

Le besoin en thréonine des volailles de chair

La thréonine, considérée comme le troisième acide aminé limitant dans la plupart des formules d'aliment destinées aux volailles en croissance, est disponible sous forme purifiée depuis quelques années sur le marché des matières premières destinées à l'alimentation animale. Des expériences récentes permettent d'évaluer le besoin des diverses espèces avicoles selon la performance que l'on cherche à optimiser. Ces références sont utiles au moment où le blé, matière première particulièrement déficiente en thréonine, est de plus en plus utilisé en alimentation avicole et dans la perspective de réduction des apports protéiques dans les aliments destinés à l'aviculture.

Depuis plus de trente ans l'industrie commercialise des acides aminés destinés à l'alimentation animale, en particulier celle des espèces monogastriques (volailles et porcs). Chronologiquement sont apparus sur le marché des additifs : la méthionine, issue de la synthèse chimique, puis la lysine, le tryptophane et la thréonine produits par voie fermentaire. On dispose de nombreuses références pour fixer les conditions d'usage des deux premiers. Les données sont moins abondantes à propos du tryptophane. Elles sont rares et récentes pour la thréonine. Cette brève revue bibliographique a donc pour objectif de faire le point des expériences réalisées avec ce dernier acide aminé.

1 / La thréonine, acide aminé limitant

Dans une publication récente, Fernandez *et al* (1994) renouvellent une démarche classique sur l'ordre dans lequel deviennent limitants les acides aminés indispensables du

maïs, du tourteau de soja et d'un mélange (55 % maïs + 45 % tourteau de soja), le gain de poids étant utilisé comme seul critère de réponse biologique. Leurs résultats sont résumés dans le tableau 1. On peut constater que la thréonine est le deuxième « limitant » sur ces deux matières premières et leur association. La situation serait vraisemblablement la même avec le blé dont les protéines sont globalement encore plus déficientes en thréonine que celles du maïs.

Une autre approche du problème de déficience des matières premières en acides aminés a été illustrée par nous-mêmes (Leclercq 1996) en comparant le « profil » en acides aminés des principales matières premières et celui de la « protéine idéale » pour le poulet. Il en ressort clairement que toutes les matières premières, à l'exception du colza, présentent un déficit en thréonine. Si donc on tente de s'approcher de la « protéine idéale » par la formulation, on ne dispose pas d'une source particulièrement intéressante en cet acide aminé à partir des matières premières utilisées habituellement en nutrition aviaire ; la thréonine pure produite par fermentation peut donc faciliter l'équilibre des acides aminés de la ration.

Comme cela est exposé ci-après, la question est toutefois un peu plus complexe, dans la mesure où l'on ne s'intéresse pas seulement à la vitesse de croissance, mais également à l'efficacité alimentaire (indice de consommation) et à la qualité des carcasses (proportions de muscles et de tissus adipeux). En outre l'expérience montre qu'il existe une variabilité individuelle des besoins des animaux, traduits en

Résumé

La thréonine est fréquemment le troisième acide aminé limitant la croissance des volailles quand on fait appel au maïs et au tourteau de soja pour leur alimentation. Les données sur son besoin sont assez nombreuses et récentes chez le poulet de chair. Elles sont beaucoup plus rares chez le dindonneau et le caneton de Barbarie, surtout en période de finition. La thréonine ne semble pas exercer d'effets très prononcés sur la composition corporelle des carcasses. D'une manière générale les situations de carences ne s'observent que lorsqu'on réduit notablement la teneur en protéines des régimes.

Tableau 1. Ordre des acides aminés indispensables limitants chez le poussin entre les âges de 8 et 22 jours (d'après Fernandez et al 1994).

Ordre	Maïs	Tourteau de Soja	Mélange Maïs + Tourteau de soja
1	lysine	acides aminés soufrés	acides aminés soufrés
2	thréonine	thréonine	thréonine
3	tryptophane	lysine, valine	lysine
4	arginine, valine, isoleucine		valine
5		a.a. non indispensables	arginine
6		histidine	tryptophane
7	acides aminés soufrés		
8	phénylalanine + tyrosine		
9	histidine		

termes de concentration de l'acide aminé dans l'aliment. Cette variabilité est probablement en grande partie d'ordre génétique. On a donc affaire à des populations plus ou moins hétérogènes du fait de la variabilité génétique de la vitesse de croissance, de la composition corporelle et de la consommation alimentaire. C'est ce qui explique les réponses curvilinéaires fréquemment observées quand on se trouve proche du plateau réponse. L'approche économique exige la prise en compte de cette curvilinearité, afin d'atteindre la meilleure rentabilité par la démarche des coûts marginaux.

2 / Problèmes méthodologiques liés à l'estimation du besoin en thréonine

Le premier problème est lié à la base d'expression du besoin. Peu de publications sont basées sur la thréonine digestible. Le plus souvent les auteurs, principalement américains, expriment le besoin en thréonine totale, mêlant la thréonine totale des matières premières, qui n'est jamais totalement digestible, à celle de la thréonine pure qui est considérée comme digestible à 100 %. En outre, les régimes renferment très souvent de la farine de viande, matière première dont la digestibilité des acides aminés est extrêmement variable ; il est donc difficile de calculer a posteriori la thréonine digestible à partir des formules publiées par les différents auteurs.

Le second problème concerne le mode d'expression. Le plus souvent les auteurs expriment le besoin de concentration dans l'aliment (g de thréonine par kg d'aliment). Or le besoin est d'abord lié à la croissance de l'animal (protéines déposées) et, éventuellement, à sa taille (besoin d'entretien). La consommation d'aliment étant variable selon le génotype, la concentration énergétique et la température ambiante, utiliser la concentration comme mode d'expression devrait rendre les comparaisons entre expériences plus difficiles. C'est pourquoi, en principe, l'expression sur la base du gain de poids (mg de thréonine par g de gain de poids ou par g de gain de protéines) devrait être moins sujette aux variations des

conditions expérimentales. Un autre mode d'expression pourrait être d'exprimer le besoin en thréonine par rapport à celui de la lysine. Cela suppose d'estimer simultanément les besoins en ces deux acides aminés au cours d'une même expérience, ce qui n'a été réalisé à notre connaissance qu'à une seule occasion (Leclercq 1997).

Le troisième problème porte sur le critère d'évaluation du besoin. Dans la plupart des publications, seul le gain de poids est pris en considération. Or on sait que lorsque la teneur en protéines ou en un certain nombre d'acides aminés augmente dans l'aliment, la teneur en protéines et la proportion de certains muscles (*Pectoralis major* et *minor*) augmentent, tandis que celles des lipides et des tissus adipeux diminuent. Les augmentations pouvant compenser les réductions, le gain de poids peut demeurer inchangé. Cela signifie que, bien souvent, le gain de poids est un critère qui conduit à sous-estimer plus ou moins le besoin. Les résultats du tableau 2 à propos de la lysine illustrent ce phénomène.

Tableau 2. Besoin en lysine totale du poulet mâle entre les âges de 20 et 40 jours (modèle linéaire à plateau (« broken line »), Leclercq 1997).

Critère	Gain de poids	Proportion de muscles pectoraux
Teneur de l'aliment (g/kg)	9,24	9,75
mg lysine par g gain	16,64	17,02

Le quatrième problème tient aux conditions expérimentales créant la déficience en thréonine. Plusieurs expériences à caractère appliqué n'ont pas abouti à une carence significative en thréonine, si bien que l'évaluation du besoin demeure très imprécise, voire impossible, (Uzu 1986, Smith et Wadrou 1988, Thomas *et al* 1995, Kidd *et al* 1996 et 1997, Penz *et al* 1997). Il faut avoir recours simultanément à des sources de protéines carencées (gluten de maïs ou de blé), des teneurs modérées en protéines des aliments et des suppléments par d'autres acides aminés limitants (lysine, méthionine, arginine, valine) pour créer des carences permettant une esti-

mation correcte du besoin. Les expériences remplissant ces conditions sont assez rares.

Enfin l'interprétation statistique pose souvent de gros problèmes. Les effectifs mis en œuvre sont faibles lors des mesures de croissance pondérale et plus réduits encore lorsqu'il s'agit d'évaluation des qualités de carcasse. Quant à l'efficacité alimentaire (indice de consommation), elle est mesurée avec un nombre très faible de répétitions. En définitive, il existe très peu d'expériences remplissant toutes les conditions évoquées précédemment.

3 / Chez le poulet de chair

3.1 / Effet sur la croissance

Une première approche consiste à tenter d'estimer, chez le poulet en croissance, le besoin d'entretien et le besoin de croissance, selon le schéma classique de décomposition du besoin. Cette démarche a été très bien réalisée chez le jeune poussin entre les âges de 10 et 20 jours par Edwards *et al* (1997), en utilisant des régimes entièrement synthétiques (mélanges d'acides aminés) qui permettent d'obtenir une plage très large de concentrations de thréonine entièrement digestible, en l'occurrence de 0,30 à 5,73 g/kg. Dans ces conditions, les auteurs observent des réponses parfaitement linéaires du gain de poids, du gain de protéines ou de la thréonine retenue à la thréonine ingérée. Cette expérience permet de conclure que le besoin d'entretien (pour un bilan azoté nul) serait de 39,2 mg/j/kg^{0,75} et que l'utilisation métabolique de la thréonine pour la croissance serait de 82 %. Toutefois, en reprenant les données des auteurs, on peut conclure que le besoin d'entretien (pour un gain de poids nul) est non significativement différent de zéro (constante de la droite de régression non significative) et que, dans ces conditions, le besoin pour la croissance est de

10,2 mg par g de gain, ou de 59,2 mg par g de protéines déposées. Une expérience récente issue de notre laboratoire (Alleman *et al* 1999) portant sur une plage de variation de 3,80 à 5,70 g de thréonine digestible par kg et sur la partie linéaire de la réponse du poids vif ou du gain de protéines à la thréonine ingérée, suggère que le besoin d'entretien n'est pas significativement différent de zéro et que le besoin de croissance est de 10,7 mg de thréonine digestible par g de gain ou de 63,8 mg par g de protéines fixées chez les mâles de la lignée maigre entre les âges de 28 et 49 jours. Ces résultats constituent certainement les bases biologiques les plus récentes et les plus solides pour bâtir des modèles de prévision du besoin.

Si on rassemble toutes les expériences ayant abouti à des déficiences significatives en thréonine en vue d'estimer le besoin, on parvient aux résultats résumés dans le tableau 3 pour la thréonine totale et dans le tableau 4 pour la thréonine digestible. Pour la thréonine totale on peut observer, avec le modèle linéaire à plateau (« broken line »), une bonne concordance entre les expériences pour la période d'âge de 16 à 40 jours, que le mode d'expression soit en g/kg d'aliment ou en mg/g de gain. Une seule expérience porte sur la période 7-21 jours et conduit à une concentration un peu supérieure dans l'aliment et, au contraire, à un besoin plus faible en mg de thréonine totale par g de gain. Pendant la période de finition, ce besoin décroît s'il est exprimé en g/kg d'aliment et au contraire augmente légèrement s'il est exprimé en mg par g de gain. L'augmentation de la quantité de thréonine nécessaire pour 1 g de gain de poids doit être due en grande partie à l'accroissement, classiquement observé, de la teneur en protéines du gain de poids avec l'âge. Si on raisonne sur la base de la thréonine digestible, le modèle « broken line » conduit à des valeurs elles aussi assez concordantes, mais un peu inférieures à celles obtenues pour la thréonine totale. L'expérience d'Alleman *et al*

Le besoin est d'environ 6,5 g de thréonine totale par kg d'aliment pour le poulet en croissance. Il décroît pendant la période de finition.

Tableau 3. Besoin du poulet de chair mâle en thréonine totale avec le gain de poids comme critère.

Référence	Période	Modèle « broken line »	Modèle curvilinéaire
Smith et Wadroup (1988)	7-21 j	6,4 g/kg 9,79 mg/g gain	
Rangel-Lugo <i>et al</i> (1994)	16-28 j	6,3 g/kg 11,0 mg/g gain	5,9 g/kg 10,3 mg/g gain (polynomial)
Kidd <i>et al</i> (1997)	18-45 j	≤ 6,3 g/kg ≤ 12,8 mg/g gain	
Leclercq (1997)	20-40 j	6,1 g/kg 10,75 mg/g gain	5,91 g/kg 10,31 mg/g gain (exponentiel, 99 % asymptote)
Webel <i>et al</i> (1996)	24-38 j	7,0 g/kg 12,21 mg/g gain	
Kharlakian <i>et al</i> (1996)	35-49 j	5,7 g/kg 13,8 mg/g gain	
Webel <i>et al</i> (1996)	42-56 j	5,2 g/kg 12,8 mg/g gain	

Tableau 4. Besoin du poulet de chair mâle en thréonine digestible avec le gain de poids comme critère.

Référence	Période	Modèle « broken line »	Modèle curvilinéaire
Webel <i>et al</i> (1996)	24-38 j	6,0 g/kg 10,5 mg/g gain	
-id-	42-56 j	5,2 g/kg 12,8 mg/g gain	
Edwards <i>et al</i> (1997)	10-20 j	10,2 mg/g gain	
Leclercq (1997)	20-40 j	5,4 g/kg 9,5 mg/g gain	5,4 g/kg 9,5 mg/g gain (exponentiel, 99 % asymptote)
Alleman <i>et al</i> (1999)	28-42 j	<i>lignée maigre</i> 5,0 g/kg 10,7 mg/g gain <i>lignée grasse</i> ≤ 3,8 g/kg ≤ 11,2 mg/g gain	13,9 mg/g gain (modèle polynomial) 12,4 mg/g gain (modèle polynomial)

En plus de l'effet sur la croissance, la thréonine a un effet sur l'efficacité alimentaire, mais plus faible que ceux de la lysine et de la méthionine.

(1999) souligne l'effet du génotype. En effet, les poulets de la lignée génétiquement grasse optimisent leur croissance avec des régimes contenant moins de 3,8 g de thréonine digestible par kg alors que la lignée maigre exige une concentration de 5,0 g/kg. Si on exprime le besoin en mg par g de gain, les besoins deviennent nettement plus homogènes, en particulier pour les deux lignées. Cette observation est encore plus prononcée si le besoin en thréonine est exprimé par rapport au gain de protéines, ce qui suggère que l'utilisation de l'acide aminé doit être assez semblable quel que soit le génotype.

3.2 / Effet sur l'efficacité alimentaire

On peut se demander si la thréonine exerce un effet analogue à celui d'autres acides aminés sur l'efficacité alimentaire. On sait en effet que la lysine (Leclercq 1997) et la méthionine (Schutte et Pack 1995) exercent des effets favorables sur l'efficacité alimentaire au-delà de la concentration nécessaire à la croissance pondérale maximale ou au développement maximal des filets.

Les résultats du tableau 5 illustrent l'absence d'effet très marqué de la thréonine sur l'efficacité alimentaire au-delà de son effet sur la croissance, quand on utilise un modèle linéaire à plateau (« broken line »). Toutefois les approches curvilinéaires (polynomiales ou

exponentielles) suggèrent une différence entre ces deux critères du besoin. C'est ainsi que Webel *et al* (1996) observent une réponse proche du modèle « broken line » pour la croissance et plutôt curvilinéaire pour l'indice de consommation. Dans l'une de leurs expériences, le besoin pour la croissance est estimé à 6,0 g de thréonine digestible par kg et à 6,8 g/kg celui pour l'indice (maximum du modèle polynomial), chez des poulets mâles entre les âges de 21 et 42 jours. Nous-mêmes (Leclercq 1997), travaillant avec des effectifs beaucoup plus importants, avons estimé le besoin en thréonine digestible à 5,2 g/kg pour la croissance et 5,6 g/kg pour l'indice de consommation, en utilisant un modèle exponentiel (modèle monomoléculaire). Il semble donc qu'il existe un léger effet de la thréonine sur l'efficacité alimentaire, au-delà du besoin pour la croissance. Cependant cet effet est moins net que ceux de la lysine et de la méthionine. Cela peut être rapproché des faibles effets de la thréonine sur la composition corporelle, comparés à ceux de la lysine, par exemple (Leclercq 1997).

3.3 / Effet sur la composition corporelle

Les effets de la thréonine sur les caractéristiques des carcasses ont été beaucoup moins étudiés jusqu'à présent que ceux décrits précédemment à propos de la vitesse de croissance et de l'efficacité alimentaire.

Nous avons eu l'occasion de réaliser la comparaison la plus rigoureuse entre les effets de trois acides aminés, lysine, thréonine et valine sur les caractéristiques de carcasse (Leclercq 1997). En effet, ces trois acides aminés ont été comparés dans les mêmes conditions expérimentales (même période, même génotype, même bâtiment, même régime de base, mêmes conditions de dissection). Six concentrations d'acide aminé ont été mises en œuvre, à raison de cinq répétitions de 32 poulets mâles par concentration. Quarante animaux ont été disséqués pour chaque régime.

Tableau 5. Besoin en thréonine pour le gain de poids et l'indice de consommation du poulet mâle (modèle « broken line »).

Référence	Période	Forme ⁽¹⁾	Gain de poids	Indice de consommation
Rangel-Lugo <i>et al</i> (1994)	16-28 j	T	6,3 g/kg	6,7 g/kg
Webel <i>et al</i> (1996)	21-42 j	D	6,0 g/kg	6,1 g/kg
Webel <i>et al</i> (1996)	42-56 j	D	5,2 g/kg	5,2 g/kg
Kharlakian <i>et al</i> (1996)	35-49 j	T	5,7 g/kg	5,7 g/kg
Leclercq (1997)	20-40 j	D	5,4 g/kg	5,4 g/kg
Kidd <i>et al</i> (1997)	30-42 j	T	6,5 g/kg	6,5 g/kg

⁽¹⁾ T = thréonine totale, D = thréonine digestible.

La lysine exerce un effet très prononcé sur la proportion de muscles pectoraux ; celle-ci exige une concentration de lysine supérieure de 5 à 10 % à celle nécessaire pour atteindre la vitesse de croissance maximale. Parallèlement, on peut observer une réduction de la proportion de gras abdominal, qui traduit une baisse de l'état d'engraissement général. Cet effet est beaucoup plus faible avec la thréonine, si bien que le besoin en thréonine pour atteindre le poids maximal de muscles pectoraux n'est pas différent de celui nécessaire pour atteindre le plateau de vitesse de croissance. Cette conclusion est valable quel que soit le modèle biométrique utilisé pour traiter les données. Ce phénomène est encore plus net avec la valine qui, en cas de carence, ne conduit à aucune modification des proportions de muscles pectoraux et de tissu adipeux abdominal. Ces effets différents des trois acides aminés sont clairement confirmés par l'analyse de covariance des lots les plus carencés en chacun des acides aminés (Leclercq 1997) quand on utilise le poids vif comme covariable (variable explicative).

Alleman *et al* (1999) aboutissent aux mêmes conclusions à propos de la thréonine, en comparant la lignée génétiquement maigre à la lignée grasse. Leurs résultats sont résumés dans le tableau 6.

Penz *et al* (1997) n'observent qu'une légère réduction de la proportion de filets lorsque la carence réduit la croissance. Parallèlement, le tissu adipeux abdominal atteint une proportion un peu plus élevée dans le lot carencé. Toutefois ces effets sont de faible ampleur et la concentration de thréonine pour atteindre le rendement maximum en muscles pectoraux est semblable à celle nécessaire à la croissance.

4 / Chez le dindonneau de chair

Il existe infiniment moins d'expériences sur le dindonneau, du fait surtout des difficultés expérimentales. Plusieurs raisons plaident pourtant en faveur d'études sur cette espèce. Tout d'abord le dindonneau, comme d'ailleurs le caneton de Barbarie, ne semble pas réagir comme le poulet à l'abaissement de la teneur en protéines de l'aliment quand les apports en acides aminés indispensables sont maintenus au niveau du besoin par supplémentation avec des acides aminés purs. En effet, chez le poulet, on observe une dégradation de l'efficacité alimentaire et une augmentation de l'adiposité quand on réduit l'apport de protéines, à vitesse de croissance inchangée. Le dindonneau ne semble pas réagir de façon aussi prononcée. En outre, ce dernier utilise très bien le blé dans son alimentation, céréale particulièrement déficiente en thréonine.

La plupart des résultats publiés portent sur des dindonneaux en démarrage (Warnick et Anderson 1973, D'Mello 1976, Jackson *et al* 1983, Blair et Potter 1987). Très rares sont les expériences portant sur des périodes plus tardives. Warnick et Anderson (1973) estiment le

Tableau 6. Effets de la thréonine sur les caractéristiques des carcasses (à 49 jours d'âge) de poulets mâles, génétiquement gras ou maigre (d'après Alleman et al 1999).

Thréonine digestible (g/kg)	3,80	4,27	4,75	5,22	5,70
Muscles pectoraux ⁽¹⁾ (%)					
lignée maigre	11,16 ^{ab}	11,28 ^{ab}	12,10 ^c	11,95 ^c	11,64 ^{bc}
lignée grasse	11,36 ^{ab}	10,89 ^{ab}	11,08 ^{ab}	10,84 ^a	11,22 ^{ab}
Gras abdominal ⁽¹⁾ (%)					
lignée maigre	1,40 ^a	1,93 ^b	1,74 ^b	1,97 ^b	1,80 ^b
lignée grasse	5,41 ^c	5,03 ^c	5,26 ^c	5,10 ^c	5,13 ^c

⁽¹⁾ rapporté au poids vif.

besoin en thréonine totale du dindonneau, entre les âges de 5 et 17 jours, à 10 g/kg du régime, alors que le besoin de lysine est évalué à 1,68 %. Toutefois les régimes sont très complexes et les nombres de répétitions très faibles. Il en est de même de l'essai de D'Mello (1976) basé sur 4 groupes de 3 dindonneaux par régime expérimental. Quatre teneurs en thréonine totale sont comparées : 7,4□, 9,4□, 11,4 et 13,4 g/kg. L'auteur estime le besoin en thréonine totale à 9,4 g/kg et conclut que si l'on met en régression le gain de poids et la quantité de thréonine ingérée, les résultats du dindonneau se placent sur la même courbe de réponse que ceux du poulet.

L'approche expérimentale de Jackson *et al* (1983) consiste à rechercher l'ordre dans lequel quelques acides aminés deviennent limitants dans un mélange maïs + tourteau de soja titrant 22 % de protéines brutes, supplémenté en DL méthionine et distribué entre 8 et 20 jours d'âge. Si l'on excepte les acides aminés soufrés, qui n'ont pas fait l'objet de l'étude, la lysine, puis la valine et enfin la thréonine sont limitants. En revanche, d'après l'absence d'effet d'une supplémentation en acide glutamique, les acides aminés non indispensables ne semblent pas impliqués dans les baisses de performances observées quand on réduit la teneur en protéines brutes de l'aliment de 30 % à 26 % ou 22 %. Plus récemment Blair et Potter (1987), cherchant l'ordre dans lequel les acides aminés du tourteau de soja, seule source de protéines de l'aliment, sont limitants, concluent qu'entre les âges de 7 et 19 jours, la valine et la thréonine sont les deux acides aminés les plus limitants, à l'exception des acides aminés soufrés qui n'ont pas fait l'objet de l'étude. En revanche l'arginine, l'histidine, la leucine et le tryptophane ne posent pas de problème dans les conditions expérimentales de cette étude.

Seules deux expériences semblent avoir été publiées chez les dindonneaux plus âgés. C'est pourtant pour la croissance, entre 4 et 12 semaines, et, encore plus, pour la finition que la connaissance précise du besoin est nécessaire. En effet, les quantités d'aliments alors consommées sont très importantes. De plus les rendements en muscles peuvent être plus profondément influencés par les aliments de finition que par les aliments de démarrage. Comparant des séquences d'aliments assurant 100 %, 87 % ou 78 % des teneurs en pro-

Tableau 7. Estimations du besoin en thréonine totale du dindonneau mâle.

Périodes	0-4 semaines	8-12 semaines	16-20 semaines
Energie métabolisable (kcal/kg)	2 850	3 070	3 225
Modèle « broken line »			
Teneur de l'aliment (g/kg)			
- pour GMQ	□8,80	≤ 6,90	≤ 4,90
- pour indice de consommation	□8,20	≤ 6,90	≤ 4,90
Besoin en mg/g gain	12,04	≤ 14,32	≤ 15,46
Modèle monomoléculaire ⁽¹⁾			
Teneur de l'aliment (g/kg)			
- pour GMQ	9,79	pas de curvilinearité	6,80
- pour indice de consommation	8,83	pas de curvilinearité	6,21

⁽¹⁾ Besoin estimé pour atteindre 99 % de l'asymptote selon le modèle monomoléculaire $y = a - be^{-x}$; recalculé d'après Lehmann *et al* (1997).

téines recommandées pour chaque période de 3 ou 4 semaines entre les âges de 6 et 20 semaines, Waibel *et al* (1995) concluent que la thréonine est plus limitante que l'arginine, la valine et l'isoleucine dans des régimes à base de maïs + tourteau de soja ou de maïs + tourteau de soja + tourteau de colza + farine de viande. Selon ces auteurs, l'effet des protéines est plus prononcé sur le rendement en muscles pectoraux que sur la vitesse de croissance. La supplémentation en thréonine compense en grande partie les effets de la baisse de la teneur des régimes en protéines brutes.

L'expérience la plus complète est celle de Lehmann *et al* (1997). Elle porte sur les périodes 0-4 semaines, 8-12 semaines et 16-20 semaines d'âge. Le nombre de répétitions et d'animaux mis en œuvre (6 répétitions de 16 à 18 mâles par régime) est tout à fait satisfaisant. Seuls 15 animaux sont disséqués pour chaque traitement□; ce qui ne rend pas le dispositif très puissant pour les mesures de rendement en muscles. Quoi qu'il en soit, les résultats peuvent être résumés selon les

chiffres présentés dans le tableau 7. On regrettera que les auteurs n'aient pas étudié les périodes de 4 à 8 semaines et de 12 à 16 semaines qui présentent beaucoup d'intérêt dans les conditions françaises de production. Le besoin entre 0 et 4 semaines confirme les résultats des travaux présentés précédemment. On constate que le modèle curvilinéaire conduit à une estimation du besoin supérieure à celle du modèle linéaire à plateau (« broken line »). Dans cet essai, le besoin correspondant à la meilleure efficacité alimentaire n'est pas supérieur à celui trouvé pour le gain de poids. Pour ce qui concerne les effets sur le rendement en viande, les auteurs observent une légère réponse de la proportion de muscles pectoraux à l'apport de thréonine, qui pourrait être assimilée à une réponse d'aspect curvilinéaire. Malheureusement, seuls quatre niveaux de thréonine ont bénéficié de ces mesures ; il est difficile d'en déduire une équation de réponse non linéaire.

5 / Chez le caneton de Barbarie

Il existe bien évidemment encore moins de références bibliographiques relatives au caneton de Barbarie.

Une publication récente de Baeza et Leclercq (1998) permet seulement de fixer une zone de déficience en thréonine chez le caneton mâle entre les âges de 8 et 12 semaines. Nous avons résumé les principaux résultats dans le tableau 8. Le but de cette série d'essais était de se rapprocher de formules du type céréales + acides aminés, telles que celles développées maintenant pour le porc en finition. En fait, il a été constaté qu'il faut ajouter tout de même un peu de tourteau de soja au mélange de céréales pour assurer de bonnes performances lorsque l'on veut recourir aux acides aminés industriels commercialement disponibles (méthionine, lysine, thréonine et tryptophane). Les deux expériences ont consisté à comparer un régime témoin renfermant 150 ou 160 g de protéines brutes par kg avec des régimes n'en renfermant que 120 ou 124 g mais supplémentés soit par les quatre acides aminés, soit par la méthionine, la lysine et le tryptophane. Dans les conditions expérimentales décrites (usage d'un peu de tourteau de soja) la supplémentation en tryptophane n'est pas nécessaire. En revanche, l'addition de thréonine permet d'augmenter la proportion de filets dans l'une des deux expériences présentées. En effet, 3,52 g de thréonine digestible par kg d'aliment permettent d'atteindre la même vitesse de croissance que dans le lot témoin, alors que la proportion de filets n'atteint pas le niveau du témoin. Au contraire, la concentration de 4,96 g de thréonine digestible par kg permet d'atteindre les mêmes performances que le lot témoin. Le besoin pour la croissance semble être inférieur ou égal à 3,52 g/kg, voire 3,29 g/kg. Le besoin pour le développement musculaire se situe entre 3,52 g/kg et 4,96 g/kg, mais doit être supérieur à 3,52 g/kg.

Tableau 8. Effets de la thréonine sur la croissance et la qualité de carcasse de canetons de Barbarie mâles (d'après Baeza et Leclercq 1998).

	Régime témoin	Régime pauvre en protéines + lysine + tryptophane + méthionine + thréonine	
<i>Expérience 1</i>			
Protéines brutes (g/kg)	150,50	120,00	120,00
Thréonine digestible (g/kg)	4,50	4,49	3,29
Gain de poids (g/j)	40,3 ^a	33,4 ^b	34,5 ^b
Indice de consommation	4,84	5,26	5,28
% Gras abdominal	2,88	3,03	2,98
% Filets	18,90	18,60	18,70
<i>Expérience 2</i>			
Protéines brutes (g/kg)	160,00	124,00	124,00
Thréonine digestible (g/kg)	4,96	4,96	3,52
Gain de poids (g/j)	38,5	37,6	40,3
Indice de consommation	5,15	5,18	4,95
% Gras abdominal	2,31	2,50	2,34
% Filets	18,56 ^a	17,98 ^{ab}	17,77 ^b

Il faut noter que, dans ces essais, contrairement au poulet de chair, le caneton n'augmente ni son adiposité ni son indice de consommation quand on réduit la teneur en protéines brutes de son régime de finition.

Compte tenu de l'imprécision des deux expériences présentées dans le tableau 8, une simulation de réponse à l'apport de thréonine digestible a été réalisée à partir des performances d'un lot témoin élevé à la station INRA de Recherches Avicoles de Nouzilly. L'objectif est, en particulier, d'estimer à partir des performances individuelles de croissance supposées maximales, les conséquences de l'hétérogénéité du troupeau (en poids initial à 8 semaines et en gain de poids entre 8 et 12 semaines). Des simplifications ont été adoptées, faute d'informations plus précises : la composition du gain de poids en protéines et lipides est supposée identique pour tous les individus, le besoin énergétique d'entretien est considéré comme lié au poids vif par une simple constante tirée d'une expérimentation sur poules reproductrices d'environ 3,5 kg de poids vif. Le détail des hypothèses est donné dans le tableau 9 ; le besoin en thréonine digestible, en mg par g de gain, est tiré du modèle linéaire appliqué aux données observées sur poulet de chair (tableau 4), corrigé d'un facteur 19/17, compte tenu de la composition en protéines du gain de poids du canard (environ 19 %) comparée à celle du poulet de chair actuel (environ 17 %).

La simulation a consisté à calculer pour chaque caneton son besoin énergétique maximal (entretien + croissance), en utilisant les constantes du tableau 9, et d'en déduire sa consommation d'aliment, en divisant le besoin énergétique par la concentration énergétique de l'aliment. Ensuite nous avons calculé le besoin en thréonine digestible, en considérant un besoin d'entretien de 40 mg/kg/jour et un besoin de croissance fonction du gain de poids de chaque animal entre 8 et 12 semaines. En divisant ce besoin, exprimé en g, par la consommation d'aliment, on obtient le besoin individuel théorique de chaque animal, exprimé en teneur de l'aliment (g thréonine digestible par kg d'aliment). Appliqué à l'ensemble des 70 canetons, ces calculs aboutissent à une population de besoins individuels présentant une moyenne (3,47 g/kg) et un écart type (0,252 g/kg). On peut ensuite recalculer les performances de chaque animal pour des teneurs différentes de l'aliment en thréonine. Pour cela on suppose que si la teneur de l'aliment est inférieure au besoin de l'individu, son gain de poids est égal au gain de poids maximum multiplié par le rapport de la teneur en thréonine diminuée de la teneur nécessaire à l'entretien (estimée à 0,9 g/kg d'aliment) et du besoin maximum diminué lui aussi du besoin d'entretien. Ce besoin d'entretien exprimé en teneur de l'aliment est une valeur moyenne estimée, sachant que le poids moyen des canetons est de 3,82 kg à 8 semaines et leur gain de poids moyen quotidien de 39 g, ce qui permet d'estimer à 153 mg le besoin d'entretien en thréonine pour une

consommation journalière estimée à 170 g. D'où une concentration théorique dans l'aliment de 0,9 g/kg pour assurer l'entretien. Si la concentration de la thréonine dans l'aliment dépasse le besoin théorique de l'individu, son gain de poids est alors égal à son gain de poids maximum (potentiel génétique). On peut ainsi calculer, pour différentes concentrations de thréonine dans l'aliment, la moyenne des gains de poids et la moyenne des consommations, et en déduire l'indice global de consommation du troupeau. Cette approche est proposée à titre indicatif. Elle peut faire l'objet d'améliorations en fonction de données plus précises sur le besoin d'entretien qui n'est pas connu avec précision. Cependant elle a le mérite de rendre compte des phénomènes fréquemment observés.

Les résultats de simulation présentés dans le tableau 9 illustrent bien la curvilinearité de la réponse du gain de poids et de l'indice de consommation en fonction de la teneur de l'aliment en thréonine. La simulation est basée sur un gain de poids moyen maximal de 1 094 g entre les âges de 8 et 12 semaines, pour un poids initial moyen de 3 820 g. Le calcul suggère que le besoin moyen en thréonine digestible est de 3,47 g/kg d'aliment et que l'indice de consommation moyen devrait être de 4,637. Cette dernière valeur est très vraisemblable car assez proche des valeurs observées (Baeza et Leclercq 1998). Les bases de calcul du besoin énergétique qui permettent d'estimer la consommation d'aliment semblent donc justifiées. Le besoin moyen de 3,47 g de thréonine digestible par kg présente un écart type de 0,252 g/kg. Il s'ensuit qu'il faudrait atteindre 3,97 g/kg pour couvrir les besoins de 97,5 % des animaux.

Ce type de modèle permet une approche économique en optimisant les coûts marginaux ou en cherchant à minimiser le coût alimentaire par kg de gain de poids ; il suffit de calculer le coût du kg d'aliment en fonction de la supplémentation par la thréonine.

Tableau 9. Simulation de la réponse d'un troupeau de canetons de Barbarie en finition (8-12 semaines) à la concentration de thréonine digestible dans l'aliment.

Thréonine digestible (g/kg aliment)	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
Gain de poids moyen (g)	800	883	963	1 030	1 074	1 089
Poids vif moyen à 12 semaines (g)	4 620	4 703	4 783	4 850	4 894	4 909
Consommation moyenne d'aliment (g)	4 439	4 617	4 791	4 936	5 031	5 064
Indice partiel de consommation	5,549	5,229	4,975	4,792	4,684	4,650
Thréonine consommée (g)	12,4	13,8	15,3	16,8	18,1	19,2

Hypothèses

Composition du gain de poids : 19 % protéines et 20 % lipides
Coût énergétique du gain de poids : 14,4 kcal/g protéines ; 13,4 kcal/g lipides
Besoin énergétique d'entretien : 76 kcal/kg poids vif/jour
Energie métabolisable de l'aliment : 3 000 kcal/kg
Besoin d'entretien en thréonine : 40 mg/kg/jour
Besoin de croissance en thréonine : 11,7 mg/g gain

Données individuelles de base

Observations de 70 animaux d'un lot témoin INRA
Poids vif moyen à 8 semaines : 3 820 g (écart type 228,3 g)
Gain de poids moyen (8 à 12 semaines) : 1 094 g (écart type 233,1 g)

Chez le caneton de Barbarie, un apport de thréonine insuffisant risque de réduire la proportion de filets.

De nouveau il faut insister sur les limites de cette approche qui n'a concerné que la vitesse de croissance et l'indice de consommation, sans prise en compte du rendement en filets.

6 / Le besoin en thréonine dépend-il de la teneur en protéines ?

Il a été signalé que des excès de certains acides aminés pouvaient augmenter le besoin en thréonine. C'est ainsi que Krieghoff et Berger (1977) ont pu montrer que les excès de méthionine dépriment fortement la croissance du poulet et que les supplémentations en thréonine ne permettent pas de supprimer l'effet dépressif de la méthionine. Cette expérience est toutefois assez éloignée des conditions habituelles d'emploi de la méthionine et de la thréonine (supplémentation de 1, 2 ou 3 %). Davis et Austic (1982a) ont comparé les effets d'excès de tryptophane, de phénylalanine, d'acides aminés à chaîne ramifiée, de sérine et d'un mélange d'acides aminés indispensables. L'excès de tryptophane (+ 1,5 ou 2,5 %) réduit la croissance et ne peut être contrebalancé par un apport supplémentaire de thréonine. Au contraire l'addition de 3 % de sérine à un régime équilibré ralentit significativement la croissance ; ce déséquilibre peut, lui, être parfaitement effacé grâce à une supplémentation en thréonine. L'excès de phénylalanine est sans effet. Une supplémentation par 6 % d'acides aminés à chaîne ramifiée ou 6 % d'un mélange d'acides aminés indispensables réduit la vitesse de croissance et peut être contrebalancée par un apport supplémentaire de 0,4 % de thréonine. Il semble donc bien exister des antagonismes entre certains acides aminés et la thréonine. Pour ce qui concerne l'antagonisme entre sérine et thréonine, Davis et Austic (1982b) l'expliquent entièrement par un effet sur l'appétit, puisque le « pair-feeding » ou le gavage des animaux ingérant 3 % de sérine suppriment les effets de l'excès de sérine. Les auteurs n'observent d'ailleurs aucune augmentation du catabolisme de la thréonine due à l'excès de sérine. Il s'agit donc d'un antagonisme jouant essentiellement par l'intermédiaire de l'appétit et non pas sur le métabolisme.

Rangel-Lugo *et al* (1994), travaillant sur la période de démarrage 0-14 jours, concluent qu'une teneur élevée en protéines (25 %) tend à augmenter légèrement le besoin en thréonine par kg d'aliment, par comparaison avec un régime classique (20 % de protéines brutes). Toutefois, si on raisonne en termes de relation curvilinéaire entre gain de poids et thréonine ingérée, on n'observe pas d'effet de la teneur en protéines sur le besoin en thréonine. Austic (1996) signale également qu'un régime contenant 22 % de protéines nécessite une teneur en thréonine plus élevée qu'un régime titrant 17 % de protéines. Cependant, les supplémentations en thréonine étant réa-

lisées par étapes de 5 g/kg (4,5 - 9,5 - 14,5 - 19,5 et 24,5 g thréonine/kg), on peut s'interroger sur la précision de cette observation et son utilité pratique.

Quoi qu'il en soit, comme le suggère Austic (1996), les excès d'apport de certains acides aminés doivent probablement intervenir surtout par l'intermédiaire de la régulation de l'appétit et non pas au niveau du métabolisme de la thréonine. Il a été en effet démontré chez le rat que le cortex prépyriforme intervient dans les déséquilibres alimentaires en thréonine (Gietzen *et al* 1986). Dans de telles situations, la teneur en thréonine du fluide de cette région du cerveau est particulièrement faible. L'injection de thréonine dans le cortex prépyriforme rétablit l'appétit. Il ne faut toutefois pas exclure un effet de l'apport global de protéines sur le catabolisme de la thréonine, comme cela a pu être montré chez le porc (Ballèvre *et al* 1991). Une expérience récente de Ten Doeschate *et al* (1996) le suggère. En effet ces auteurs observent une interaction entre la teneur en acides aminés non indispensables (acide glutamique + acide aspartique + alanine) et la teneur en thréonine de l'aliment qui pourrait s'expliquer par ce mécanisme.

Pour l'instant on ne dispose pas d'expériences plus proches des conditions pratiques, permettant d'estimer l'impact réel de la teneur en protéines de l'aliment sur le besoin en thréonine. L'une des premières raisons de ce manque de preuve réside dans la difficulté d'induire des carences prononcées en thréonine avec des régimes riches en protéines. De plus, des biais expérimentaux peuvent très souvent expliquer les interactions signalées entre teneur en protéines des aliments et besoin en acides aminés. Une analyse précise des observations suggère par exemple qu'une mauvaise connaissance des besoins en acides aminés limitants autres que celui étudié peut très bien expliquer les phénomènes observés, car les régimes à teneurs réduites en protéines brutes donnent souvent des vitesses de croissance un peu plus faibles (Surisdiarto et Farrell 1991). Par ailleurs, la teneur de l'aliment en l'acide aminé étudié, sous sa forme digestible, peut être mal estimée, ce qui peut induire des translations des droites ou des courbes de réponse qui sont considérées comme significativement différentes, alors qu'elles ne le sont pas. Les études portant sur ce thème exigent donc des conditions expérimentales extrêmement rigoureuses.

Conclusions

La thréonine est un acide aminé qui devient très rapidement limitant pour beaucoup d'espèces animales, en particulier les volailles, lorsqu'on a recours aux matières premières habituellement employées en alimentation animale. Cependant il paraît difficile d'induire des carences très graves dans les conditions normales de formulation. En particulier le recours au tourteau de soja pour couvrir les

La thréonine peut être limitante pour beaucoup d'espèces avicoles, mais les carences ne surviennent que lorsque la teneur en protéines du régime est très réduite.

besoins en arginine, valine et tryptophane, contribue à empêcher l'apparition de déficiences prononcées en thréonine. Seul l'emploi de matières premières issues des céréales (gluten) ou les céréales elles-mêmes, ainsi que l'abaissement des teneurs en protéines des

aliments grâce à l'usage de la méthionine et de la lysine, peuvent rendre plus évidentes des situations de carences significatives. C'est donc surtout dans les aliments de finition que la supplémentation par la thréonine doit trouver son utilité première.

Références

- Alleman F., Michel J., Chagneau A.M., Leclercq B., 1999. Comparative responses of genetically lean and fat broiler chickens to dietary threonine concentration. *Brit. Poult. Sci.*, (sous presse).
- Austic R.E., 1996. Dietary protein level and the response to dietary amino acids. *Proceeding Cornell Nutr. Conf.*, 168-175.
- Baeza E., Leclercq B., 1998. Use of industrial amino acids to allow low protein concentrations in finishing diets for growing muscovy ducks. *Brit. Poult. Sci.*, 39, 90-96.
- Ballèvre O., Houlier M.L., Prugnaud J., Bayle G., Bercovici D., Sève B., Arnal M., 1991. Altered partition of threonine metabolism in pigs by protein-free feeding or starvation. *Am. J. Physiol.*, 261, E 748-E 757.
- Blair M.E., Potter L.M., 1987. Deficient amino acids in protein of dehulled soybean meal for young turkeys. *Poult. Sci.*, 66, 1813-1817.
- Davis A.T., Austic R.E., 1982a. Threonine imbalance and threonine requirement of the chicken. *J. Nutr.*, 112, 2170-2176.
- Davis A.T., Austic R.E., 1982b. Threonine metabolism of chicks fed threonine-imbalanced diets. *J. Nutr.*, 112, 2177-2186.
- D'Mello J.P.F., 1976. Requirements of the young turkey for sulphur amino acids and threonine : comparison with other species. *Brit. Poult. Sci.*, 17, 157-162.
- Edwards H.M., Baker D.H., Fernandez S.R., Parsons C.M., 1997. Maintenance threonine requirement and efficiency of its use for accretion of whole-body threonine and protein in young chicks. *Brit. J. Nutr.*, 78, 111-119.
- Fernandez S.R., Aoyagi S., Han Y., Parsons C.M., Baker D.H., 1994. Limiting order of amino acids in corn, and soybean meal for growth of the chick. *Poult. Sci.*, 73, 1887-1896.
- Gietzen D.W., Leung P.M.B., Rogers Q.R., 1986. Norepinephrine and amino acids in prepyriform cortex of rats fed imbalanced amino acid diets. *Physiol. Behav.*, 36, 1071-1077.
- Jackson S., Stas R.J., Potter L.M., 1983. Relative deficiencies of amino acids and nitrogen per se in low protein diets for young turkeys. *Poult. Sci.*, 62, 1117-1119.
- Kharlakian H.G., Shellem T.A., Thomas O.P., Kirk Baer C., 1996. Lysine, methionine and threonine requirements in broilers during the withdrawal period. *Proceeding Maryland Nutrition Conference*, Baltimore, 53-63.
- Kidd M.T., Kerr B.J., 1997. Threonine responses in commercial broilers at 30 to 42 days. *J. Appl. Poultry Res.*, 6, 362-367.
- Kidd M.T., Kerr B.J., Finman J.D., Boling S.D., 1996. Growth and carcass characteristics of broilers fed low protein threonine supplemented diets. *J. Appl. Poultry Res.*, 5, 180-190.
- Kidd M.T., Kerr B.J., Anthony N.B., 1997. Dietary interactions between lysine and threonine in broilers. *Poult. Sci.*, 76, 608-617.
- Kriehoff E., Berger H., 1977. Studies on the methionine-threonine imbalance in chicks. *Arch. Tierernähr.*, 27, 359-366.
- Leclercq B., 1996. Les rejets azotés issus de l'aviculture : importance et progrès envisageables. *INRA Prod. Anim.*, 9, 91-101.
- Leclercq B., 1997. Specific effects of lysine on broiler production : comparison with threonine and valine. *Poult. Sci.*, 77, 118-123.
- Lehmann D., Pack M., Jeroch H., 1997. Effect of dietary threonine in starting, growing and finishing turkey toms. *Poult. Sci.*, 76, 696-702.
- Penz A.M., Colnago G.L., Jensen L.S., 1997. Threonine supplementation of practical diets for 3- to 6-wk-old broilers. *J. Appl. Poultry Res.*, 6, 355-361.
- Rangel-Lugo M., Su C.L., Austic R.E., 1994. Threonine requirement and threonine imbalance in broiler chickens. *Poult. Sci.*, 73, 670-681.
- Schutte J.B., Pack M., 1995. Sulfur amino acid requirement of broiler chicks from fourteen to thirty eight days of age. *Brit. Poult. Sci.*, 74, 480-487.
- Smith N.K., Wadrou P., 1988. Investigations of threonine requirements of broiler chicks fed diets based on grain sorghum and soybean meal. *Poult. Sci.*, 67, 108-112.
- Surisdarto X., Farrell D.J., 1991. The relationship between dietary crude protein and dietary lysine requirement by broiler chicks on diets with and without the « ideal » amino acid balance. *Poult. Sci.*, 70, 830-836.
- Ten Doeschate R.A.H.M., Scheele C.W., Schreurs V.V.A.M., Boekholt H.A., Brandsma M., 1996. Dietary nitrogen excess might increase threonine requirement. *Proceedings of the VII International Symposium on Protein Metabolism and Nutrition*, 385.
- Thomas O.P., Shellem T.A., Sprague M., Kharlakean H.G., 1995. Amino acid requirements during the withdrawal period. *Proceeding Maryland Nutrition Conference*, Baltimore, 71-75.
- Uzu G., 1986. Threonine requirement in broilers. *A.E.C. information*, 1, 252-258.
- Waibel P.E., Carlson C.W., Noll S.L., Brannon J., 1995. Response to threonine and other amino acids beyond Met & Lys by poult on low protein diets. *Poult. Sci.*, 74 (Suppl. 1), 64 (Abstr).
- Warnick R.E., Anderson J.O., 1973. Essential amino acid levels for starting turkey poults. *Poult. Sci.*, 52, 445-452.
- Webel D.M., Fernandez S.R., Parsons C.M., Baker D.H., 1996. Digestible threonine requirement of broiler chickens during the period three to six and six to eight weeks post hatching. *Poult. Sci.*, 75, 1253-1257.

Abstract

Threonine requirement of avian species

Threonine is often the third limiting essential amino acid for avian species when they are fed on diets based on corn and soybean meal. Several data on chicken broiler requirement have been recently published. They are less abundant for turkey and duck, mainly during the finishing per-

iod. Threonine does not seem to influence significantly carcass quality (muscle and abdominal fat proportions). Threonine deficiencies can only be observed in practical conditions, when crude protein content is deeply reduced.

Leclercq B., 1998. Le besoin en thréonine des volailles de chair. INRA Prod. Anim., 11, 263-272.