

Y. HENRY

INRA Saint-Gilles
Station de Recherches Porcines
35590 L'Hermitage

Signification de la protéine équilibrée pour le porc : intérêt et limites

Lorsqu'on parle d'amélioration de l'équilibre en acides aminés dans l'alimentation du porc, grâce à l'emploi des acides aminés industriels, on pense à l'économie de protéines qui en résulte, consécutive à l'abaissement de la teneur en protéines du régime. Pourquoi alors s'intéresser à cette question, alors que la conjoncture économique présente n'y est pas favorable ? Pourtant, la capacité de production de lysine industrielle en France atteint 40 000 tonnes et la thréonine bénéficie d'une production installée de 300 à 1 000 tonnes. La lysine est utilisée de manière courante dans les aliments pour porcs, pour des raisons techniques, indépendantes des prix des sources azotées, et la thréonine commence à entrer dans certaines applications. La présente revue a précisément pour but de montrer l'intérêt de la protéine équilibrée comme moyen d'optimiser les performances de production de viande maigre pour un coût alimentaire amoindri.

L'histoire de l'alimentation azotée du porc a été marquée par trois étapes principales. Dépassant la notion d'apport global de protéines, dans leur totalité en provenance des composants naturels du régime, on en est

venu dans un premier temps, vers les années 60, à distinguer dans le besoin protéique les acides aminés indispensables et l'apport global de protéines indépendamment les uns des autres, tandis que la couverture du besoin azoté était assurée simplement par l'apport de l'acide aminé le plus limitant du régime, généralement la lysine dans le cas du porc. La supplémentation en lysine industrielle permettait de maintenir le même niveau de performances au profit d'une réduction du taux de protéines. Il s'agissait là d'un premier progrès dans l'amélioration de l'équilibre en acides aminés.

Le problème, en réalité, est de savoir jusqu'où on peut aller dans l'amélioration de cet équilibre en acides aminés en apportant, en plus de la lysine, d'autres acides aminés limitants sous forme libre, la méthionine, le tryptophane ou la thréonine, seuls ou en combinaison, afin d'abaisser encore davantage le taux de protéines jusqu'à une situation idéale où les acides aminés se trouvent dans les protéines dans un équilibre parfait. Ceci a conduit, dans une troisième étape, vers les années 80, à la notion de "protéine idéale", et du même

Résumé

Après une première globalisation sur la base de la teneur en protéines du régime, le besoin azoté du porc en croissance a pris une signification composite par la prise en compte des besoins en acides aminés indispensables séparément les uns des autres, pour aboutir finalement à la notion de besoin en protéine équilibrée présentant une composition constante en acides aminés. L'amélioration de l'équilibre en acides aminés, associée à une réduction du taux de protéines dans l'aliment, est désormais rendue possible par la supplémentation à l'aide d'acides aminés industriels : en premier lieu la lysine seule, qui est généralement l'acide aminé le plus limitant des aliments pour porcs, puis la lysine avec les autres acides aminés limitants secondaires (thréonine, tryptophane, méthionine). En dehors de leur caractère limitant, des cas d'excès de certains acides aminés peuvent se présenter : déséquilibre entre acides aminés ramifiés, excès d'arginine, déséquilibre entre les acides aminés neutres qui pourrait expliquer l'effet dépressif d'un taux de protéines excessif sur l'ingestion alimentaire. Dans un deuxième temps, nous avons analysé les limites du concept de la protéine équilibrée : non constance de la composition en acides aminés des protéines fixées, différences dans le devenir métabolique des acides aminés, nécessité de prendre en compte la disponibilité des acides aminés. Par ailleurs, en dehors de l'économie de protéines, les bénéfices à attendre de l'amélioration de l'équilibre en acides aminés s'étendent à l'économie d'énergie alimentaire et à une stimulation de la consommation volontaire d'aliment, ce qui permet de viser tout à la fois un abaissement du coût de l'alimentation et une valorisation optimale des potentialités des génotypes à forte intensité de dépôt de tissus maigres.

Synthèse élaborée à la suite d'un exposé présenté à la Journée d'information de l'Association Française des Techniciens de l'Alimentation Animale (AFAA), "Quoi de neuf en matière d'acides aminés industriels ?", le 14 mai 1986 à Paris.

coup à un concept unitaire du besoin azoté, où les besoins en acides aminés présentent entre eux des rapports constants. Cette notion de besoin en "protéine idéale" a été largement développée par les chercheurs anglais (ARC, 1981), avant même de pouvoir disposer véritablement des moyens, c'est-à-dire de nouveaux acides aminés produits industriellement (thréonine, tryptophane), pour la mettre en œuvre.

Notre propos est précisément de montrer l'intérêt et les limites de la prise en compte de rapports constants entre les acides aminés, tant pour l'établissement du besoin protéique du porc en croissance que pour caractériser une protéine parfaitement équilibrée qui lui est finalement destinée. Plus généralement, la question est de savoir ce qu'on peut espérer de l'amélioration de l'équilibre en acides aminés par l'apport supplémentaire d'acides aminés industriels.

1 / Justification de la "protéine idéale" : un point d'histoire

L'idée de la "protéine idéale" est déjà ancienne, puisque Mitchell en faisait état dès 1950. Les travaux de Williams *et al* (1954) à l'Université Cornell (U.S.A.), cités par Rérat et Lougnon (1965), permettaient d'observer une bonne correspondance entre le profil de composition en acides aminés (AA) des protéines de l'organisme entier du porc et celui des besoins correspondants estimés pour la croissance. A partir du besoin connu en lysine, ils concluaient ainsi à la possibilité de prévoir les besoins pour les autres acides aminés, sur la base de rapports constants entre eux et le besoin en lysine. Cette méthode de détermination des besoins en AA basée sur l'analyse des tissus est décrite dans la revue de Rérat et Lougnon (1965) sur les besoins en AA du porc en croissance. Elle est ensuite tombée dans l'oubli, car on disposait alors de connaissances très limitées sur les variations de la composition en AA des protéines fixées au cours de la croissance, ainsi que sur le devenir métabolique des AA. Le risque était grand de passer trop vite aux applications et on préférait raisonner les besoins en AA indispensables séparément les uns des autres par des essais de supplémentation.

Trente ans ont passé, lorsque vers les années 80, les chercheurs anglais ont remis à l'honneur la notion de "protéine idéale", qui a servi de fondement pour l'établissement des recommandations azotées pour le porc dans le cadre de l'ARC (1981) : tableau 1. Entre-temps, un certain nombre de travaux (Wiesemüller et Poppe 1974, Oslage et Schulz 1977, voir revue de Henry, 1981) avaient confirmé une relative constance de la composition en AA des protéines de l'organisme entier du porc en croissance (entre 20 et 100 kg de poids vif), hormis le cas du tout jeune porcelet (tableau 2), et ceci en dépit de fluctuations importantes dans la distribution des compartiments corporels et la composition des protéines en AA d'un compartiment à l'autre. De la même façon, des différences entre races (Landrace français, Landrace belge et Piétrain) dans la composition en AA des protéines musculaires (Duée *et al* 1980) n'ont pu être mises en évidence. La constance de la composition globale des protéines corporelles en AA peut surprendre. Elle est en tout cas le résultat heureux d'un effet tampon de l'association de compartiments protéiques corporels de nature hétérogène, un résultat porteur de simplification et de commodité pour une représentation globale et synthétique du besoin azoté du porc en croissance. A cet égard, il est intéressant de souligner la remarquable similitude des profils de composition en AA des protéines de l'organisme entier du porc en croissance et du lait de truie (tableau 1).

De la notion de protéine idéale, on a retenu l'existence de rapports constants entre les besoins en AA par référence à la lysine, qui constitue généralement le facteur limitant primaire des associations de protéines consommées par le porc et dont le besoin a de ce fait été beaucoup étudié et est relativement bien connu.

Ceci a servi de base pour l'établissement des recommandations azotées les plus récentes (NRC 1979, ARC 1981, INRA 1984, DLG 1984), conduisant à un concept unitaire du besoin azoté. Ces ratios AA-lysine ont été confirmés pour l'essentiel par les résultats des expérimentations sur les besoins. Ceux retenus pour les recommandations de l'INRA (1984) sont rapportés dans

Tableau 1. Profil de composition en acides aminés de la "protéine idéale" pour le porc en croissance (ARC 1981).

Acide aminés indispensables	Teneurs en acides aminés % "Protéine idéale" (1)	Rapport acides aminés/lysine (référence 100)	
		Organisme entier	Lait de truie (4)
Lysine	7,0	100	100
Thréonine	4,2	60	55
Tryptophane	1,0	15	nd
Méthionine + Cystine	3,5	50	50
Isoleucine	3,8	55	55
Leucine	7,0	100	115
Valine	4,9	70	80
Histidine	2,3	33	35
Phénylalanine + Tyrosine	6,7	96	107
Arginine	(6,7) (2)	(96)	65
Σ AAI (3)	47,1		

(1) Composition moyenne en acides aminés des protéines de l'organisme entier au cours de la croissance du porc.

(2) Selon OSLAGE et SCHULZ (1977), cités par HENRY (1981).

(3) Somme des AA indispensables et semi-indispensables (cystine, tyrosine).

(4) A partir de la composition moyenne en acides aminés du lait de truie (DUEE et JUNG 1973, cités par DUEE et HENRY 1986) ; nd : non dosé.

Tableau 2. Evolution des teneurs en acides aminés des protéines corporelles (g/16 gN) chez le porc en fonction de l'âge (OSLAGE et SCHULZ 1977, cités par HENRY 1981).

Stade de croissance	Naissance	4 kg de poids vif	20-110 kg de poids vif
Lysine	6,0	6,8	7,2
Thréonine	3,3	3,8	3,9
Méthionine	1,8	1,9	2,1
Cystine	1,4	1,5	1,3
Isoleucine	2,8	3,5	3,8
Leucine	6,2	7,4	7,6
Valine	4,1	4,9	4,7
Histidine	2,2	2,7	3,0
Phénylalanine	3,1	3,6	3,8
Tyrosine	2,2	2,3	2,8
Arginine	6,3	6,9	6,7
Σ AAI (1)	39,4	45,3	46,8

(1) Somme des acides aminés indispensables (sans tryptophane) et semi-indispensables.

le tableau 3. Le porc n'est pas une espèce particulière de ce point de vue, bien que la notion de protéine idéale lui ait été particulièrement destinée.

On aboutit ainsi à une protéine parfaitement équilibrée dont le pourcentage de lysine a bénéficié d'un relèvement progressif jusqu'à la limite supérieure de 7 % dans la protéine idéale. Comment parvenir à cet équilibre optimal ? Ceci nous conduit à considérer l'évolution du rapport lysine/protéines en fonction du taux de protéines dans le régime, et de ce fait à examiner les moyens permettant de tendre vers la protéine équilibrée, par la réduction des excès, soit des protéines globalement, c'est-à-dire des acides aminés les moins limitants, soit de certains acides aminés particuliers.

2 / Stratégie d'amélioration de l'équilibre en acides aminés des protéines du régime

2.1 / Réduction de l'excès global de protéines

L'apport des acides aminés limitants, primaires puis secondaires (dans l'ordre des déficits), sous forme libre, permet de viser une réduction du taux global de protéines dans le régime et de limiter ainsi les apports excessifs des acides aminés les moins limitants, tout en maintenant les performances à leur niveau optimal.

A l'aide d'un exemple représenté par un régime renfermant un mélange de céréales et du tourteau de soja, nous avons illustré l'évolution du rapport lysine/protéines, qui constitue un index de qualité des protéines alimentaires, ainsi que des rapports AA limitants secondaires/lysine, en fonction du taux de protéines dans le régime, en l'absence ou en présence de supplémentation en lysine sous forme libre. Comme le montre la figure 1a, le pourcentage de lysine dans les protéines augmente de 4,0 pour 12 % de protéines, à 4,5 pour 14 % et 5,0 pour un taux de 17 % de protéines, qui permet de satisfaire le besoin de lysine (0,85 % de l'aliment) pour le porc en croissance entre 20 et 50 kg de poids vif. Les variations des rapports thréonine/lysine, tryptophane/lysine et (méthionine + cystine)/lysine sont décrites par rapport aux niveaux correspondants des besoins qui se situent en dessous des apports du régime, même pour les taux élevés de protéines.

Tableau 3. Rapports recommandés entre les besoins en acides aminés indispensables chez le porc en croissance (par référence à la lysine : 100).

Lysine	100
Thréonine (1)	60-65
Tryptophane	18
Méthionine + Cystine	60
Méthionine (2)	30
Isoleucine	60
Leucine	72
Valine	70
Histidine	26
Phénylalanine + Tyrosine	100
Arginine (3)	45
Source : I.N.R.A. (1984)	

(1) Au moins 60 % du besoin en lysine, d'après les acquisitions récentes.

(2) Sur la base d'au moins 50 % de méthionine dans l'apport total d'acides aminés soufrés, comme semblent l'indiquer les résultats récents.

(3) A partir du besoin défini par SOUTHERN et BAKER (1983).

Si l'on compare la thréonine et les acides aminés soufrés (méthionine + cystine), on peut remarquer que l'apport de thréonine est relativement plus limitant que celui des acides aminés soufrés aux taux de protéines les plus bas, tandis que les acides aminés soufrés sont relativement plus limitants aux taux de protéines plus élevés, ceci en raison des différences de profils de composition en AA des protéines de céréales et de soja.

Une supplémentation simple en lysine sous forme libre, pour couvrir le besoin en cet acide aminé, lorsqu'elle est associée à une réduction de la teneur en protéines par rapport au taux de 17 % qui assure la couverture du besoin en lysine sans supplémentation (0,85 % du régime), se traduit bien entendu par un accroissement du rapport lysine/protéines, accompagné d'une diminution des rapports thréonine/lysine, tryptophane/lysine et (méthionine + cystine)/lysine (figure 1b). Le niveau de supplémentation en lysine, donc la réduction du taux de protéines qui lui est associée, est déterminé par le seuil de l'acide aminé limitant secondaire permettant de couvrir sans risque le

Figure 1. Evolution du rapport lysine/protéines et des rapports acides aminés/lysine en fonction du taux de protéines dans le régime :

a / sans supplémentation en lysine sous forme libre, b / avec supplémentation en lysine sous forme libre.

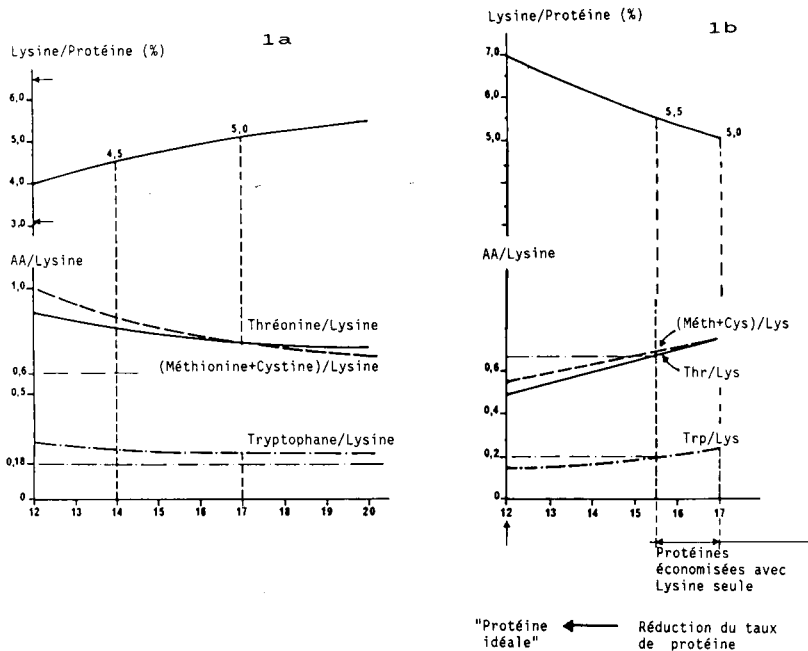
Exemple d'un régime à base d'un mélange de céréales (1/3 maïs - 1/3 blé - 1/3 orge) et tourteau de soja chez le porc en croissance : mélange de céréales à 10 % de protéines (Nx6,25) et 3,1 g lysine/kg ; tourteau de soja 47,5 % de protéines et 31 g lysine/kg. Taux de lysine dans le régime : 0,85 %.

Lys. : lysine ; Thr. : thréonine ; Trp. : tryptophane ; Met. + Cys. : méthionine + cystine.

1.a / Les valeurs extrêmes du rapport lysine/protéines sont représentées par les céréales seules et le tourteau de soja seul. Lignes en trait interrompu : valeurs des besoins en AA par rapport à la lysine.

1.b / Lignes en trait interrompu : rapports AA/lysine majorés d'une marge de sécurité de 10 % pour tenir compte des variations de disponibilité des AA dans les aliments : 0,65 pour thr/lys et 0,20 pour trp/lys. Entre 17 et 15,5 % de protéines, supplémentation en lysine seule : protéines économisées = 1,5 point avec 0,1 % L-lysine HCl. En dessous de 15,5 % de lysine : supplémentations combinées en lysine et en acides aminés limitants secondaires (lys, puis dans l'ordre thr, thr + trp, thr + trp + (met + cys)).

La supplémentation en lysine permet de réduire la teneur en protéines du régime. Le niveau de supplémentation en lysine, donc la réduction du taux de protéines qui lui est associée, est déterminé par le seuil de l'acide aminé limitant secondaire.



besoin correspondant. Dans le cas présent, la thréonine et le tryptophane paraissent également limitants au taux de 15,5 % de protéines : ceci se traduit par une diminution du taux de protéines de l'ordre de 1,5 point, pour un apport de 0,1 % de lysine commerciale (L-lysine. HCl). Cette réduction peut être portée à 2 points de protéines, mais dans ce cas on peut craindre un apport marginal d'AA limitant secondaire, surtout lorsqu'on se trouve dans une situation de moindre disponibilité des AA du régime.

Une réduction supplémentaire du taux de protéines peut être obtenue en procédant à des supplémentations combinées comprenant, en plus de la lysine, la thréonine et le tryptophane et, à partir d'un certain seuil de protéines, la méthionine.

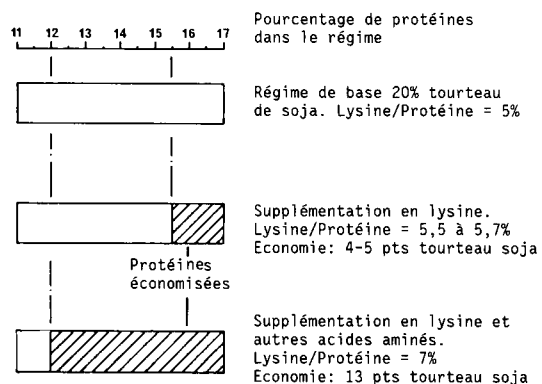
Le stade ultime de la protéine équilibrée ou "idéale" est atteint pour une ration comportant environ 12 % de protéines à 7 % de lysine. Ceci correspond à une économie potentielle de 5 points de protéines, mais pour cela il est nécessaire d'associer à la lysine d'autres AA industriels nouveaux (thréonine, tryptophane). Deux

étapes sont ainsi à considérer dans l'amélioration de l'équilibre en AA et la réalisation d'une économie de protéines, selon que l'on considère la supplémentation en lysine seule, permettant de franchir le niveau 5,5-5,7 % du rapport lysine/protéines, ou les supplémentations multiples (lysine, thréonine, tryptophane, méthionine) permettant d'atteindre le niveau ultime de 7 % (fig. 2).

Si l'on prend en compte le pourcentage d'acides aminés indispensables totaux (Σ AAI) dans les protéines fixées dans l'organisme (47 % : tableau 1), le rapport protéines totales/ Σ AAI est donc au minimum de 2,1 pour les besoins. Sur la base d'un besoin total d'AAI représentant 6,1 fois celui en lysine (tableau 3) et pour 0,85 % de lysine nécessaire dans l'aliment pour le porc en croissance, cela correspondrait à un apport minimum de protéines de $6,1 \times 0,85 \times 2,1$, soit de l'ordre de 11 % du régime ; ceci est une autre manière d'approcher le taux limite de protéine équilibrée envisageable dans une première approximation pour la croissance du porc.

Cette représentation schématique de l'amélioration de l'équilibre en AA du régime chez le porc en croissance s'appuie, bien entendu, sur les résultats de l'expérimentation. L'abaissement du taux de protéines à 12 % dans un régime maïs-tourteau de soja chez des porcs entre 50 et 100 kg de poids vif (tableau 4) a permis de faire apparaître un déficit secondaire en tryptophane, mais seulement dans le cas des animaux femelles. Ceci a conduit à fixer les conditions de supplémentation en lysine sous forme libre entre 5,0 et 5,5 % des protéines. Au-delà, comme le montre la figure 3, il est possible, chez le porc en croissance nourri à volonté, d'abaisser le taux de protéines dans un régime maïs-tourteau de soja jusqu'à 12 %, en supplémentant à la fois en lysine + tryptophane + thréonine + méthionine, tout en maintenant les performances de croissance à leur niveau optimal. Ce taux de 12 % de protéine équilibrée, pour un rapport protéine / lysine de l'ordre de 14 (1), correspond, semble-t-il, à la limite inférieure qui permet de fixer l'économie maximale de protéines, avec l'apport de plusieurs acides aminés industriels, et pour les

Figure 2. Possibilités de réduction du taux de protéines et économie de protéines après supplémentation du régime en lysine sous forme libre, seule ou en combinaison avec les acides aminés limitants secondaires. Exemple d'un régime à base d'un mélange de céréales (1/3 maïs - 1/3 blé - 1/3 orge) et de tourteau de soja (cf Figure 1).



(1) Pour un besoin en lysine de 0,85 % du régime pour le porc en croissance, le taux minimal (ou besoin) de protéine parfaitement équilibrée (ou "idéale") serait de : $\frac{0,85 \times 100}{7} = 12 \%$

Tableau 4. Influences respectives du taux de protéines et de la supplémentation en lysine et en tryptophane sur les performances du porc en finition : mise en évidence de l'acide aminé limitant secondaire. (HENRY 1977, cité par DUEE et HENRY, 1986) (1).

Matières azotées (%) (1)		17	14		12		
L-lysine supp. (%)		—	0,05	0,05	0,20	0,20	
L-tryptophane supp. (%)		—	—	0,02	—	0,03	
Lysine totale (%)		0,84	0,69	0,69	0,61	0,61	S _x (3)
Tryptophane total (%)		0,19	0,12	0,14	0,09	0,12	
Consommation aliment (kg/j)	F (4)	2,45	2,30	2,35	2,33	2,37	29
	MC	2,45	2,46	2,48	2,49	2,43	
Gain moyen (g/j)	F	802	814	815	729	763	0,08
	MC	803	840	839	829	801	
Indice de consommation (5)	F	3,06	2,86	2,92	3,24	3,14	0,12
	MC	3,10	2,93	2,98	3,01	3,05	
Rapport Longe/bardière	F	1,93	2,27	2,17	2,03	1,91	1,3
	MC	1,84	1,76	1,96	1,65	1,76	
Epaisseur lard (rein + dos) /2, mm	F	28,7	27,9	25,8	26,7	29,2	
	MC	31,9	29,8	27,0	32,2	29,5	

- (1) Résultats entre 52 et 100 kg de poids vif
 (2) Régime maïs - Tourteau de soja
 (3) S_x : écart-type de la moyenne (12 animaux par lot)
 (4) F : Femelles ; MC : Mâles castrés
 (5) Aliment consommé, kg/gain de poids, kg

génotypes de porcs actuellement exploités. Il est vraisemblable que le progrès génétique en faveur du gain de tissus maigres se traduira par un relèvement du taux minimal de protéine équilibrée par rapport à l'énergie. Les travaux de Mertz *et al* (1952), cités par Rérat et Lougnon (1965), montraient déjà vers les années 50 la possibilité d'optimiser les performances de croissance du porc à l'aide d'un régime purifié à teneur réduite en protéines (11 %) mais équilibré en acides aminés, tous apportés sous forme libre. Pour atteindre cet objectif ultime, la lysine seule ne suffit plus, il faut lui adjoindre de nouveaux acides aminés industriels : la thréonine et le tryptophane. En clair, avec la "protéine idéale", les chercheurs anglais (ARC 1981) ont fixé le seuil de protéine équilibrée à un niveau trop bas, provisoirement irréaliste pour les besoins actuels de la formulation des aliments composés, mais réalisable dans le futur.

2.2 / Réduction des excès de certains acides aminés.

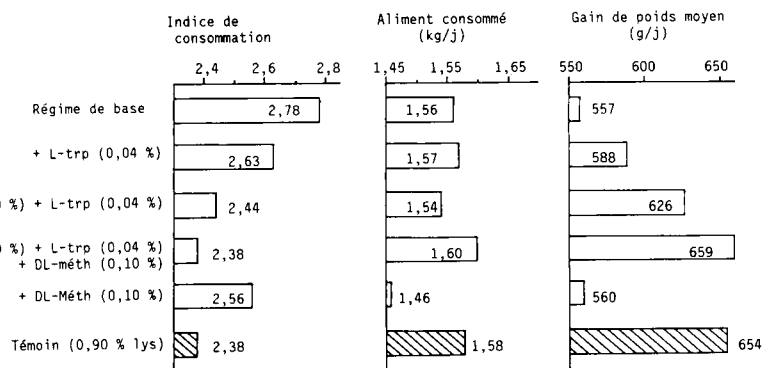
Parallèlement à la réduction de l'excès global de protéines, par la voie de la supplémentation à l'aide des AA limitants, on peut envisager de corriger les excès de certains acides aminés, qui affectent ou semblent affecter l'utilisation d'autres acides aminés indispensables, dont le niveau des besoins serait ainsi accru.

a / Apport excessif de l'acide aminé limitant primaire

Si l'on considère en premier lieu le cas de l'acide aminé habituellement le plus limitant, la lysine, l'effet dépressif d'un excès de ce dernier sur les performances de croissance (ingestion alimentaire, gain moyen pondéral) n'est décelable qu'à partir d'un niveau dépassant très largement le besoin : plus du double, selon Edmonds et Baker (1987). De la même façon, dans le cas de la méthionine, avec des régimes normalement pourvus en protéines, il faut un excès représentant au moins le double du besoin total en acides aminés soufrés pour observer une diminution de l'ingestion alimentaire spontanée.

Figure 3. Acides aminés limitants d'un régime maïs-tourteau de soja à 12 % de protéines chez le porc en croissance (d'après RUSSELL *et al* 1986).

Régime de base (RB) maïs-tourteau de soja à 12 % de protéines supplémenté en lysine (0,3 % L-lysine HCl) et témoin positif maïs-tourteau de soja à 16 % de protéines. Teneurs en acides aminés de RB (% régime) : lysine : 0,84 ; thréonine : 0,50 ; méthionine + cystine (calculée) : 0,48 ; tryptophane (calculé) : 0,14. Animaux d'un poids vif moyen initial de 18,7 kg ; durée de l'essai : 28 jours. Alimentation à volonté. Résultats moyens de 2 essais : 36 porcs (6 groupes de 6) et 10 porcs par traitement.



b / Déséquilibre par excès de l'acide aminé limitant secondaire par rapport à l'acide aminé limitant primaire

Un apport supplémentaire inopportun d'un acide aminé limitant secondaire, sans addition simultanée de l'acide aminé limitant primaire, peut créer un état de déséquilibre entre deux acides aminés voisins dans la hiérarchie des déficits par rapport aux besoins, lequel retentit défavorablement sur le niveau de consommation, et par voie de conséquence sur la vitesse de croissance. Une illustration en est donnée dans la figure 3, montrant qu'un apport supplémentaire de méthionine sous forme libre dans un régime insuffisamment pourvu en tryptophane peut provoquer un effet dépressif sur

La supplémentation en méthionine sous forme libre d'un régime insuffisamment pourvu en tryptophane provoque une diminution de l'ingestion et de la croissance de l'animal.

la quantité d'aliment consommé, accompagné d'une réduction de la croissance. L'amélioration de l'efficacité alimentaire constatée à la suite de la supplémentation en méthionine est simplement la conséquence d'un effet favorable de la restriction alimentaire spontanée sur la teneur en tissus maigres, conduisant ainsi à une diminution du coût énergétique du gain pondéral.

Ce type de déséquilibre entre les AA limitants secondaire et primaire, qui semble surtout apparaître dans les régimes à teneur modérée en protéines, a également été mis en évidence lors d'une simple supplémentation de régimes exclusivement composés de céréales par la méthionine (Rérat et Henry 1969). Il en est de même après supplémentation en lysine, en présence d'un niveau insuffisant de tryptophane (Henry et Pastuszewska 1976). En d'autres termes, ce risque de déséquilibre entre acides aminés justifie la nécessité de connaître le niveau de l'AA limitant secondaire et sa disponibilité, pour fixer avec précision le taux de supplémentation en l'AA limitant primaire, permettant d'optimiser les performances de croissance.

c / Déséquilibre par excès de certains acides aminés non limitants

Une voie complémentaire d'amélioration de l'équilibre en acides aminés consiste à corriger les excès de certains acides aminés exerçant un effet d'antagonisme spécifique vis-à-vis d'autres acides aminés indispensables, qui ne sont pas les facteurs limitants du régime. C'est le cas de l'excès de leucine par rapport aux autres acides aminés ramifiés (isoleucine, valine) ou du déséquilibre arginine-lysine qui a suscité de nombreux travaux au cours de ces dernières années aux Etats-Unis.

d / Déséquilibre entre les acides aminés ramifiés : leucine/isoleucine et valine

Un excès de leucine par rapport à l'isoleucine, qui est observé naturellement dans les protéines de maïs (rapport leucine/isoleucine = 3), entraîne une perturbation du profil des acides aminés libres sanguins (forte accumulation de leucine par rapport à l'isoleucine et la valine), qui peut retentir défavorablement sur le niveau d'ingestion alimentaire, via les centres régulateurs cérébraux. Cependant, tant que l'excès de leucine par rapport aux autres acides aminés ramifiés se situe à un niveau modéré (jusqu'à 3 fois le besoin en isoleucine, comme dans les protéines de maïs), il n'y a pas lieu de craindre une incidence sur les performances de croissance (Henry et al 1976). Plus récemment, Taylor et al (1984) ont mis en évidence une interaction significative entre la leucine et l'isoleucine sur les performan-

ces de croissance de porcs femelles soumis à un même plan de rationnement alimentaire entre 25 et 55 kg de poids vif : effet dépressif d'un large excès de leucine pour un taux suboptimal d'isoleucine, tandis qu'au taux optimal de cet acide aminé (0,45 % du régime) un excès de leucine s'élevant à 4,5 fois le besoin en isoleucine ne modifie ni le niveau de croissance ni l'indice de consommation.

e / Le cas de l'arginine

L'antagonisme supposé entre l'arginine et la lysine, par analogie avec ce que l'on observe chez les volailles, a déclenché une débauche d'énergie chez les expérimentateurs porcins américains au cours des années passées, pour conclure en définitive à une absence d'antagonisme spécifique entre les deux acides aminés dans le cas particulier du porc. Un large excès d'arginine seule dans l'aliment du porcelet au sevrage (à partir d'un niveau atteignant presque 4 fois celui du besoin) entraîne une dépression sensible de la consommation d'aliment et de la vitesse de croissance, associée à une diminution des teneurs en acides aminés libres dans le plasma, y compris la lysine. L'indice de consommation n'est pas affecté, en raison d'un effet de compensation de la restriction alimentaire spontanée (tableau 5). *L'effet dépressif d'un large excès d'arginine sur la croissance est ainsi la conséquence d'un déséquilibre habituel par excès plutôt que d'un antagonisme spécifique arginine-lysine, comme cela est le cas chez les volailles.* Par ailleurs, la réduction de la teneur en arginine à partir de celle observée dans les régimes habituels (1,2-1,3 %) à un niveau se rapprochant davantage de celui du besoin (jusqu'à 0,7-0,8 %), en associant par exemple au tourteau de soja des sources protéiques moins pourvues en arginine, comme la poudre de lactosérum, ne s'est pas traduite par une amélioration supplémentaire des performances de croissance, en dépit de la réduction de l'excès d'arginine libre dans le plasma par rapport aux autres acides aminés indispensables. Nous avons là la confirmation d'un bon équilibre en acides aminés de l'association maïs-tourteau de soja, qui ne justifie pas, dans les conditions pratiques, une correction ponctuelle des excès de certains acides aminés comme la leucine et l'arginine. Pour dédramatiser ce risque d'excès d'arginine dans les aliments pour porcs, il convient de souligner que le besoin en arginine semble avoir été nettement sous-estimé chez le porc en croissance : Southern et Baker (1983) ont ainsi montré récemment que chez le porcelet au sevrage il est deux fois plus élevé (soit 0,48 % de l'aliment) que ce qui était admis auparavant.

Tableau 5. Influence d'un excès d'arginine sur les performances de croissance du porc (SOUTHERN et BAKER 1982) (1).

Arginine supp. (% régime)	—	0,67	1,33	2,00	S \bar{x}
Arginine totale (% régime)	1,27	1,94	2,60	3,27	
Gain moyen (g/j)	440	424	371	350	17
Aliment consommé (kg/j)	0,84	0,78	0,74	0,67	0,03
Indice de consommation	1,90	1,83	2,00	1,91	0,013
Acides aminés libres du plasma (nM/ml) :					
• arginine	233	348	340	317	37
• ornithine	200	303	358	350	22
• lysine	139	128	96	86	8

(1) Poids vif moyen initial : 7,5 kg - Durée : 27 j. - Porcelets sevrés à 4 semaines. 4 groupes de 4 animaux/traitement.

(2) Régime de base : maïs-tourteau de soja - Poudre de lactosérum (5 %) - Farine de poisson (5 %) : 19 % protéines ; 1,08 % lysine et 1,27 % arginine.

La réalisation d'un bon équilibre entre les acides aminés du régime implique deux stratégies complémentaires en fonction de leur caractère limitant ou non limitant : supplémentation à l'aide d'acides aminés industriels pour les plus limitants, réduction de la teneur globale en protéines et choix des combinaisons de sources azotées pour les moins limitants.

f / Excès des acides aminés neutres les moins limitants

Pour expliquer l'effet dépressif d'un excès global de protéines sur la consommation d'aliment et les performances de croissance, on peut penser à la contribution particulière des acides aminés neutres (AAN) comprenant l'ensemble tyrosine-phénylalanine-leucine-isoleucine-valine-tryptophane, dont la plupart se trouvent éloignés dans la hiérarchie des AA limitants secondaires et voient leurs taux augmenter plus ou moins fortement avec la teneur en protéines par rapport au plus limitant d'entre eux, en l'occurrence le tryptophane. D'après les acquisitions récentes, le tryptophane semble avoir un rôle-clé dans l'ajustement de l'ingestion alimentaire, en tant que précurseur de la sérotonine cérébrale, qui intervient dans la régulation centrale de la prise d'aliment conjointement avec de nombreux autres neuro-médiateurs (monoamines et peptides). Les acides aminés neutres en excès, quant à eux, pourraient intervenir par leur effet d'antagonisme vis-à-vis du tryptophane lors de son passage à travers la barrière encéphalée, affectant ainsi la sécrétion de sérotonine. Le rôle particulier du tryptophane et des acides aminés neutres dans la régulation de la consommation d'aliment chez le porc, en relation avec la teneur en protéines du régime, mériterait d'être précisé.

3 / Les limites du concept d'une protéine équilibrée présentant des rapports constants entre les acides aminés

Au-delà des avantages procurés par les relations d'équilibre entre les acides aminés pour l'établissement des besoins du porc en croissance, devons-nous nous satisfaire de rapports constants entre les acides aminés au sein d'une protéine équilibrée, quels que soient l'état physiologique et les conditions nutritionnelles ?

3.1 / Variations dans la composition en acides aminés des protéines fixées.

L'idée d'une liaison rigide entre les besoins en acides aminés doit d'abord être nuancée, compte tenu des variations inévitables de la composition en AA des protéines de l'organisme entier. Une homéostasie de composition des protéines en AA, si elle paraît vraisemblable dans des tissus particuliers, comme le muscle, est difficile à imaginer au niveau de l'organisme entier, c'est-à-dire du poids vif vide, qui doit être pris en considération pour l'établissement des besoins. Des variations sont ainsi à attendre selon :

- **La nature des compartiments corporels.** Ainsi, d'après Oslage et Schulz (1977), cités par Henry (1981), la teneur en lysine dans les protéines corporelles varie de 4,2 % dans l'os à 8,4 % dans le muscle et 9,4 % dans le sang ; pour la méthionine, les teneurs dans les protéines se situent entre 0,7 % dans le sang et 2,7 % dans le muscle.

- **La distribution des protéines fixées dans l'organisme** (fig. 4), qui dépend aussi bien du type d'animal (âge, sexe, génotype) que des conditions de milieu (modifications de conformation résultant par exemple de l'adaptation au froid).

Des écarts de composition des protéines corporelles en AA sont déjà observés en fonction du stade de

Figure 4. Distribution des protéines dans les compartiments corporels du porc (d'après JUST NIELSEN 1973, cité par HENRY, 1981).

Porcs Landrace danois abattus à 90 kg de poids vif (valeurs moyennes pour femelles et mâles castrés).

croissance : c'est ainsi que la teneur en lysine est plus faible chez le porcelet au cours de la période d'allaitement ; il en est de même pour la somme des acides aminés indispensables (tableau 2). Cela peut expliquer que certains auteurs (Lewis *et al* 1977) aient pu conclure à un besoin en tryptophane relativement à la lysine plus élevé chez le porcelet précocement sevré (20 à 25 % du besoin en lysine) que chez le porc en croissance.

3.2 / Variations dans le métabolisme des acides aminés

Les besoins en acides aminés ne sont pas le reflet exact des quantités déposées dans l'organisme. Il existe probablement des différences, à préciser, dans les vitesses de métabolisation (catabolisme oxydatif) des acides aminés constamment renouvelés dans l'organisme ou introduits par le régime. Il semblerait par exemple que la lysine soit dégradée plus lentement que d'autres acides aminés, comme la thréonine. Certains acides aminés exercent un rôle particulier dans le métabolisme protéique (tryptophane), dans le métabolisme en général (méthionine, comme donateur de groupe méthyle) ou dans la synthèse d'hormones ou de neuromédiateurs, qui agissent à leur tour sur leur utilisation (tryptophane, phénylalanine, tyrosine). Il est également vraisemblable que le facteur temps, par rapport à la prise alimentaire, intervient pour modifier plus ou moins fortement le devenir métabolique des acides aminés, à des degrés variables suivant leur nature : de nouvelles recherches sont nécessaires pour préciser les variations d'utilisation métabolique des acides aminés, notamment en fonction du type d'animal et de l'état nutritionnel. D'ores et déjà, on peut penser que l'existence de rapports constants entre les besoins en acides aminés se justifie d'autant plus qu'il s'agit de ceux dont le devenir métabolique est très directement lié aux dépôts tissulaires, comme la lysine. Pour les autres acides aminés, qui sont largement impliqués dans les processus métaboliques, comme le tryptophane et la méthionine, les besoins ainsi déterminés risquent d'être plus ou moins fortement sous-estimés.

3.3 / Variations dans la disponibilité des acides aminés

Les relations d'équilibre entre les acides aminés au sein des protéines alimentaires ne doivent pas être limitées aux quantités apportées par le régime. Il importe en outre de prendre en compte les quantités d'acides aminés disponibles, estimées par la mesure de leur digestibilité à la fin de l'intestin grêle (digestibilité iléale).

En définitive, la notion simplifiée d'une protéine équilibrée comportant des rapports constants entre les acides aminés tout au long de la croissance du porc devra être reconsidérée lorsqu'on aura révélé des différences dans les voies d'utilisation des acides aminés. Il conviendra alors de rechercher des profils d'équilibre entre acides aminés sous un état physiologique particulier, par exemple selon l'intensité de la croissance (rapide ou lente) ou la période critique de la croissance (sevrage). Cela évitera, comme on est tenté de le faire

Tissus maigres (55 %)
Os (16 %)
Peau (9 %)
Viscères (8 %)
Sang (5 %)
Dépôts gras (4,5 %)
Poils (2 %)

Certains acides aminés jouent un rôle particulier dans le métabolisme : par exemple, le tryptophane intervient dans la synthèse de sérotonine qui agit à son tour sur le comportement alimentaire. Il est donc difficile, pour ces acides aminés, de déterminer précisément les besoins à partir des quantités simplement déposées dans l'organisme.

actuellement, de transposer, sans précaution, le même état d'équilibre entre acides aminés d'un stade physiologique à l'autre.

4 / Bénéfices attendus de l'amélioration de l'équilibre en acides aminés du régime

4.1 / Economie de protéines et d'énergie alimentaires

La supplémentation en lysine industrielle procure en premier lieu une économie de protéines, économie d'autant plus importante que le pourcentage de lysine dans les protéines avant supplémentation est plus faible (fig. 5).

L'épargne de protéines permise par la supplémentation en lysine s'accompagne à son tour d'une économie d'énergie alimentaire. Le remplacement des protéines en excès par de l'amidon se traduit par une diminution de la production d'extra-chaaleur et une meilleure utilisation métabolique de l'énergie : il en résulte une économie d'énergie lorsque celle-ci est exprimée en ED ou en EM, de l'ordre de 0,9 % de l'énergie digestible et 0,6 % de l'énergie métabolisable par point de diminution du taux de protéines après supplémentation en lysine et pour une même quantité d'énergie fixée (Noblet *et al* 1987).

Mais ceci comporte un risque. Pour un même apport d'énergie digestible, avec des porcs de type conventionnel, on observe une accentuation de l'état d'engraissement des carcasses à l'abattage, l'énergie excédentaire disponible étant utilisée pour la formation de dépôts gras (Henry 1980). Cependant, cette meilleure utilisation de l'énergie, après amélioration de l'équilibre en acides aminés et réduction de la teneur en protéines, autorise une légère diminution de l'apport alimentaire pour économiser l'énergie.

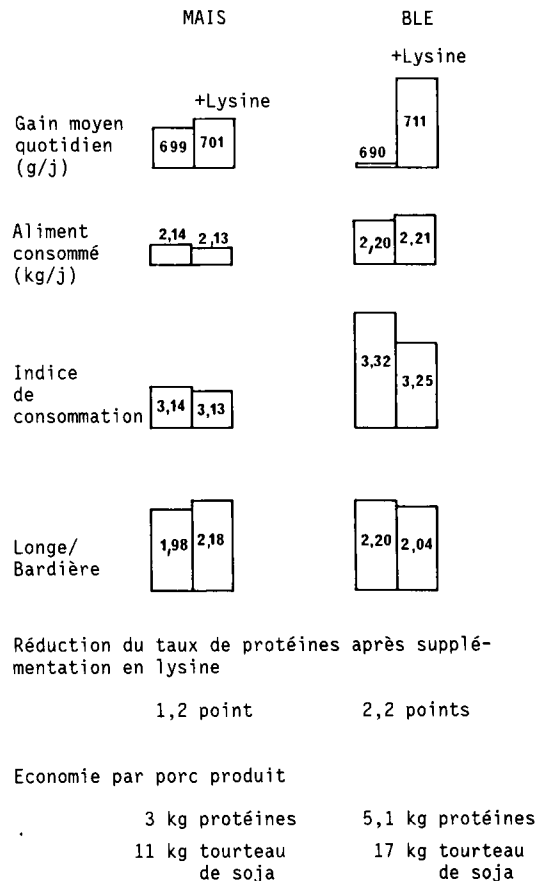
4.2 / Stimulation de l'ingestion alimentaire

On peut fonder un espoir sur l'amélioration de l'équilibre en acides aminés par son effet stimulant sur l'ingestion volontaire d'énergie :

- En plus de la meilleure utilisation de l'énergie, cette élévation du niveau de consommation accroît sans doute l'état d'engraissement chez les porcs de type con-

Figure 5. Effets de la supplémentation en lysine, associée à une réduction du taux de protéines, dans des régimes à base de maïs ou de blé sur les performances de croissance du porc (HENRY et PEREZ 1986).

Résultats entre 27 et 100 kg de poids vif ; 6 groupes de 6 porcs par traitement.
Source azotée complémentaire : tourteau de soja.
Régime Maïs normal : 16,0-14,7 % ; + lysine : 14,7 - 13,6 %.
Régime Blé normal : 16,9-15,7 % ; + lysine : 14,8 - 13,4 %, respectivement jusqu'à et au-delà de 60 kg de poids vif.
L-lysine HCl supplémentaire : avec maïs, 0,15-0,18 % aliment ; avec blé, 0,23-0,27 %, respectivement jusqu'à et au-delà de 60 kg de poids vif.
Même plan de rationnement en énergie digestible en fonction du poids vif.



Une amélioration de l'équilibre en acides aminés, en permettant une meilleure utilisation de l'énergie, exerce un effet stimulant sur l'ingestion alimentaire : elle peut être mise à profit pour exprimer pleinement les potentialités des génotypes les plus performants pour la production de viande maigre.

Tableau 6. Influence d'une réduction du taux de protéines, après supplémentation en acides aminés, sur le niveau d'ingestion alimentaire, les performances de croissance et la composition corporelle chez des porcs femelles nourris à volonté entre 20 et 100 kg de poids vif (NOBLET *et al* 1980).

Céréale ED (Mcal/kg)	Maïs 3,35		Orge 3,0	
	17-15	13-11	16-14	12-10,5
Taux de matières azotées, % régime (1) AA supplémentaires	Lys + Trp		Lys + Thr	
Gain moyen (g/j)	700	712	671	711
Consommation kg/j	2,23	2,36 (+6%)	2,36	2,45 (+ 4 %)
Mcal ED/j	7,57	8,01	7,25	7,51
Indice de consommation, kg Mcal ED	3,20	3,33	3,53	3,45
Rapport Longe/bardière	10,9	11,3	10,8	10,6
	2,03	1,98	2,60	2,26

(1) Teneurs respectives dans les intervalles de poids 20-60 kg et 60-100 kg ; Lys : Lysine, Trp : Tryptophane, Thr : Thréonine.

ventionnel, à un degré d'ailleurs variable selon la densité énergétique des régimes (tableau 6).

- En revanche, chez les porcs à haut potentiel de croissance et de développement musculaire (55 % ou plus de muscles dans la carcasse, au lieu de 50 à 52 % en moyenne), la stimulation de l'ingestion alimentaire peut favoriser le dépôt de tissus maigres. L'étude récente de Campbell et Taverner 1984 (fig. 6) fournit une illustration de l'interaction entre le génotype et l'apport énergétique au niveau de la rétention azotée et du gain de tissus maigres, l'ingestion alimentaire pouvant devenir le facteur limitant du dépôt de tissus maigres chez les génotypes les plus performants.

Inversement, l'administration aux porcs de régimes à teneur élevée en protéines, par une auto-limitation de la consommation d'aliment s'ajoutant à une utilisation amoindrie de l'énergie, est en faveur de la production de carcasses à état d'engraissement modéré, chez les porcs de type conventionnel, au prix toutefois d'un important gaspillage des protéines excédentaires.

Une représentation schématique de l'incidence de l'équilibre en acides aminés sur l'ingestion et l'utilisation de l'énergie alimentaire, en fonction du génotype et des conditions d'alimentation, est proposée dans la figure 7.

En corollaire de ce qui précède, l'utilisation d'animaux de plus en plus performants pour la production de viande maigre, donc de plus en plus exigeants en protéines et en acides aminés par rapport à l'énergie, conduit inévitablement à une certaine dérive vers une introduction accrue de sources azotées complémentaires dans le régime, d'où peuvent résulter des difficultés de formulation à partir des matières premières disponibles. La supplémentation en acides aminés limitants sous forme libre, et tout d'abord en lysine, se justifiera d'autant mieux pour limiter le taux d'incorporation de sources azotées, et par voie de conséquence pour favoriser la promotion des aliments énergétiques (céréales, sous-produits industriels) dans l'alimentation des porcs, que l'on progressera plus avant dans l'amélioration génétique des performances. Au lieu de formuler simplement les régimes sur la base de l'acide aminé limitant primaire (lysine) et en déduire le taux global de protéines correspondant (qui serait en constant accrois-

Formes de présentation des acides aminés industriels de type "Feed grade", commercialisés actuellement pour l'alimentation animale :

- L-lysine HCl (monochlorhydrate), contenant 80 % de lysine base. Forme commerciale à 99 % de pureté, soit en moyenne 78,5 % de lysine pure.
- DL-méthionine (forme racémique) : 98-99 % de pureté.
- L-thréonine : 98 % de thréonine base.

La lysine et la thréonine sont obtenues par fermentation, tandis que la méthionine est préparée par synthèse chimique.

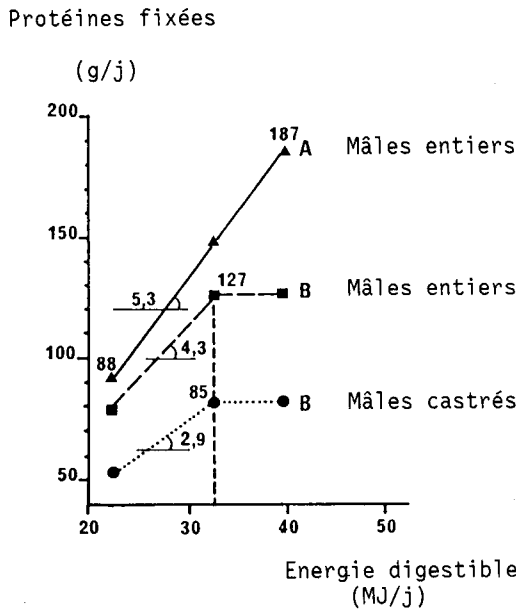


Figure 6. Influence du génotype et de la castration sur la relation entre le niveau de l'apport énergétique et la rétention azotée chez le porc (CAMPBELL et TAVERNER 1985).

Génotypes :
A (lignée commerciale)
B (troupeau expérimental)

sement), cela revient à reporter la contrainte principale de formulation sur le (ou les) acide(s) aminé(s) limitant(s) secondaire(s), pour en déduire cette fois l'apport supplémentaire de lysine nécessaire, en recherchant le taux protéique minimum, comme l'ont suggéré d'une certaine manière Fuller *et al* (1984).

L'amélioration de l'équilibre en acides aminés, en favorisant l'ingestion alimentaire et l'expression complète

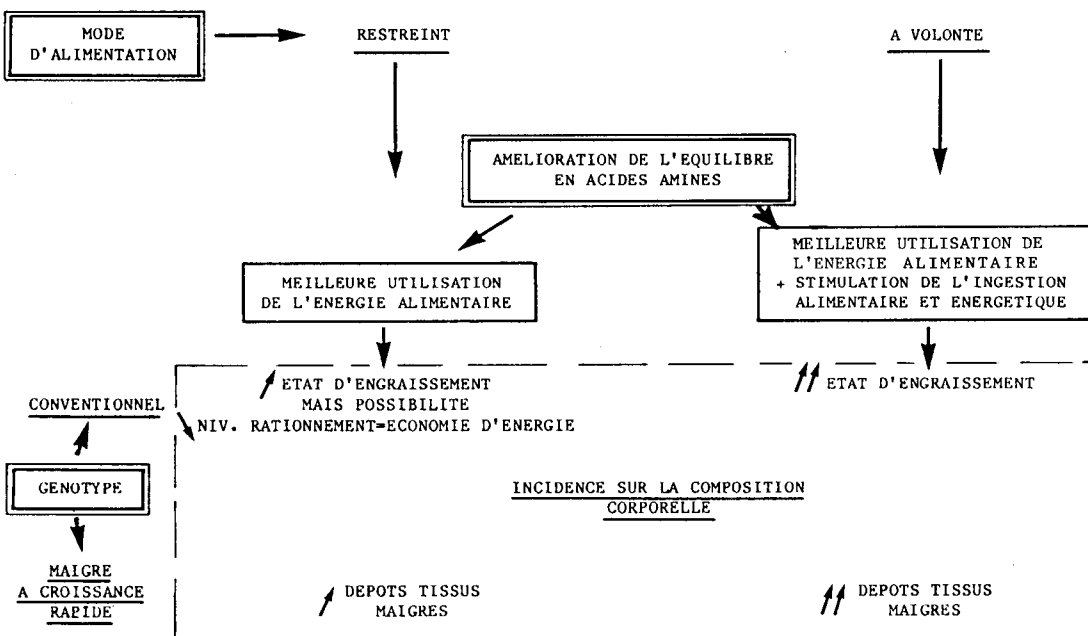


Figure 7. Représentation schématique de l'incidence de l'équilibre en acides aminés sur l'ingestion et l'utilisation de l'énergie alimentaire en fonction du génotype et des conditions d'alimentation.

Augmentation : / ; forte : //
Diminution : \

des potentialités génétiques des animaux pourrait être associée avantageusement aux applications éventuelles des manipulations de la croissance, notamment de type hormonal, pour accroître encore davantage le niveau de production de tissus maigres chez le porc. Notons par ailleurs que la réduction du taux global de protéines résultant d'une supplémentation en acides aminés limitants de fabrication industrielle devrait conduire à une limitation de la pollution des eaux par les nitrates provenant des effluents dans les zones à forte concentration porcine.

Conclusion

La notion de protéine équilibrée ou "idéale" dans l'alimentation du porc en croissance a permis d'entrevoir les possibilités d'améliorer l'équilibre en acides aminés par étapes successives, par le biais de suppléments combinés en acides aminés industriels. Cela conduit à une économie de plus en plus substantielle de protéines, associée à une meilleure utilisation de l'énergie, à mesure que de nouveaux acides aminés industriels apparaissent sur le marché : c'est le cas actuellement de la thréonine. Pour cela il est nécessaire de bien connaître les besoins du porc en acides aminés limitants secondaires (thréonine, tryptophane), principalement pendant la phase de finition, en raison du maintien d'un potentiel élevé de dépôt de tissus maigres pendant une période plus longue de la croissance à la faveur des progrès réalisés par la sélection au cours des années écoulées. Il convient également de prendre en compte d'une manière plus particulière les variations de la disponibilité des acides aminés selon la qualité des matières premières.

De cette "protéine idéale", nous retiendrons avant tout l'intérêt d'un équilibre en acides aminés progressivement perfectible vers un état idéal. Cet équilibre de plus en plus affiné se justifie d'autant plus que l'on dispose d'animaux de plus en plus performants et que l'on vise une productivité sans cesse améliorée. Pour l'avenir, il n'apparaît pas opportun de recourir à des régimes globalement de plus en plus riches en protéines pour satisfaire les besoins d'animaux de plus en plus exigeants. Bien au contraire, il y aura lieu de rechercher des aliments présentant une teneur optimale et sans excès en protéines, mais bien équilibrés par ailleurs en acides aminés indispensables. A un moment où l'on est amené à réfléchir aux applications possibles de la biotechnologie pour l'amélioration des performances des animaux, et des porcs en particulier, cet objectif sera atteint d'autant mieux que l'on aura placé les animaux dans les conditions optimales leur permettant d'exprimer pleinement leurs potentialités.

En définitive, la recherche des conditions optimales de nutrition azotée conduit à allier au souci d'économie (de protéines comme d'énergie) un objectif de productivité accrue. Dans ce contexte, les acides aminés industriels nouveaux (thréonine, tryptophane) qui s'ajoutent à la lysine et à la méthionine, occuperont une place de premier plan comme correcteurs des associations de protéines naturelles dans l'alimentation du porc.

Principales références bibliographiques

- A.R.C. (Agriculture Research Council), 1981. The Nutrient Requirements of Pigs. Commonwealth Agric. Bureaux, U.K., 307 p.
- CAMPBELL R.G., TAVERNER M.R., 1985. Effect of strain and sex on protein and energy metabolism in growing pigs. Symp. Energy metabolism in Farm animals, EAAP, Airlee, Virginia, U.S.A.
- D.L.G. (Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft), 1984. DLG-Futterwerttabellen für Schweine. D.L.G.-Verlag, Frankfurt-am-Main, 82 p.
- DUEE P.H., HENRY Y. 1986. Alimentation azotée. In : PEREZ J.M., MORNET P., RERAT A. (éd.). Le porc et son élevage, bases scientifiques et techniques. 261-288. Maloigne, Paris.
- DUEE P.H., CALMES R. DESMOULIN B., 1980. Composition en acides aminés des protéines musculaires du porc selon le type génétique. Ann. Zootech., 29, 31-37.
- EDMONDS M.S., BAKER D.H., 1987. Amino acid excesses for young pigs : effects of excess methionine, tryptophan, threonine or leucine. J. Anim. Sci., 64, 1664-1671.
- FULLER M.F., CADENHEAD A. PENNIE K., 1984. Effects of omitting lysine from diets conforming to Agricultural Research Council (1984) standards for pigs. Anim. Prod., 39, 449-453.
- HENRY Y., 1980. Besoin azoté global du porc en croissance : résultats sur femelles et synthèse. Journées Rech. Porcine en France, 12, 183-194.
- HENRY Y., 1981. Variations de la rétention azotée chez le Porc en croissance : conséquences sur le besoin. Reprod. Nutr. Dévelop., 21, 319-333.
- HENRY Y., PASTUSZEWSKA B., 1976. Conséquences d'une déficience du régime en tryptophane chez le porc sur le niveau d'ingestion et les performances de croissance. Ann. Zootech., 25, 143-148.
- HENRY Y., PEREZ J.M., 1986. Effets de la supplémentation en lysine, associée à une réduction du taux de protéines, dans des régimes à base de maïs ou de blé sur les performances de croissance du Porc. Journées Rech. Porcine en France, 18, 57-66.
- HENRY Y., DUEE P.H. RERAT A., 1976. Isoleucine requirement of the growing pig and leucine-isoleucine interrelationship. J. Anim. Sci., 42, 357-364.
- I.N.R.A., 1984. L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. I.N.R.A. éd., Paris, 282 p.
- LEWIS A.J. PEO JR., E.R., CUNNINGHAM P.J., MOSER B.D., 1977. Determination of the optimum dietary proportions of lysine and tryptophan for growing pigs based on growth, food intake and plasma metabolites. J. Nutr., 107, 1369-1376.
- N.R.C. (National Research Council), 1979. Nutrient requirements of swine, Nat. Acad. Sci., Washington D.C., 52 p.
- NOBLET J., HENRY Y., DUBOIS S., 1977. Influence des teneurs respectives en protéines et en lysine du régime sur les performances et l'utilisation de l'énergie par le porc en croissance. Journées Rech. Porcine en France, 19, 259-264.
- NOBLET J., HENRY Y., BOURDON D., 1980. Influence d'une réduction du taux d'azote indifférencié sur le niveau d'ingestion alimentaire et les performances de croissance du porc femelle, selon la concentration et la nature des substrats énergétiques dans le régime. Ann. Zootech., 29, 103-119.
- RERAT A., HENRY Y., 1969. Supplémentation des céréales par les acides aminés chez le porc pendant la période de finition. Journées Rech. Porcine en France, 1, 143-149.
- RERAT A., LOUGNON J., 1965. Les besoins en amino acides du porc en croissance (Revue). In : P. VIGNERON (éd.). Amino Acides Peptides-Protéines, Cahier N°6, 342-422, AEC éd., Commeny.
- RUSSELL L.E., EASTER R.A., GOMEZ-ROJAS V., CROMWELL G.L., STAHLY T.S., 1986. A note on the supplementation of low-protein, maize-soyabean meal diets with lysine, tryptophan, threonine and methionine for growing pigs. Anim. Prod., 42, 291-295.
- SOUTHERN L.L., BAKER D.H., 1982. Performance and concentration of amino acids in plasma and urine of young pigs fed diets with excesses of either arginine or lysine. J. Anim. Sci., 55, 857-866.
- SOUTHERN L.L., BAKER D.H., 1983. Arginine requirement of the young pig. J. Anim. Sci., 57, 402-412.
- TAYLOR S.J., COLE D.J.A., LEWIS D., 1984. Amino acid requirements of growing pigs. 5. The interaction between isoleucine and leucine. Anim. Prod., 38, 257-261.

Y. HENRY. Significance and limitations of the concept of dietary amino acid balance for the growing pig.

After being initially expressed by the dietary crude protein content, the protein requirement of the growing pig has been given a composite significance by considering the amino acid needs separately of each other, to end finally with the concept of a balanced (or "ideal") protein with constant ratios between the requirements for essential amino acids. The improvement of the dietary amino acid balance, with a resulting decrease in protein content, can now be obtained by an additional supply of industrial amino acids : first lysine alone, as the first limiting amino acid in most pig diets, then lysine in combination with the secondary limiting amino acids (threonine, tryptophan, methionine). Besides their limiting character, excesses of some amino acids may occur, as is the case for imbalance between branched amino acids, excess of arginine or imbalance between large neutral amino acids which may explain the depressive effect of excess protein on voluntary feed intake. In a second stage, the limitations of the concept of "ideal" protein were analyzed : non constancy of the amino acid composition of deposited protein, differences in the metabolism of individual amino acids, changes in the availability of dietary amino acids. On the other hand, in addition to protein sparing, the improvement of the dietary amino acid balance allows a better utilization of dietary energy and exerts a stimulatory effect on voluntary feed intake, thus enabling a reduction of feeding cost and an optimal use of genotypes selected for a high rate of lean tissue growth.

HENRY Y., 1988. Signification de la protéine équilibrée pour le porc : intérêt et limites. *INRA Prod. Anim.*, 1 (1), 65-74.