 2001a) et des observations de terrain indiquent à l'évidence le rôle limitant de certains acides aminés (AA) indispensables sur la production de protéines chez la vache laitière. Ceci correspond aussi à une moindre efficacité d'utilisation de l'azote et est donc un élément à prendre en compte parmi d'autres dans la recherche d'économie d'azote pour des raisons environnementales.

Cependant, la nature des acides aminés limitants, l'importance de leur déficit et les

effets d'un apport plus élevé de ces acides aminés limitants varient assez largement, en particulier selon les régimes. En effet les fourrages et les concentrés qui les composent conditionnent en partie les proportions relatives des AA disponibles pour l'animal.

Pour diagnostiquer les situations de déséquilibre et proposer des solutions raisonnées il est essentiel de disposer d'un outil permettant d'évaluer à la fois les apports et les "recommandations d'apport" en ces AA indispensables. Pour cela le système des acides aminés digestibles dans l'intestin (AADI) a été élaboré sur les bases du système PDI et proposé à l'usage en France dès 1992-93 (Rulquin *et al* 1993, Rulquin et Vérité 1993).

Le système d'acides aminés digestibles dans l'intestin (AADI) a été basé sur le concept de la protéine idéale largement utilisée dans l'alimentation des monogastriques. Raisonner sur une composition des protéines et non sur un apport d'acides aminés en grammes par jour, a permis de bâtir un système complémentaire du système PDI et qui peut évoluer à son rythme, acide aminé par acide aminé. A l'image des PDI, ce système est cohérent car les recommandations d'apport ont été calculées à partir des valeurs données aux aliments et des réponses de production des vaches laitières.

Résumé

Le nouveau système AADI (acides aminés digestibles dans l'intestin) s'intègre au système PDI en estimant la composition en acides aminés des PDI. Pour ce faire, la valeur des aliments a été estimée à partir des fractions microbienne et alimentaire non dégradée dans le rumen, de la composition en acides aminés (AA) de ces deux fractions et de leur digestibilité. Cette estimation a été validée par rapport à la composition en AA de contenus digestifs provenant de 133 régimes. Cette étape de validation a montré qu'il était nécessaire d'ajuster l'estimation initiale pour prédire au mieux les mesures effectuées sur les animaux. Ce travail a permis d'élaborer une table de composition en neuf AADI pour près de 700 aliments. Ce système de prédiction a été utilisé pour établir les courbes des réponses des protéines du lait (quantité et taux) à différents niveaux d'apport de divers acides aminés indispensables. Les apports recommandés en lysine et en méthionine pour la vache laitière ont ainsi été évalués à 7,3 LysDI % PDIE et 2,5 MetDI % PDIE. Cependant, actuellement en pratique, l'attention peut se porter uniquement sur les situations où les apports sont inférieurs aux 'seuils critiques' fixés à 6,8 LysDI % PDIE et à 2,1 MetDI % PDIE. Les recommandations pour les autres acides aminés indispensables sont nettement moins bien établies. Les valeurs possibles (% PDIE) seraient d'environ 2,5 à 3,2 % d'HisDI et d'au moins 8,8 % de LeuDI, l'histidine et la leucine étant susceptibles d'être également limitants dans certains cas.

Cet article décrit les bases retenues pour élaborer le système AADI en considérant d'abord la valeur des aliments et en proposant ensuite des recommandations d'apport pour les acides aminés pouvant être limitants chez la vache laitière. Concernant la valeur des aliments, seules sont données ici la méthode de calcul, ses bases et leurs justifications. Les tables de valeur en chaque AADI pour les principaux aliments figurent dans le supplément de ce numéro (Rulquin *et al* 2001b). Il est bon de rappeler aussi que les éléments ayant servi au choix d'une partie de ces bases sont donnés dans l'article de Rulquin *et al* (2001a) paru dans le numéro précédent.

1 / Les valeurs des aliments

1.1 / Démarche adoptée

Pour un acide aminé donné, la quantité d'élément digestible dans l'intestin fournie par un aliment (ou une ration) est évaluée par le produit :

- du flux de protéines entrant dans l'intestin (PI)
- par la teneur en cet acide aminé dans ces protéines ([AA])
- et par sa digestibilité dans l'intestin grêle (dig).

Ce calcul est fait séparément pour chacune des deux fractions significatives constituant le flux intestinal de protéines (protéines alimentaires non dégradées -A- et protéines microbiennes -M-) qui sont ensuite sommées. Il convient de remarquer que, comme dans le système PDI, la fraction endogène n'est pas prise en compte car assez faible, difficile à évaluer et par ailleurs également ignorée dans le calcul des besoins.

Par exemple, pour la lysine :

$$\text{Apport LysDI} = (\text{PIA} \times [\text{Lys}]_A \times \text{dig}_A) + (\text{PIM} \times [\text{Lys}]_M \times \text{dig}_M)$$

Ce résultat est ensuite exprimé relativement à la somme des 18 AADI qui sont supposés constituer l'essentiel des protéines (i.e. des PDI).

L'estimation des valeurs AADI des aliments comporte donc trois étapes :

- l'évaluation de chacune des fractions protéiques composant le flux de protéines à l'entrée de l'intestin ;
- l'estimation de la composition en AA de chacune de ces fractions ;
- l'évaluation de la digestibilité intestinale de chaque AA.

Le premier et le troisième de ces éléments sont directement issus du système PDI.

L'estimation de la composition en acides aminés est l'élément sensible décrit ici plus en détail. Elle comporte d'abord la recherche et le choix des références de composition en AA retenues pour chaque fraction protéique, puis une phase de validation par comparaison des profils d'AA calculés avec des profils mesurés dans un ensemble d'expérimentations. En conséquence, comme il est indiqué ultérieurement, un 'ajustement' a été intro-

duit dans l'étape de calcul pour améliorer la qualité de la prédiction et l'élaboration des tables.

1.2 / Bases retenues pour l'évaluation des AADI

a / Rappel sur les fractions protéiques évaluées par le système PDI

Les acides aminés des protéines intestinales proviennent de trois fractions protéiques différentes : la fraction alimentaire non dégradée dans le rumen, la fraction microbienne et la fraction endogène des pré-estomacs et de la caillette. Le système PDI quantifie chacune de ces fractions protéiques à partir des caractéristiques de la ration (Vérité *et al* 1987, Vérité et Peyraud 1988).

La fraction alimentaire non dégradée peut s'estimer à partir des PIA selon l'équation :

$$\text{PIA} = \text{MAT} \times (1,11 (1-\text{DT}))$$

où DT représente la dégradabilité théorique dans le rumen (comprise entre 0 et 1).

Dans les rations pour vaches laitières, la synthèse des protéines microbiennes est le plus souvent limitée par la disponibilité en énergie (PDIE limitants). C'est pourquoi la fraction microbienne peut se calculer uniquement à partir des PIME selon l'équation :

$$\text{PIME} = \text{MOF} \times 0,145 \times 0,8$$

où la matière organique fermentescible (MOF) représente la matière organique digestible, moins les matières azotées non dégradables, moins les matières grasses, moins les produits volatils de fermentation.

La fraction endogène (PIendo) peut s'estimer à partir de la quantité de matière organique non digestible (MOND) à raison de 33 g de matières azotées par kg de MOND (Vérité et Peyraud 1988) et en supposant que 50 % de ces matières azotées sont constituées d'acides aminés (moyenne des valeurs obtenues par Orskov *et al* (1986) et Guilloteau (1986).

$$\text{PIendo} = \text{MOND} \times 33 \times 0,5.$$

b / Profil de la fraction microbienne

Le choix du profil de cette fraction est particulièrement important puisqu'elle représente 50 à 70 % des protéines entrant dans l'intestin. Les microorganismes du rumen sont constitués de bactéries, de protozoaires et de champignons. Ces derniers peuvent être négligés car ils ne représentent qu'une faible proportion de la population microbienne du rumen (Grenet *et al* 1988). Le profil en AA des bactéries diffère de celui des protozoaires pour la lysine (8,5 vs 10,2 %) et la méthionine (2,4 vs 2,1 %) (Orskov 1982). Étant donné les différences de composition en AA entre les bactéries et les protozoaires, la contribution des protozoaires aux protéines intestinales pourrait avoir des répercussions importantes sur leur composition en AA. Cependant l'importance du passage des protozoaires dans le duodénum est très controversé. En effet, la part d'azote entrant dans le duodénum provenant des protozoaires serait de 20 à 40 % pour

La valeur AADI des aliments est estimée à partir de la composition en AA des protéines entrant dans l'intestin et de la digestibilité intestinale des acides aminés.

Tableau 1. Composition en acides aminés des fractions endogène et microbienne retenue pour l'estimation du profil en acides aminés des protéines intestinales.

	Endogène ⁽¹⁾ (n=1)	Bactéries ⁽²⁾ (n=66)			
	(%)	moyenne (%)	CV (%)	minimum (%)	maximum (%)
Lys	7,67	8,0	12,0	5,0	11,4
His	3,77	1,8	18,0	1,0	2,7
Arg	5,16	4,9	11,0	4,1	7,5
Thr	6,83	5,8	9,0	4,7	7,8
Val	6,42	6,2	10,0	4,7	7,5
Met	1,53	2,5	24,0	1,1	3,9
Ile	4,88	5,9	10,0	4,6	7,6
Leu	5,02	7,7	7,0	5,3	8,8
Phe	4,88	5,3	12,0	4,2	8,2
Asp	9,62	12,1	7,0	7,9	13,8
Ser	6,83	4,6	9,0	3,6	5,5
Glu	13,11	13,3	7,0	8,9	15,1
Pro	6,56	3,7	14,0	2,3	5,3
Gly	6,69	5,7	10,5	4,0	7,6
Ala	5,86	7,8	8,0	6,3	9,8
Tyr	5,16	4,7	12,0	2,5	5,6

⁽¹⁾ Valeurs provenant de Ørskov *et al* (1986)⁽²⁾ Valeurs provenant de Le Hénaff (1991)

Harrison *et al* (1979) et Steinhour *et al* (1982) et négligeable pour Weller et Pilgrim (1974) et Leng (1982). Faute d'éléments plus précis, les microorganismes du rumen ont été assimilés aux bactéries associées à la phase liquide du rumen. Le profil en AA de ces bactéries était généralement considéré comme constant (Orskov 1982, Hvelplund 1986). Une étude de 66 profils publiés dans la bibliographie (Le Hénaff 1991) laisse, toutefois, apparaître une variabilité non négligeable de ce profil (tableau 1). En effet les acides aminés indispensables (sauf la leucine et la thréonine) ont un coefficient de variation supérieur à 10 % qui atteint même 24 % pour la méthionine (tableau 1). Dans l'incapacité de déterminer les raisons d'une telle variation (Le Hénaff 1991), la moyenne des 66 profils a été retenue comme étant le profil des bactéries.

c / Profil de la fraction alimentaire non dégradée

Le choix d'un profil est fonction des modifications de la composition des AA que peut entraîner le passage dans le rumen. Ce problème a été le plus souvent étudié par l'incubation des aliments dans des sachets de Nylon suspendus dans le rumen. Les conclusions tirées par les utilisateurs de cette technique sont assez contradictoires. En effet, le passage dans le rumen modifierait la composition en AA des protéines selon Rooke *et al* (1984), Varvikko (1986), Crooker *et al* (1987) et Hvelplund (1987), et ne la modifierait pra-

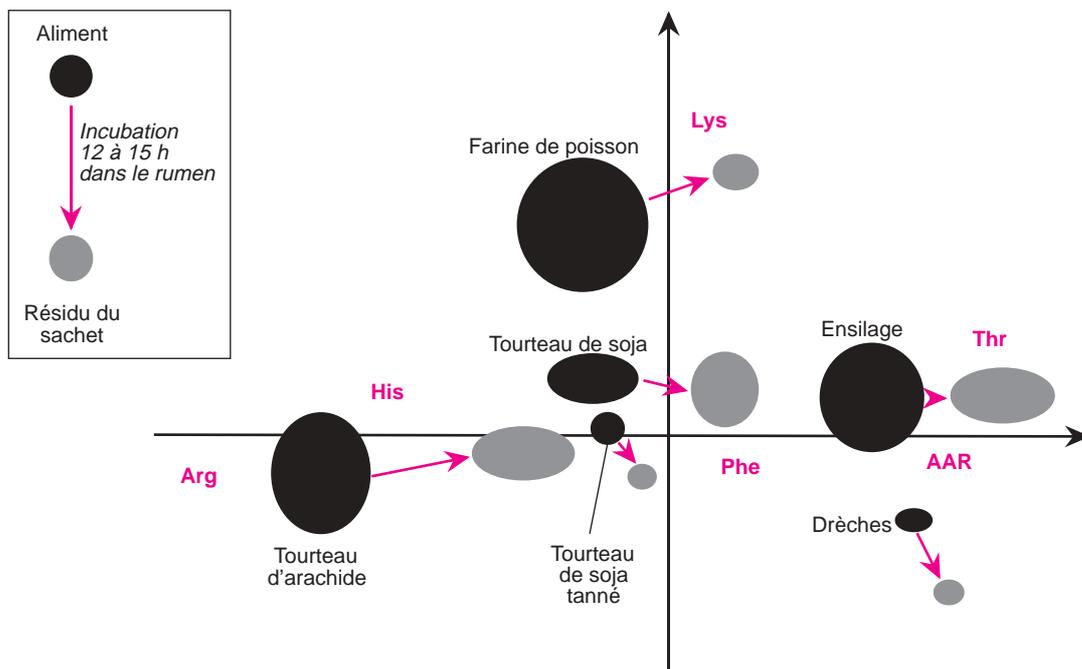
tiquement pas selon Ganev *et al* (1979), Varvikko *et al* (1983), Weakley *et al* (1983) et Teller *et al* (1985).

L'examen de 90 données publiées (Le Hénaff 1991) montre que les protéines résiduelles ont tendance à s'enrichir en acides aminés ramifiés et s'appauvrir en arginine et en histidine comme le montre le déplacement des points vers la droite sur la figure 1. Ces évolutions peuvent s'expliquer par le fait que les liens peptidiques incluant un acide ramifié sont particulièrement difficiles à rompre (Hunt 1985) et que les acides aminés basiques sont particulièrement sensibles aux fermentations (Jones 2000).

Cette fraction alimentaire non dégradée conserve malgré tout le profil général de la protéine d'origine car, dans l'ensemble, le résidu d'incubation et la protéine d'origine sont assez proches sur le plan factoriel 1-2 (figure 1). Il convient surtout de remarquer que les modifications de profil en AA induites par le passage dans le rumen restent assez faibles en comparaison des différences de profils en AA existant entre les aliments usuels. De plus, de nombreux facteurs peuvent biaiser les résultats (durée d'incubation, pollution microbienne, perte de particules, etc). En conséquence, le profil retenu pour les protéines non dégradées dans le rumen est celui des protéines de chaque aliment.

Une base de profils moyens pour chaque aliment a donc été constituée et affectée à la fraction 'protéine alimentaire non dégradée'.

Figure 1. Effets du passage dans le rumen sur le profil en acides aminés des protéines alimentaires (Le Hénaff 1991).



Pour les aliments concentrés, les données proviennent des tables hollandaises (Veevoedertabel 1991), belges (Dubois et Vervack 1972), américaine et canadienne (NRC et Agriculture Canada 1971) et de la firme Protector (1980).

Pour les fourrages, les profils moyens ont été établis à partir d'analyses INRA (non publiées) et de données bibliographiques : graminées et prairies naturelles (n = 45), luzerne (n = 20), trèfle (n = 9) et ensilage de maïs (n = 13) (tableau 2).

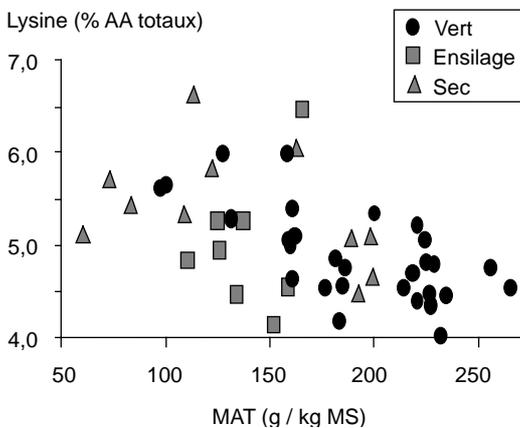
Pour une espèce fourragère donnée, la composition retenue est la même pour tous

les modes de conservation du fourrage (vert, ensilage, foin ; figure 2). Pour les graminées et les prairies naturelles, les différences de stade végétatif, d'âge et de fumure se traduisent par des différences de teneur en MAT qui entraînent des variations du profil en AA, comme pour la lysine (figure 2). Ces modifications ont été prises en compte en retenant trois profils moyens différents en fonction de la richesse en MAT du fourrage : un pour les fourrages contenant moins de 15% de MAT, un pour ceux contenant plus de 20% de MAT, et un pour ceux ayant des valeurs de MAT intermédiaires (tableau 2).

Tableau 2. Composition en acides aminés des fourrages (g/100 g d'AA déterminés).

	Graminées et prairies naturelles			Luzerne	Autres légumineuses	Ensilage de maïs
	MAT < 15%	15% < MAT < 20%	20% < MAT			
Lys	5,3	5,1	4,7	6,0	6,6	4,1
His	2,5	3,3	3,6	2,1	3,0	2,8
Arg	5,1	5,6	6,1	4,5	6,1	2,2
Thr	5,4	5,1	4,8	5,3	5,2	4,5
Val	7,0	6,7	6,8	6,2	6,2	5,9
Met	1,8	2,0	2,1	1,5	1,4	1,7
Ile	5,5	5,2	5,0	5,3	4,5	4,7
Leu	9,2	9,0	9,0	8,8	8,5	12,7
Phe	5,7	5,8	5,8	5,7	5,1	5,0
Asp	10,3	10,9	11,3	14,8	13,7	8,1
Ser	5,1	4,9	4,8	5,4	5,3	5,2
Glu	12,4	13,2	13,4	11,3	13,6	15,9
Pro	6,3	5,5	5,0	6,7	4,7	8,6
Gly	6,2	6,0	5,8	5,6	5,9	4,8
Ala	9,0	8,0	7,7	6,9	6,4	10,1
Tyr	3,3	4,0	4,2	3,9	3,7	3,6

Figure 2. Evolution de la teneur en lysine des graminées en fonction de leur teneur en MAT et de leur mode de conservation.



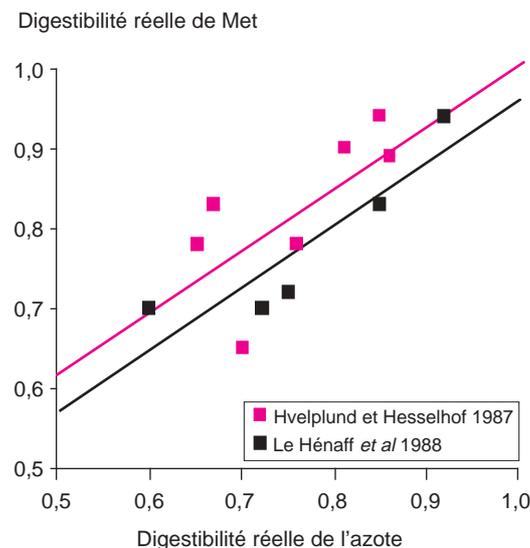
d / Profil de la fraction endogène

Pour les protéines endogènes provenant des pré-estomacs et de la caillette chez les ruminants, la seule composition en AA publiée est celle mesurée par Orskov *et al* (1986) sur des animaux nourris exclusivement par perfusion (cf tableau 1).

e / Digestibilité intestinale

Quelques essais utilisant soit la technique de perfusion duodénale et de collecte iléale (Hvelplund et Hesselholt 1987), soit la technique des sachets de Nylon mobiles dans l'intestin (Le Hénaff *et al* 1988, Weisbjerg *et al* 1996) montrent que la digestibilité intestinale des AA (cystine exceptée) n'est pas différenciée significativement de celle des protéines totales (figure 3). Comme pour un aliment donné, les digestibilités intestinales fluctuent peu entre acides aminés, nous avons appliqué les valeurs de digestibilité réelle du système PDI : 80 % pour les AA microbiens et la digestibilité réelle (dr) des PIA pour les acides aminés alimentaires. A l'avenir ces digestibilités pourraient éventuellement être modulées suivant les acides aminés.

Figure 3. Relation entre la digestibilité réelle intestinale d'un acide aminé et celle de la protéine.



1.3 / Validation de l'estimation du profil en AA des digesta postruminaux et bases d'ajustement

La validation de ces bases d'estimation ne peut pas être effectuée en terme d'éléments digestibles mais seulement à un stade intermédiaire en terme de profil en AA des protéines entrant dans l'intestin. Elle a donc été effectuée par comparaison entre les valeurs calculées avec les bases ci-dessus et les valeurs réellement déterminées dans des essais avec animaux fistulés.

La base de validation provenait de 10 laboratoires différents et comportait 133 rations dont 84 sur vaches laitières et 49 sur bovins en croissance (Rulquin *et al* 1998). Cette base ne comportait cependant que 16 acides aminés (Lys, Met, Ile, Leu, Val, Thr, Phe, Arg, His, Ser, Gly, Glu, Asp, Tyr, Pro). En effet la cystine et le tryptophane n'ont pas pu être inclus dans ce test car non dosés dans trop de situations. Bien entendu le calcul s'est arrêté au stade des AA entrant dans l'intestin et ne prenant pas en compte la digestibilité. Enfin le calcul des profils duodénaux incluait aussi la fraction endogène pour pouvoir être comparés valablement aux valeurs mesurées, bien que cette fraction ne soit ensuite pas prise en compte dans les valeurs AADI.

Avec les hypothèses de calcul précédemment décrites, les valeurs des teneurs en AA des contenus de l'intestin grêle sont en moyenne :

- prédites correctement (moins de 2 % de biais) pour l'histidine, la thréonine, la valine, l'isoleucine, la phénylalanine, l'acide aspartique et la sérine (tableau 3) ;
- sous-estimées modérément (2 à 5,8 %) pour la lysine, la leucine et la tyrosine, et de façon très importante pour la glycine (13 %) ;
- surestimées modérément (3 à 5,8 %) pour l'arginine, l'acide glutamique et la proline, et de façon plus importante pour l'alanine (6,7 %) et surtout la méthionine (12,3 %) (tableau 3).

Les biais existant entre la prédiction et la mesure pourraient provenir de certaines hypothèses retenues dans le choix de la composition en AA des différentes fractions protéiques. La surestimation systématique de la méthionine et la sous-estimation de la lysine pourraient révéler une contribution non négligeable des protozoaires (plus riches en lysine et plus pauvres en méthionine que les bactéries) aux protéines microbiennes entrant dans l'intestin. La sous-estimation de la leucine et la surestimation de l'arginine et de l'histidine pourraient refléter les différences de dégradabilité des acides aminés dans le rumen comme cela a déjà été mentionné précédemment. Comme ces remarques ne restent que des hypothèses et ne sont pas quantifiables, il paraît donc plus judicieux de corriger globalement les prédictions par des équations d'ajustement aux valeurs mesurées (tableau 3). Ce moyen ne permet toutefois pas d'éliminer les biais et la variabilité liés aux problèmes d'analyse des AA dans les pro-

Les compositions en AADI estimées ont été comparées aux compositions en AA mesurées sur les contenus digestifs issus de 133 rations, ce qui a conduit à intégrer des équations d'ajustement dans le calcul des valeurs AADI des aliments.

téines intestinales. Il convient en effet de noter que les moins bonnes prédictions concernent l'acide aminé le plus difficile à doser (la méthionine) et la glycine dont la part relative est très sensible à la présence de sels biliaires dans l'échantillon. Hormis ces deux acides aminés, l'application des ajustements permet d'estimer la composition des acides aminés entrant dans l'intestin grêle avec une précision suffisante.

En conclusion, la méthode de prédiction du profil en acides aminés des protéines intestinales qui est proposée doit être complétée par un jeu d'équations d'ajustement (valeurs a et b du tableau 3) pour pouvoir prédire au mieux les valeurs mesurées. Ces ajustements suppriment les biais et auront donc un effet important pour les aliments situés aux extrêmes de la gamme des valeurs comme l'illustre la figure 4.

Tableau 3. Estimation du profil en AA des contenus intestinaux. Écarts moyens aux valeurs mesurées et coefficients d'ajustement. D'après Rulquin et al (1998).

	Concentration intestinale (g/100 g AA déterminés)		Coefficients d'ajustement ⁽¹⁾			
	mesurée	calculée	Origine	Pente	R ²	CV
			a	b	partiel	résiduel
Lys	6,93	6,62	1,9	0,76	0,49	5,8
His	2,25	2,27	0,93	0,58	0,05	9,6
Arg	4,92	5,21	2,67	0,43	0,52	6,0
Thr	5,23	5,22	2,39	0,55	0,26	4,1
Val	6,00	6,05	1,82	0,69	0,19	5,6
Met	1,93	2,20	0,32	0,73	0,17	11,7
Ile	5,42	5,34	2,18	0,61	0,17	5,6
Leu	8,95	8,46	2,55	0,76	0,53	4,9
Phe	5,16	5,18	0,2	0,96	0,22	5,7
Asp	10,82	10,83	4,26	0,61	0,53	3,5
Ser	4,98	4,92	1,68	0,67	0,39	4,2
Glu	14,57	15,06	5,25	0,62	0,55	5,1
Pro	5,14	5,42	2,11	0,56	0,4	7,8
Gly	6,23	5,50	1,73	0,82	0,12	13,3
Ala	6,97	7,47	4,3	0,36	0,39	4,0
Tyr	4,42	4,24	ns	ns	0,02	7,9

⁽¹⁾ Concentration mesurée = a + (b x concentration calculée)

1.4 / Calcul des valeurs AADI des aliments

Avec l'hypothèse retenue actuellement d'égalité entre la digestibilité des protéines et

celle de chaque AA, il est possible d'effectuer le calcul des profils en partant directement des valeurs PDIA et PDIME. La valeur en AADI a donc été calculée de la façon suivante, en prenant comme exemple la lysine :

Calcul initial sur une base de 16 AA :

$$[X_{16}] = [Lys A_{16}] \times PDIA / PDIE + [Lys M_{16}] \times PDIME / PDIE \quad (1)$$

Ajustement :

$$Y_{16} = a + b \times [X_{16}] \quad (2)$$

idem pour chacun des 16 AA puis :

$$[Y_{16}] = Y_{16} \times 100 / \sum_{16AA} (Y_{16}) \quad (3)$$

Calcul final sur une base de 18 AA :

$$[Z_{18}] = [Y_{16}] \times (1 - [Cys_{18} + Trp_{18}] / 100) \quad [LysDI] = [Z_{18}] \quad (4)$$

où :

- [Lys A₁₆] et [Lys M₁₆] sont les teneurs en lysine (g pour 100) des protéines alimentaires (A) et microbiennes (M) calculées sur 16 AA ;

- a et b sont respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente des équations d'ajustement (tableau 3). Pour la tyrosine, la pente de l'ajustement a été fixée à 1 ;

- [Cys₁₈ + Trp₁₈] = (3,12 x PDIA + 2,68 x PDIME) x 100 / (PDIE + 3,12 x PDIA + 2,68 x PDIME) ; les valeurs 3,12 et 2,68 représentant les teneurs moyennes en cystine + tryptophane respectivement des aliments et des bactéries du rumen. La valeur 3,12 peut-être remplacée par la valeur mesurée lorsque celle-ci est disponible (exprimée en % des 18 AA) ;

- les valeurs entre [] représentent des teneurs en % de la base mentionnée ;

- les variables X, Y, Z sont des éléments intermédiaires du calcul.

Tableau 4. Exemple de calcul des valeurs AADI d'un tourteau de soja. Les valeurs des coefficients d'ajustement (*a* et *b*) et le profil de la fraction microbienne sont des paramètres invariants (valeurs en italique). Le profil de la fraction alimentaire est caractéristique de chaque aliment. (éq 1), (éq 2) ... se réfèrent aux équations données dans le texte.

	Ajustement		Profil des fractions		Calculs			AADI
	<i>a</i>	<i>b</i>	microbienne (%16)	aliment (%16)	[X16] (éq 1)	Y16 (éq 2)	[Y16] (éq 3)	(éq 4)
PDIA				207				
PDIE				263				
Lys	1,90	0,76	8,00	6,67	6,95	7,18	7,20	7,00
His	0,93	0,58	1,80	2,36	2,24	2,23	2,24	2,17
Arg	2,67	0,43	4,90	8,10	7,42	5,87	5,89	5,72
Thr	2,39	0,55	5,80	3,90	4,30	4,74	4,75	4,61
Val	1,82	0,69	6,20	5,23	5,44	5,58	5,59	5,43
Met	0,32	0,73	2,50	1,44	1,66	1,54	1,54	1,50
Ile	2,18	0,61	5,90	5,33	5,45	5,49	5,51	5,35
Leu	2,55	0,76	7,70	7,79	7,77	8,44	8,46	8,22
Phe	0,20	0,96	5,30	5,03	5,08	5,07	5,08	4,94
Asp	4,26	0,61	12,10	12,31	12,26	11,68	11,71	11,38
Ser	1,68	0,67	4,60	5,03	4,94	4,99	5,00	4,86
Glu	5,25	0,62	13,30	20,31	18,82	16,89	16,94	16,46
Pro	2,11	0,56	3,70	4,62	4,42	4,58	4,59	4,46
Gly	1,73	0,82	5,70	4,10	4,44	5,36	5,38	5,22
Ala	4,30	0,36	7,80	4,41	5,13	6,13	6,15	5,98
Tyr	0,30	1,00	4,70	3,38	3,66	3,96	3,98	3,86
Cys+Trp (%18)			2,68	3,12 ⁽¹⁾			2,91	2,83
Somme sur 16 AA			100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	97,2
Somme sur 18 AA							102,9	100,0

⁽¹⁾ Lorsqu'elle est disponible, la valeur réelle est à substituer à la valeur par défaut (3,12)

Les équations permettent d'estimer la valeur en acides aminés digestibles des aliments pour tous les acides aminés sauf pour la cystine et le tryptophane. Un exemple de calcul pour un nouvel aliment est donné au tableau 4.

Les valeurs en AADI pour les 9 acides aminés indispensables sont consignées dans les tables (encart dans ce numéro de la revue : Rulquin *et al* 2001b). Elles correspondent aux valeurs obtenues par les calculs précédents (équations 1 à 4) appliquées aux données des tables INRA (1988) et de la base de donnée sur la composition en acides aminés des matières premières mentionnée au paragraphe 1.2.c. Les profils exprimés en AADI reflètent ceux des protéines alimentaires pour les aliments riches en matières azotées peu dégradables, mais en différent sensiblement pour les autres aliments. Ainsi le corn gluten meal reste l'aliment le plus riche en MetDI et un des plus pauvre en LysDI (figure 5). Par ailleurs, les fourrages ont des valeurs MetDI et LysDI proches des céréales et des tourteaux (figure 5), mais, comme leurs valeurs PDIE sont bien entendu inférieures, leur contribution à un rééquilibrage en AA de la ration reste modeste.

Il est à noter que le calcul pour un nouvel aliment nécessite de connaître ses valeurs

PDIA et PDIE ainsi que son profil en acides aminés (au moins 16 AA). L'extrapolation à partir des tables est très compliquée ou impossible et ne correspond pas à une proportionnalité directe.

Figure 4. Effets de l'ajustement des valeurs calculées de lysine sur la prédiction des teneurs en lysine des contenus intestinaux.

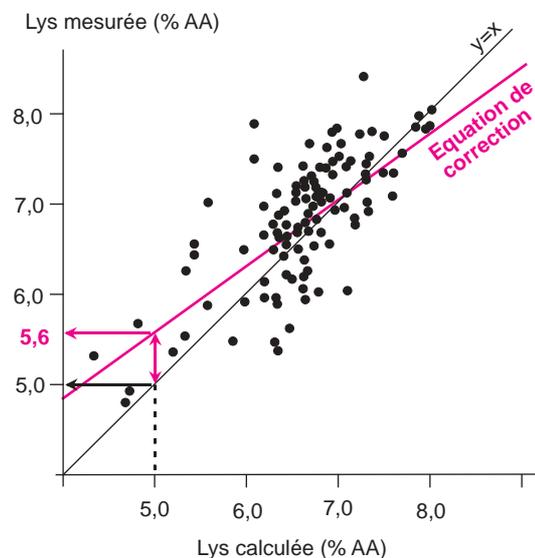
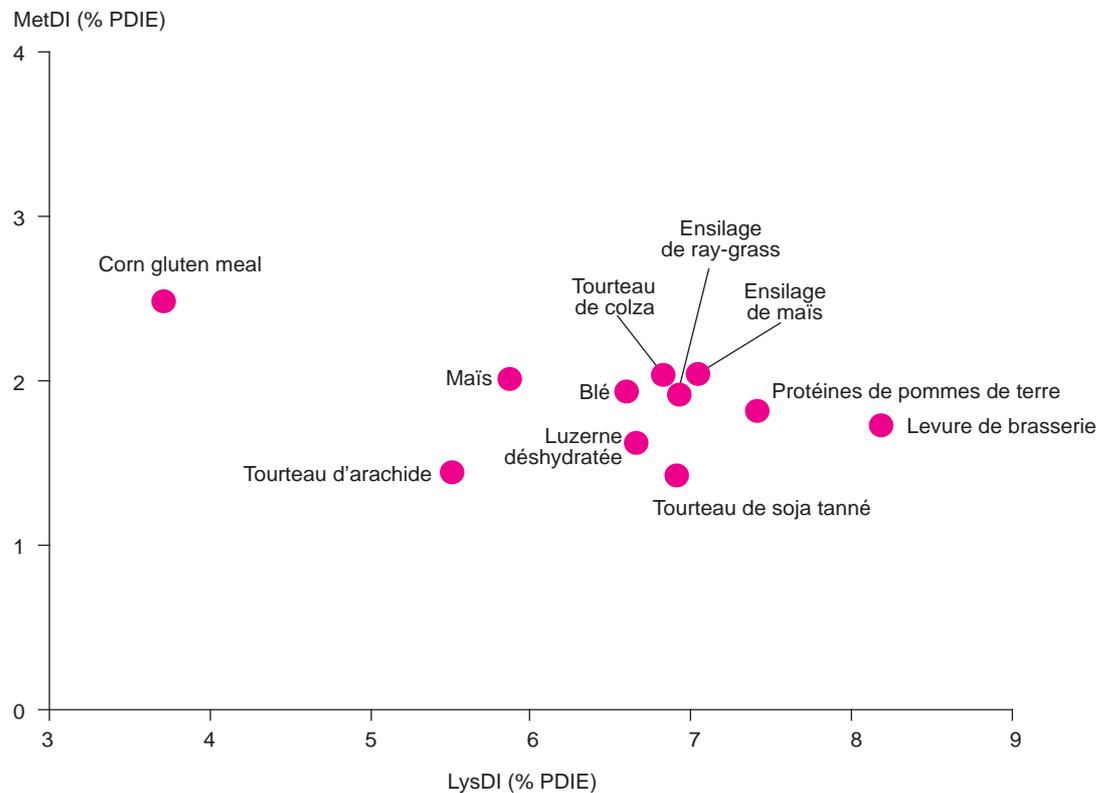


Figure 5. Valeurs LysDI et MetDI de quelques aliments.



2 / Recommandations d'apport en AADI pour les vaches laitières

Si les apports peuvent être calculés pour la plupart des acides aminés, les recommandations d'apport ne sont bien établies que dans le cas de la lysine et de la méthionine. Par ailleurs, encore plus que pour les apports UF et PDI, il est préférable de parler de recommandations d'apport plutôt que de besoins.

2.1 / Recommandations d'apport en LysDI et MetDI

Les recommandations d'apport ont été définies d'après les courbes des réponses (164 essais) de la production de protéines et du taux protéique du lait aux variations des teneurs en LysDI et MetDI des PDI (Rulquin *et al* 1993) calculées d'après les tables. Elles ont été fixées en se situant à une réponse inférieure de 0,5 kg lait (16 g protéines) à la valeur donnée par l'asymptote de la relation. En effet cette réponse maximale correspondrait à un apport infini et est imprécise ; la valeur retenue correspond encore à une zone de rendement marginal très faible.

Ces recommandations s'établissent respectivement à 7,3 et 2,5 % pour LysDI et MetDI. Elles sont assez proches de celles déterminées expérimentalement sur un petit nombre d'animaux par Le Hénaff (1991) et Schwab *et al* (1992) pour la lysine et par Socha *et al* (1994a et 1994b) et Pisulewski *et al* (1996) pour la méthionine. Les besoins récemment adoptés (7,24 et 2,38 % des protéines métabolisables pour la lysine et la

méthionine) par le NRC (NRC 2001) sont d'ailleurs très proches des valeurs recommandées en France.

Des considérations pratiques et économiques nous ont amenés à fixer un seuil d'alerte au-dessus duquel il ne semble pas nécessaire actuellement de se préoccuper du problème de l'équilibre en AADI de la ration. En revanche en dessous de ce seuil la question mérite d'être posée, même si une action de rééquilibrage ne sera pas pour autant toujours envisagée. Ces seuils se situent respectivement à 6,8 pour la lysine et 2,1 pour la méthionine. Ces valeurs correspondent à une réponse inférieure de 1 kg de lait (32g de protéines) à la valeur de l'asymptote pour les raisons évoquées ci-dessus.

Ces recommandations sont valables après le pic de lactation car les courbes de réponse précédentes ont été établies sur des essais commençant après la 6ème semaine de lactation ; elles pourraient être légèrement différentes en début de lactation. Les quelques essais réalisés en début de lactation révèlent une augmentation de la production laitière, accompagnée ou non d'une augmentation du taux protéique (Rulquin 1992, Armentano *et al* 1993, Socha *et al* 1994c). Ces essais ne sont malheureusement pas assez nombreux pour établir des courbes de réponse distinctes.

2.2 / Recommandations d'apport en autres AADI

Les données ne sont pas assez nombreuses pour que l'on puisse donner actuellement des recommandations précises pour les acides aminés autres que la méthionine et la lysine.

Les apports recommandés en AADI ne sont bien établis que pour la lysine et la méthionine. Ils ont été définis d'après les courbes de réponse des protéines du lait de 164 essais.

En se basant sur les premiers éléments disponibles sur les réponses du taux protéique aux variations des apports en AADI (Rulquin *et al* 2001a), il semble que les recommandations se situeront :

- entre 2,5 et 3,2 % pour l'histidine ;
- au-dessus de 8,8 % pour la leucine ;
- au-dessus de 5,3 % pour la valine ;
- au-dessus de 5 % pour l'isoleucine ;
- entre 4 et 5 % pour le phénylalanine ;
- au-dessus de 4 % pour la thréonine ;
- au-dessus de 4,3 % pour l'arginine.

Conclusion

Le système AADI constitue une avancée pour optimiser la composition des PDI pour améliorer le taux protéique du lait. C'est un premier pas vers la notion de protéine idéale. Ce système est évolutif, il devra à l'avenir mieux prendre en compte les différences de composition en AA des fourrages, les différences de digestibilité entre acides aminés. Toutefois, la partie la plus difficile et la plus longue sera d'obtenir une meilleure description des courbes de réponse aux apports d'acides aminés limitant autres que la méthionine et la lysine.

Références

- Armentano L.E., Swain S.M., Ducharme G.A., 1993. Lactation response to ruminally protected methionine and lysine at two amounts of ruminally available nitrogen. *J. Dairy Sci.*, 76, 2963-2969.
- Crooker B.A., Clark J.H., Shanks R.D., Fahey G.C., 1987. Effects of ruminal exposure on the amino acid profile of feeds. *Can. J. Anim. Sci.*, 67, 1143-1148.
- Dubois C., Vervack W., 1972. Introduction aux tables de composition en acides aminés des aliments fourragers à la ferme en Belgique, ainsi que des matières utilisées dans l'industrie de l'alimentation animale. In : Gars (ed), Protéines et Acides Aminés en Alimentation Humaine et Animale, 736-764. London, England.
- Ganev G., Orskov E.R., Smart R., 1979. The effect of roughage or concentrate feeding and rumen retention time on total degradation of protein in the rumen. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, 93, 651-656.
- Grenet E., Breton A., Fonty G., Barry P., Rémond B., 1988. Influence du régime alimentaire sur la population fongique anaérobie du rumen. *Reprod. Nutr. Dev.*, 28, 127-128.
- Guilloteau P., 1986. Digestion des protéines chez le jeune ruminant. Thèse de doctorat ès-sciences, Université Paris VI, 246 p.
- Harrison D.G., Beever D.E., Osbourn D.F., 1979. The contribution of protozoa to the protein entering the duodenum of sheep. *Br. J. Nutr.*, 41, 521-527.
- Hunt S., 1985. Degradation of amino acids accompanying in vitro protein hydrolysis. In : G.C. Barrett (ed), Chemistry and biochemistry of the amino acids, 376-398. Chapman and Hall, London, England.
- Hvelplund T., 1986. The influence of diet on nitrogen and amino acid content of mixed rumen bacteria. *Acta Agric. Scand.*, 36, 325-331.
- Hvelplund T., 1987. Amino acid content of feed and microbial protein and their intestinal digestibility. In : R. Jarrige et G. Alderman (eds), Feed Evaluation and Protein Requirement Systems for Ruminants, 159-169. Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
- Hvelplund T., Hesselholt M., 1987. Digestibility of individual amino acids in rumen microbial protein and undegraded dietary protein in the small intestine of sheep. *Acta Agric. Scand.*, 37, 469-477.
- INRA, 1988. Alimentation des bovins, ovins & caprins. Institut National de la Recherche Agronomique, Paris, 471 p.
- Jones R., 2000. Understanding the processes of protein degradation in forage crops provides opportunities for improved silage quality and enhanced animal production. In : T.P. Lyons et K.A. Jacques (eds), Biotechnology in the feed industry, 423-437. Nottingham University Press, Nottingham, England.
- Le Hénaff L., 1991. Importance des acides aminés dans la nutrition des vaches laitières. Thèse de docteur 3e cycle, Université Rennes I, 125 p.
- Le Hénaff L., Rulquin H., Peyraud J.L., 1988. Etude de la disparition des acides aminés alimentaires dans le rumen et dans l'intestin à l'aide de la méthode des sachets nylon. *Reprod. Nutr. Dev.*, 28 (Suppl. 1), 133-134.
- Leng R.A., 1982. Dynamics of protozoa in the rumen of sheep. *Br. J. Nutr.*, 48, 399-415.
- NRC, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. National Academy Press, Washington, USA, 381 p.
- NRC Agriculture Canada, 1971. Atlas of nutritional data on United States and Canadian feeds. National Academy of Sciences, Washington, USA, 772 p.
- Orskov E.R., 1982. Rumen microorganisms. In : E.R. Orskov (ed), Protein nutrition of ruminants, 20-39. Academic Press Inc., London, England.
- Orskov E.R., McLeod N.A., Kyle D.J., 1986. Flow of nitrogen from the rumen and abomasum in cattle and sheep given protein-free nutrients by intragastric infusion. *Br. J. Nutr.*, 56, 241-248.
- Pisulewski P.M., Rulquin H., Peyraud J.L., Vérité R., 1996. Lactational and systemic responses of dairy cows to post-ruminal infusions of increasing amounts of methionine. *J. Dairy Sci.*, 79, 1781-1791.
- Protector C.E.I., 1980. Tables de composition des matières premières destinées à l'alimentation animale. 1 Valeurs chimiques. Aliments Protector S.A.Ed., Bruxelles, 84 p.
- Rooke J.A., Greife H.A., Armstrong D.G., 1984. The effect of in sacco rumen incubation of a grass silage upon the total and D-amino acid composition of the residual silage dry matter. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, 102, 695-702.
- Rulquin H., 1992. Intérêts et limites d'un apport de méthionine et de lysine dans l'alimentation des vaches laitières. *INRA Prod. Anim.*, 5, 29-36.
- Rulquin H., Vérité R., 1993. Amino acid nutrition of dairy cows: productive effects and animal requirements. In : Garnsworthy P.C. and Cole D.J.A. (eds), Recent Advances in Animal Nutrition, 55-77. Proceed. 27th Univ. Nottingham Feed Manufacturers Conf., 6-8th jan 1993. Nottingham University Press.
- Rulquin H., Guinard J., Pisulewski P., Vérité R., 1993. Le système en lysine et méthionine digestible. Journées AFTAA-CAAA, 22-23 juin 1993, Le Mans, France. 16 p.
- Rulquin H., Guinard J., Vérité R., 1998. Variation of amino acid content in the small intestine digesta of cattle: development of a prediction model. *Livest. Prod. Sci.*, 53, 1-13.
- Rulquin H., Vérité R., Guinard-Flament J., Pisulewski P.M., 2001a. Acides aminés digestibles dans l'intestin. Origines des variations chez les ruminants et répercussions sur les protéines du lait. *INRA Prod. Anim.*, 14, 201-210.
- Rulquin H., Vérité R., Guinard-Flament J., 2001b. Tables des valeurs AADI des aliments des ruminants. *INRA Prod. Anim.*, 14, supplément octobre, 16 p.

Rulquin H., Pisulewski P.M., Vérité R., Guinard J., 1993. Milk production and composition as a function of post-ruminal lysine and methionine supply : a nutrient-response approach. *Livest. Prod. Sci.*, 37, 69-90.

Schwab C.G., Bozak C.K., Whitehouse N.L., Olson V.M., 1992. Amino acid limitation and flow to the duodenum at four stages of lactation. 2. Extent of lysine limitation. *J. Dairy Sci.*, 75, 3503-3518.

Socha M.T., Schwab C.G., Putnam D.E., Whitehouse N.L., Kierstead N.A., Garthwaite B.D., Ducharme G.A., 1994a. Determining methionine requirements of dairy cows during peak lactation by post-ruminally infusing incremental amounts of methionine. *J. Dairy Sci.*, 77 (Suppl. 1), 92 (abstract).

Socha M.T., Schwab C.G., Putnam D.E., Whitehouse N.L., Kierstead N.A., Garthwaite B.D., Ducharme G.A., 1994b. Determining methionine requirements of dairy cows during mid-lactation by post-ruminally infusing incremental amounts of methionine. *J. Dairy Sci.*, 77 (Suppl. 1), 93 (abstract).

Socha M.T., Schwab C.G., Putnam D.E., Whitehouse N.L., Kierstead N.A., Garthwaite B.D., Ducharme G.A., Robert J.C., 1994c. Production responses of early lactation cows fed rumen-stable methionine and rumen-stable lysine plus methionine at two levels of dietary crude protein. *J. Dairy Sci.*, 77 (Suppl. 1), 93 (abstract).

Steinhour W.D., Stokes M.R., Clark J.H., Rogers J.A., Davis C.L., 1982. Estimation of the proportion of non-ammonia-nitrogen reaching the lower gut of the ruminant derived from bacterial and protozoal nitrogen. *Br. J. Nutr.*, 48, 417-431.

Teller E., Godeau J.-M., Van Nevel C.J., Demeyer D.I., 1985. Comparative *in vitro* and *in vivo* evaluation of protein degradability in the rumen using soybean meal and pruteen. *Z. Tierphysiol., Tierernährg.u.Futtermittelkde.*, 54, 121-130.

Varvikko T., 1986. Microbially corrected amino acid composition of rumen-undegraded feed protein and amino acid degradability in the rumen of feeds enclosed in nylon bags. *Br. J. Nutr.*, 56, 131-140.

Varvikko T., Lindberg J.E., Setälä J., Syrälä-Qvist L., 1983. The effect of formaldehyde treatment of soya-bean meal and rapeseed meal on the amino acid profiles and acid-pepsin solubility of rumen undegraded protein. *J. Agric. Sci. (Camb.)*, 101, 603-612.

Veevoedertabel, 1991. Chemische samenstelling, verterbaarheid en voederwaarde van voedermiddelen. Centraal Veevoederbureau, Lelystad, The Netherlands, 475 p.

Vérité R., Peyraud J.L., 1988. Nutrition azotée. In : R. Jarrige (ed), *Alimentation des Bovins, Ovins & Caprins*, 75-93. INRA, Paris, France.

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.

Weakley D.C., Stern M.D., Satter C.D., 1983. Factors affecting disappearance of feedstuffs from bags suspended in the rumen. *J. Anim. Sci.*, 56, 493-505.

Weisbjerg M.R., Hvelplund T., Hellberg S., Olsson S., Sanne S., 1996. Effective rumen degradability and intestinal digestibility of individual amino acids in different concentrates determined *in situ*. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 62, 179-188.

Weller R.A., Pilgrim A.F., 1974. Passage of protozoa and volatile fatty acids from the rumen of the sheep and from a continuous *in vitro* fermentation system. *Br. J. Nutr.*, 32, 341-351.

Abstract

Amino acids truly digestible in the small intestine : the AADI system for the dairy cow.

This new AADI system is integrated into the PDI system by estimating the composition in amino acids of the PDI. The feedstuff values are estimated from 1/ the amount of duodenal microbial and undegraded feed protein, 2/ their amino acids (AA) composition and 3/ their intestinal digestibility. This estimate was validated by comparison to the AA profile of digestive contents from 133 diets. As a consequence, some adjustments should be made to improve the initial estimates; relevant equations are given. This work permitted to draw up a table of nearly 700 feedstuffs giving contents of intestinally digestible amino acids for each of 9 essential AA.

These values were used to establish the dose-response curves of milk protein production and content to different levels of several AADI. The recommended allo-

wances for any AA are given as a percentage of PDIE supply. In dairy cows, methionine and lysine are generally most limiting AA; recommended allowances could be established with some confidence at 7.3 % LysDI % PDIE and 2.5 MetDI % PDIE. However practical and economical considerations led to the idea that one could pay attention to LysDI and MetDI shortages mainly when supplies are below critical levels set at 6.8 % LysDI and 2.1 % MetDI. The values for other AADI are not so well established; they could be at least 8.8% for LeuDI and within the range 2.5-3.2 % for HisDI, that are possibly limiting in some situations.

RULQUIN H., VÉRITÉ R., GUINARD-FLAMENT J., 2001. Acides aminés digestibles dans l'intestin. Le système AADI et les recommandations d'apport pour la vache laitière. *INRA Prod. Anim.*, 14, 265-274.