

Couverture des besoins en acides aminés chez le porcelet alimenté avec des régimes à basse teneur en protéines

M. GLOAGUEN^{1,2}, N. LE FLOC'H^{1,2}, J. VAN MILGEN^{1,2}

¹ INRA, UMR1348 PEGASE, F-35590 Rennes, France

² Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, F-35000 Rennes, France

Courriel : jaap.vanmilgen@rennes.inra.fr

Le coût élevé des matières premières et la forte pression environnementale rendent le contexte très favorable à la réduction de la teneur en protéines dans l'aliment des porcelets. La disponibilité de nouveaux acides aminés libres sur le marché permet de maintenir les performances en réduisant la teneur en protéines de l'aliment, mais nécessite d'identifier les acides aminés limitant la croissance, de connaître la réponse des porcelets aux apports d'acides aminés, et ainsi d'estimer leurs besoins.

Dans un contexte où les ressources alimentaires, notamment les protéines alimentaires, sont de plus en plus chères et les pressions environnementales de plus en plus fortes, une meilleure utilisation des protéines alimentaires permet de réduire le coût de l'aliment et les rejets d'azote par l'animal. Par ailleurs, l'élevage du porcelet, entre 10 et 25 kg, pose des questions très spécifiques. En effet, l'expression d'une vitesse de croissance maximale par le porcelet implique, du fait de sa capacité d'ingestion limitée et de son fort potentiel à déposer des protéines dans ses tissus, l'ingestion d'un aliment riche en acides aminés, les constituants des protéines. Néanmoins, les protéines apportées en excès favorisent la prolifération des bactéries pathogènes dans le tractus gastro-intestinal (Ball et Aherne 1987) et les diarrhées de post-sevrage, responsables de pertes économiques importantes. Baisser l'apport de protéines de l'aliment est une stratégie nutritionnelle permettant de réduire la fréquence de ces diarrhées et de ce fait l'utilisation des antibiotiques, une des préoccupations actuelles majeures de la filière porcine. En effet, dans le cadre du plan national de réduction des risques d'antibiorésistance en médecine vétérinaire, lancé en novembre 2011, le ministère de l'Agriculture s'est engagé à réduire de 25% en 5 ans l'utilisation des antibiotiques (Plan Ecoantibio 2017).

L'apport d'acides aminés libres dans les régimes à basse teneur en protéines permet de couvrir, sans excès, les

besoins en Acides Aminés Indispensables (AAI) pour la croissance et d'améliorer l'équilibre en acides aminés des régimes, ainsi que l'efficacité d'utilisation de l'azote chez le porcelet. Les apports de L-lysine, de L-thréonine, de DL-méthionine et de L-tryptophane, les acides aminés les plus limitants pour la croissance, ont déjà permis d'abaisser significativement la teneur en Matière Azotée Totale (MAT) de l'aliment des porcelets. Depuis 2009, la valine sous forme libre est disponible sur le marché des matières premières pour l'alimentation animale et peut être intégrée dans les formulations, offrant ainsi la possibilité de réduire davantage la teneur en MAT des aliments. L'ampleur de la baisse possible de la teneur en MAT dans les régimes reste cependant inconnue. L'identification des AAI limitant la croissance des porcelets après la lysine, la thréonine, la méthionine et le tryptophane et l'estimation de leurs besoins sont alors requises. L'étude des réponses d'ingestion et de croissance aux apports d'acides aminés permet d'estimer le besoin en acide aminé pour une vitesse de croissance maximale. L'objet de cet article est de faire le point sur l'état des connaissances concernant la couverture des besoins en acides aminés par des régimes à basse teneur en protéines qui garantissent la vitesse de croissance maximale des porcelets, avec une attention particulière portée aux Acides Aminés à Chaîne Ramifiée (AACR : valine, leucine et iso-leucine).

1 / Protéines, acides aminés et matières azotées totales de l'aliment

Les protéines sont des matières azotées composées d'une ou plusieurs chaînes d'acides aminés. Leur rôle nutritionnel est de fournir de l'azote, des acides aminés et de l'énergie nécessaire à la synthèse de protéines par l'animal. En alimentation, la teneur en protéines d'une matière première ou d'un aliment est donc d'un intérêt nutritionnel majeur. Elle est estimée indirectement à partir de la MAT aussi appelée protéine brute. Elle est calculée en multipliant la teneur en azote total de l'aliment par le coefficient de Jones égal à 6,25, en considérant que les protéines contiennent en moyenne 16% d'azote ($100/16 = 6,25$) (Jones 1931). Toutefois, la MAT n'est qu'une approximation de la véritable teneur en protéines. La teneur en azote des protéines dépend de leur composition en acides aminés puisque la teneur en azote des acides aminés varie de 8% pour la tyrosine à 32% pour l'arginine. Le coefficient de Jones diffère d'une matière première à l'autre sur une plage de valeurs situées entre 5,3 et 7,7 (Jones 1931, Sripem *et al* 2011). Par ailleurs, la MAT ne reflète pas uniquement la teneur en protéines d'un aliment mais l'ensemble de ses composés azotés qui comprend, outre les protéines, des peptides, des acides aminés libres, des amides, etc. De ce fait, le dosage des acides aminés de l'aliment, en complément du

Encadré 1. Acides aminés indispensables et non-indispensables.

Les AAI sont les acides aminés que le porc en bonne santé n'est pas capable de synthétiser ou, de synthétiser en quantité insuffisante pour couvrir ses besoins de croissance : lysine, thréonine, méthionine, (méthionine + cystéine), tryptophane, valine, isoleucine, leucine, histidine, phénylalanine, (phénylalanine + tyrosine) et arginine. Les acides aminés sont qualifiés de non-indispensables lorsque la synthèse de *nov*o couvre totalement le besoin : alanine, asparagine, aspartate, sérine, glycine, glutamate, glutamine et proline. Ces derniers nécessitent toutefois la présence de précurseurs carbonés et d'azote. Ainsi l'ingestion d'un aliment trop pauvre en azote limite la synthèse de protéines. La formulation d'un aliment consiste alors à apporter en quantité suffisante pour la synthèse de protéines les 10 AAI et une source d'azote. La qualité nutritionnelle des protéines alimentaires dépend alors de deux composantes : son profil en AAI et sa teneur en azote.

dosage de l'azote, permet de mieux renseigner la valeur nutritionnelle de celui-ci.

2 / Besoins en acides aminés

2.1 / Acides aminés indispensables et non-indispensables

A partir de 20 acides aminés, l'organisme peut synthétiser toutes les protéines nécessaires à ses besoins d'entretien (renouvellement des protéines corporelles) et de production (croissance). C'est pourquoi l'ensemble de ces acides aminés peut être considéré comme essentiel pour la synthèse de protéines au cours de la croissance. Le besoin en acides aminés est principalement couvert par quatre formes d'approvisionnement : *i*) l'apport d'acides aminés alimentaires, *ii*) la synthèse *de novo* des acides aminés à partir d'un squelette carboné et d'une source d'azote, *iii*) le recyclage des acides aminés issus de la dégradation des protéines corporelles et *iv*) la flore microbienne du tractus gastro-intestinal (Torralardona *et al* 2003).

Parmi les 20 acides aminés nécessaires à la synthèse de protéines, 12 sont considérés comme indispensables chez le porc. Chez le porc en croissance, la classification des AAI vs Acides Aminés Non-Indispensables (AANI) est fondée sur la composante de croissance du besoin (encadré 1). Si la teneur d'un acide aminé dans l'aliment peut limiter la croissance, il est considéré comme indispensable. Les acides aminés ont également des rôles dans le maintien de l'équilibre acido-basique, la sécrétion hormonale, les défenses antioxydantes, l'expression des gènes, la différenciation et la croissance cellulaire, la synthèse et la dégradation de protéines, la signalisation cellulaire, la réponse immunitaire, le métabolisme des nutriments et l'intégrité de la muqueuse intestinale (Wu 2010). Ainsi, Wu *et al* (2013) suggèrent que certains acides aminés considérés communément comme non-indispensables chez l'Homme et l'animal, en particulier la proline, la glycine, la glutamine et

le glutamate, sont nutritionnellement indispensables et devraient être inclus dans les tables nutritionnelles, en particulier dans certaines situations physiologiques ou pathologiques (état inflammatoire, stress...).

2.2 / Définition des besoins

Le besoin en acide aminé est une notion complexe puisque l'apport d'acides aminés doit satisfaire une multitude de fonctions physiologiques. De façon

générale, l'apport d'acides aminés doit garantir la santé d'un individu et éviter les signes biologiques de carence. Chez le porcelet, pour répondre aux objectifs de production, la fonction prioritaire mesurée est la composante de croissance du besoin. La teneur en acides aminés de l'aliment doit permettre aux porcelets d'exprimer leur potentiel de croissance sans pénaliser la consommation d'aliment et l'efficacité alimentaire (encadré 2).

La notion de protéine idéale correspond à une protéine dont l'équilibre entre acides aminés permet de couvrir les besoins sans déficit, ni excès. Ce concept de la protéine idéale est traditionnellement utilisé chez le porc pour exprimer les besoins en acides aminés, puisque les proportions entre acides aminés sont relativement stables au cours de la croissance et quel que soit le potentiel de croissance et la capacité d'ingestion du porc. La notion de protéine idéale, sa composition et ses limites ont déjà fait l'objet d'une revue de synthèse détaillée par Henry (1993). L'utilisation de ce concept a largement été adopté et a abouti à

Encadré 2. Définition du besoin en acides aminés chez le porc en croissance.

- Le besoin est défini classiquement comme la concentration minimale d'acide aminé dans l'aliment permettant de maximiser la vitesse de croissance d'une population de porcs.
- La teneur en acides aminés de l'aliment, disponibles pour le métabolisme du porc, est raisonnée à l'aide de la Digestibilité Illéale Standardisée (DIS). La digestibilité est évaluée au niveau de l'iléon puisque le profil des acides aminés à la sortie de l'intestin grêle est remanié dans le gros intestin par la flore bactérienne, et corrigée en tenant compte des pertes endogènes basales (il s'agit des protéines venant de l'animal et excrétées dans le tube digestif, comme par exemple des cellules ou du mucus). En l'état actuel des connaissances, la DIS constitue le meilleur estimateur de la disponibilité des acides aminés de l'aliment.
- En pratique, le concept de la protéine idéale est utilisé pour exprimer les besoins en acides aminés. La protéine idéale présente un profil en acides aminés en adéquation avec les besoins de l'animal. Les besoins sont exprimés relativement à la lysine puisque cet acide aminé est le 1^{er} facteur limitant la croissance dans la plupart des régimes utilisés chez le porc. Les proportions entre acides aminés sont supposées constantes pendant la croissance. En conséquence, il suffit d'estimer le besoin en lysine (exprimé en % de l'aliment ou en g par MJ d'énergie nette) et de connaître les proportions entre acides aminés de la protéine idéale pour estimer l'ensemble des besoins en acides aminés.

Exemple : besoins en acides aminés estimés par le NRC (1998) pour des porcs de 10-20 kg exprimés en teneur totale, digestible illéale standardisée (DIS) et selon le concept de la protéine idéale.

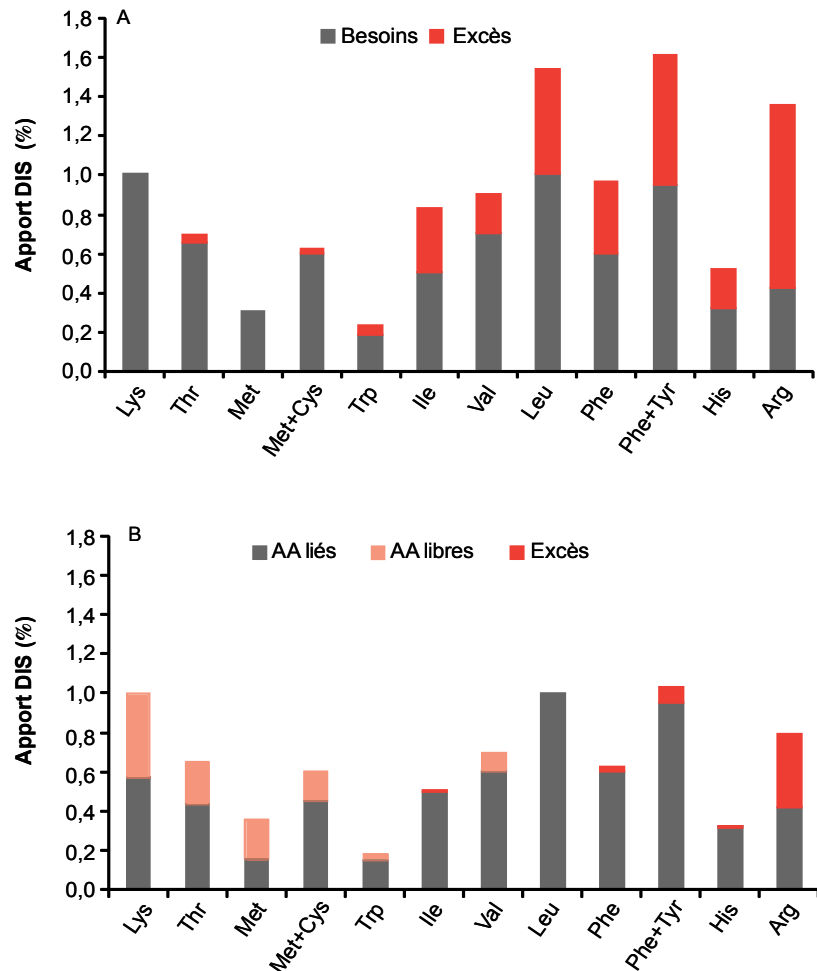
Acides aminés	Teneur totale, % d'aliment	DIS, % d'aliment	Protéine idéale
Lysine	1,15	1,01	100
Thréonine	0,74	0,63	62
Méthionine	0,30	0,27	27
Méthionine + Cystéine	0,65	0,58	57
Tryptophane	0,21	0,18	18
Valine	0,79	0,69	68
Isoleucine	0,63	0,55	54
Leucine	1,12	1,02	101
Histidine	0,36	0,32	32
Phénylalanine	0,68	0,61	60
Phénylalanine + Tyrosine	1,06	0,95	94
Arginine	0,46	0,42	42

des recommandations par divers auteurs et tables nutritionnelles (Henry 1993, NRC 1998, BSAS 2003, NRC 2012). Dans ces tables, les besoins en acides aminés sont proposés pour une gamme de poids vif donnée. Toutefois, le besoin, exprimé en g/j, varie d'un individu à l'autre selon le génotype, le sexe et l'environnement climatique ou sanitaire (Noblet et Quiniou 1999). Ainsi, les besoins peuvent être réévalués pour des sous-populations de porcs ou des conditions environnementales ou sanitaires spécifiques. Par ailleurs, les tables nutritionnelles ne prennent pas en compte l'ensemble des facteurs de variation du besoin tel que les méthodes expérimentales de mesure et d'estimation du besoin. Ceci aboutit à une forte variabilité des besoins estimés et des profils de la protéine idéale ainsi que cela a été récemment montré pour le tryptophane (Simongiovanni *et al* 2012) et l'isoleucine (van Milgen *et al* 2012).

2.3 / La couverture des besoins en acides aminés par des régimes à basse teneur en protéines

La formulation d'un aliment complet consiste à mélanger des matières premières dans des proportions qui permettent d'atteindre des valeurs nutritionnelles déterminées selon les besoins en AAI afin d'assurer l'objectif de production. Le profil en AAI de l'aliment complet doit s'approcher au plus près de celui de la protéine idéale afin d'éviter les carences qui pénalisent les performances et les excès qui sont catabolisés et sources de rejets azotés. Les matières premières d'origine animale sont plus équilibrées en AAI que les matières premières d'origine végétale mais leur utilisation reste limitée et elles sont généralement plus onéreuses. Par rapport au profil de la protéine idéale, le blé et l'orge sont par exemple d'abord limitants en lysine puis en thréonine et en trypto-

Figure 1. Utilisation d'acides aminés libres pour améliorer le profil en acides aminés et réduire la teneur en protéines d'un aliment pour porcelets de 21,6% (A) à 17,1% (B) de matières azotées totales en maintenant à 1,00% la teneur en lysine digestible.



phane (encadré 3). Pour le maïs, le tryptophane et la lysine sont tous deux les premiers AAI limitants. A la différence des céréales, les AA soufrés (méthionine + cystéine) sont les premiers AAI limitants dans le tourteau de soja avant la lysine, le tryptophane et la thréonine. L'association de céréales et de tourteau

de soja est alors un bon compromis pour équilibrer la protéine alimentaire. Il est ainsi possible d'équilibrer l'aliment en incorporant des sources végétales avec un profil en AAI complémentaire. Toutefois, malgré le grand nombre de matières premières utilisables, la protéine alimentaire n'est jamais parfaitement équilibrée ce qui conduit à une faible efficacité d'utilisation de l'azote alimentaire et à la formulation d'aliments avec des teneurs en protéines élevées et un coût conséquent.

En pratique, la protéine alimentaire peut être rééquilibrée en formulant des régimes à basse teneur en protéines et en apportant des AAI sous forme libre pour couvrir les carences en AAI. L'utilisation de la L-lysine, de la L-thréonine, de la DL-méthionine et du L-tryptophane sous forme libre a permis de réduire le coût de l'aliment et la MAT des aliments des porcelets d'approximativement 5 points (de 22 à 17%, figure 1). La réduction de la teneur en protéines des aliments est actuellement favorisée par la disponibilité de nouveaux AAI libres sur le marché des matières

Encadré 3. Les acides aminés limitants.

Les acides aminés d'une matière première ou d'un aliment complet sont dits limitants lorsque leur teneur est insuffisante pour maintenir le potentiel de croissance de l'animal.

Séquence des acides aminés limitants⁽¹⁾

	1 ^{er}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}
Blé	Lysine	Thréonine	Tryptophane	Valine
Orge	Lysine	Thréonine	Tryptophane	Isoleucine
Maïs	Lysine, Tryptophane		Thréonine	Isoleucine
Tourteau de soja	Soufrés ⁽²⁾	Thréonine, Lysine, Tryptophane		
Aliment complet ⁽³⁾	Lysine	Thréonine	Soufrés	Tryptophane

⁽¹⁾ Les acides aminés cités dans une même case sont co-limitants.

⁽²⁾ Soufrés = méthionine + cystéine.

⁽³⁾ Aliment formulé à base de blé, d'orge, de maïs et de tourteau de soja.

premières pour l'alimentation animale. Dans ce contexte, les chercheurs se sont intéressés aux AAI limitants après ceux précédemment cités. La valine, l'isoleucine, la leucine et l'histidine sont des candidats potentiels (Figuroa *et al* 2003, Lordelo *et al* 2008). C'est pourquoi, leurs besoins ont été récemment évalués chez le porcelet pour assurer un apport optimum en AAI par les aliments complets à basse teneur en protéines.

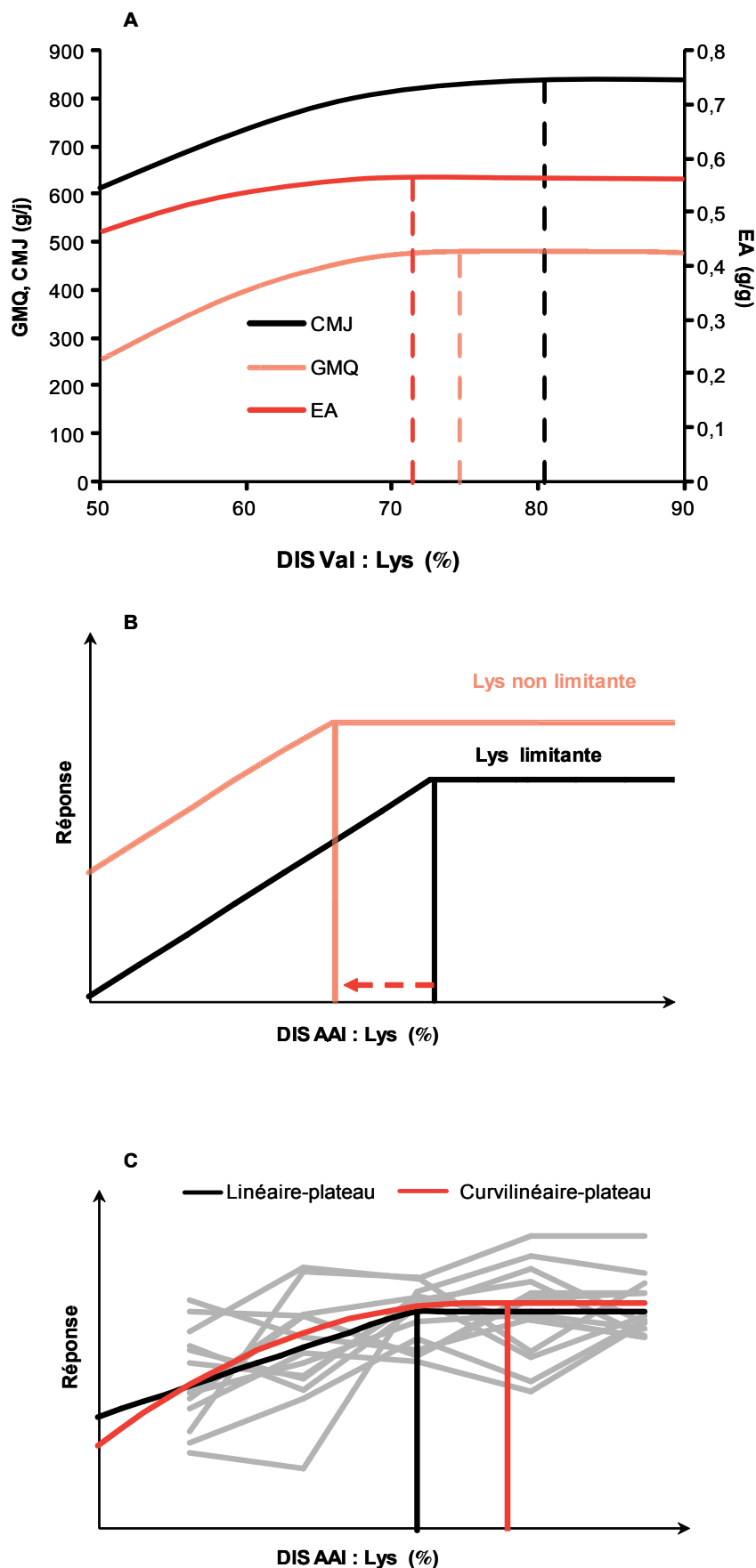
3 / Estimation des besoins en acides aminés à chaîne ramifiée et en histidine chez le porcelet

3.1 / Estimation d'un besoin

Les besoins en AAI sont estimés à l'aide d'études de doses-réponses qui permettent, en testant différents niveaux d'apport en acides aminés, de déterminer la concentration minimale d'AAI permettant de maximiser ou de minimiser un critère de réponse lié au niveau de performance de l'animal ou au métabolisme azoté. Chez le porc, les critères de réponse les plus couramment utilisés sont : la Consommation Moyenne Journalière (CMJ), le Gain Moyen Quotidien (GMQ) et l'Efficacité Alimentaire (EA). D'autres critères de réponse se rapportant directement ou indirectement à l'efficacité d'utilisation des acides aminés digestibles (catabolisme des acides aminés, azote retenu...) sont également utilisés. Le choix du critère de réponse est essentiel puisque l'estimation du besoin en acide aminé varie selon le critère de réponse utilisé (figure 2A). Lorsque l'on cherche à estimer le besoin en acide aminé qui maximise la vitesse de croissance, il est indispensable de mesurer la consommation volontaire des porcelets puisque les carences en AAI peuvent influencer sur la prise alimentaire (Gloaguen *et al* 2012a). Dans l'état actuel des connaissances, le meilleur critère de réponse est la mesure du GMQ lorsque les porcs sont nourris à volonté.

Pour obtenir une dose-réponse, l'AAI doit être déficitaire dans le régime basal et être le premier facteur limitant les performances. De plus, pour estimer le besoin selon le concept de la protéine idéale et l'exprimer relativement à la lysine (cf. encadré 2), la lysine doit être le deuxième facteur limitant la croissance et ce pendant toute la durée expérimentale (Boisen 2003). Si la lysine n'est pas limitante, le besoin exprimé relativement à la lysine sera sous-estimé (figure 2B). Ce dernier point est crucial et souvent omis dans les protocoles expérimentaux alors qu'il explique généralement une grande part des écarts entre résultats publiés dans la littérature. Si la lysine

Figure 2. Différents facteurs influençant l'estimation du besoin en acide aminé : A : Consommation Moyenne Journalière (CMJ), Gain Moyen Quotidien (GMQ) ou Efficacité Alimentaire (EA) ; B : Niveau de lysine (Lys) digestible dans l'aliment ; C : Méthode d'estimation de la réponse à l'apport en acides aminés dans l'aliment.



n'est pas le deuxième facteur limitant, un autre mode d'expression du besoin doit être choisi (teneur en AAI de l'aliment par exemple).

Les réponses à l'apport d'AAI sont généralement analysées avec des modèles non-linéaires : le modèle linéaire-plateau (« *broken line* ») ou le modèle curvilinéaire-plateau (Robbins *et al* 2006). Les doses-réponses se décomposent en deux phases, une phase de carence et une phase d'excès. L'intersection de ces deux phases correspond alors au besoin estimé, c'est-à-dire la concentration minimale de l'AAI qui maximise ou minimise le critère de réponse mesuré. Le choix du modèle est capital car le besoin estimé par le modèle linéaire-plateau est inférieur à celui estimé avec le modèle curvilinéaire-plateau (figure 2C). Chez le porc en croissance, Pomar *et al* (2003) ont montré que si la réponse d'un individu est décrite par le modèle linéaire-plateau, la réponse d'une population suivra une réponse curvilinéaire-plateau. Par ailleurs, le besoin en lysine des porcs, exprimé en lysine DIS par kg d'aliment, diminue quand le poids vif augmente. De ce fait, dans une dose-réponse, la lysine devient de moins en moins limitante au cours de la période expérimentale et les performances maximales augmentent avec l'accroissement du poids vif des porcs. Cette augmentation du plateau tend à lisser les données contribuant également à la curvilinéarité de la réponse. Ainsi, le modèle curvilinéaire-plateau est préférable au modèle linéaire-plateau pour décrire la zone de subcarence et estimer le besoin en acides aminés.

3.2 / La valine

Les études visant à évaluer le besoin en valine sont récentes et 14 des 15 essais

répertoriés dans la bibliographie ont été réalisés depuis l'année 1998 (tableau 1). Parmi ces 15 études, 13 ont été réalisées avec de jeunes porcs de 10 à 35 kg et seulement deux essais avec des porcs en croissance (60-85 kg). Dans l'étude la plus ancienne, le besoin en valine est plus faible que dans les études récentes, ce qui peut s'expliquer par l'utilisation d'animaux à faible potentiel génétique de croissance et par une estimation du besoin en valine exprimé en g/kg d'aliment. Pour les 14 autres études, l'estimation du besoin en valine varie de 80 à 120% relativement au besoin conseillé par le NRC (68% DIS relativement à la lysine ; 1998). En moyenne à partir de l'ensemble de ces études, le besoin en valine est estimé à 70% ($\pm 5\%$) DIS relativement à la lysine. Les besoins en valine proposés par les tables nutritionnelles (NRC 1998, BSAS 2003) sont confirmés par les études les plus récentes. Cependant, le besoin en valine estimé par le NRC (2012), de 63% DIS relativement à la lysine pour des porcs de 11 à 25 kg, semble être faible pour maximiser la vitesse de croissance des porcelets.

3.3 / L'isoleucine

Plus de 80% des études portant sur l'estimation du besoin en isoleucine ont été réalisées en Amérique du Nord. Cela s'explique par l'utilisation de cellules sanguines séchées (« *Spray-Dried Blood Cells* », SDBC) comme source de protéines alternative au soja dans l'alimentation des porcs en Amérique du Nord. La teneur en isoleucine relativement à la lysine des SDBC, et principalement de l'hémoglobine, est en effet faible (5% d'Ile DIS relativement à la lysine) et leur incorporation dans l'aliment réduit l'apport d'isoleucine relativement à la lysine dans l'aliment. Les SDBC peuvent être incorporées à hauteur de 7,5% dans l'ali-

ment sans induire une réduction de la croissance mais cela nécessite de maintenir un apport d'isoleucine de 60% DIS relativement à la lysine (DeRouche *et al* 2002, Kerr *et al* 2004). Sans utilisation de SDBC, les données issues d'une méta-analyse indiquent que le besoin en isoleucine ne dépasse pas 50% DIS relativement à la lysine (van Milgen *et al* 2012) (figure 3). A ce jour, trois doses-réponses ont permis d'évaluer le besoin en isoleucine sans utilisation de produits sanguins et le besoin en isoleucine a été estimé à 54, 52 et 49% DIS relativement à la lysine respectivement par Wiltafsky *et al* (2009a), Waguespack *et al* (2012) et Gloaguen *et al* (2012b). L'augmentation du besoin en isoleucine observée avec l'incorporation de SDBC dans l'aliment proviendrait d'un déséquilibre entre AAI dans l'aliment (cf. § 4-3 et 4-4). Dans l'UE, l'utilisation de produits sanguins issus de monogastriques dans l'alimentation des porcs est à nouveau autorisée depuis 2005. Le principal produit de sang utilisé dans l'UE est le plasma. Il est riche en immunoglobulines et est incorporé dans l'aliment pour ses qualités nutritives et pour favoriser l'appétence de l'aliment. Il renforcerait également le système immunitaire digestif du porcelet. A la différence des SDBC ou de l'hémoglobine, le plasma est un produit dont le profil en AAI est équilibré par rapport aux besoins nutritionnels en AAI des porcs. Son incorporation dans l'aliment ne peut pas aboutir à une forte carence en isoleucine ou à l'apparition d'un déséquilibre en AAI.

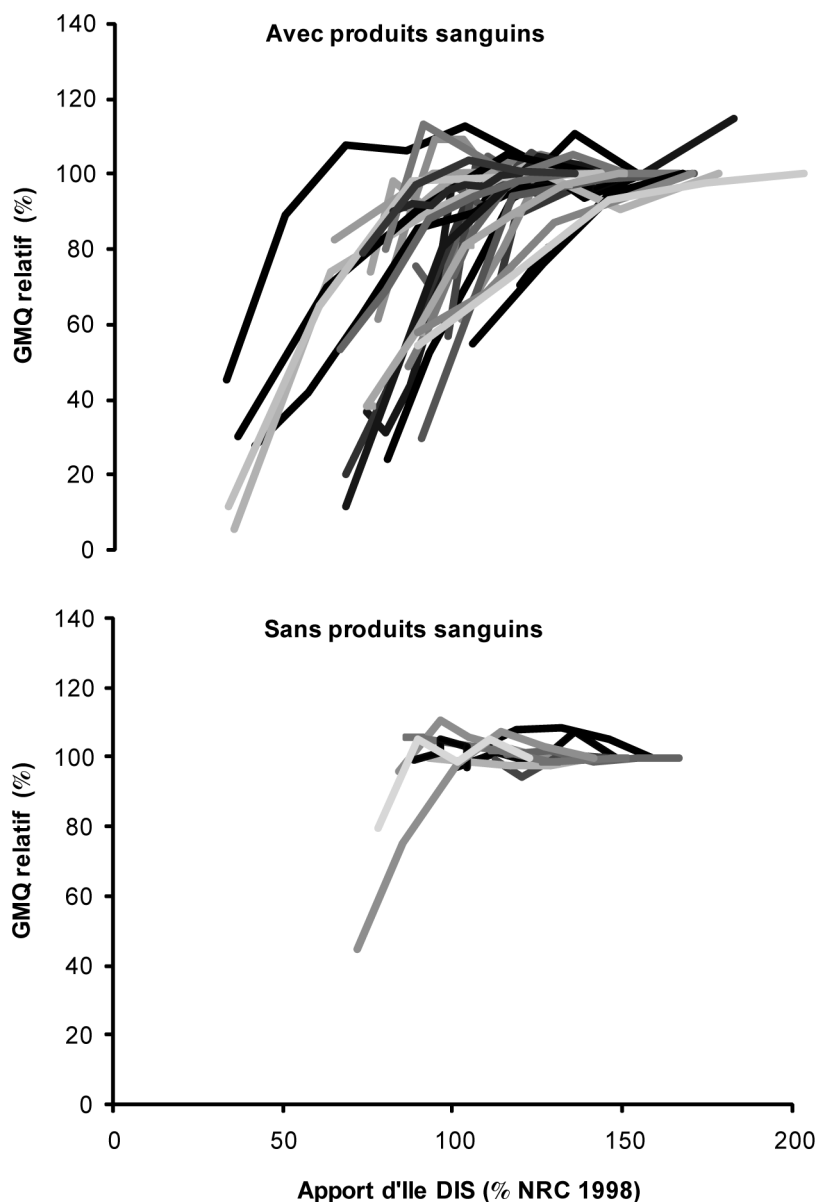
3.4 / La leucine

La leucine est présente en abondance dans les matières premières utilisées dans l'alimentation du porc. De ce fait, l'estimation de son besoin chez le porc

Tableau 1. Besoins en valine estimés chez le porc.

Poids vif (kg)	Besoin estimé	Unité	Relatif au NRC (1998) (%)	Références
13-29	0,40	% Val	51	Jackson <i>et al</i> (1953)
67-80	0,33-0,43	% DIA Val	80-105	Lewis et Nishimura (1995)
60-85	< 11,4	g DIS Val/j	98	Liu <i>et al</i> (2000)
9-15	0,62-0,67	% DIS Val	90-97	James <i>et al</i> (2001)
5-10	0,60	g DIS Val/MJ EM	101	Mavromichalis <i>et al</i> (2001)
10-20	0,53	g DIS Val/MJ EM	105	Mavromichalis <i>et al</i> (2001)
8-12	0,92	% DIS Val	114	Gaines <i>et al</i> (2006)
12-20	0,78	% DIS Val	114	Gaines <i>et al</i> (2006)
12-25	> 70	% DIS Val:Lys	> 103	Barea <i>et al</i> (2009a)
8-25	65-67	% DIS Val:Lys	96-99	Wiltafsky <i>et al</i> (2009b)
12-25	67-70	% DIS Val:Lys	99-103	Trautwein <i>et al</i> (2010)
9-25	68-71	% DIS Val:Lys	100-104	Millet <i>et al</i> (2010)
12-22	72	% DIS Val:Lys	106	Gloaguen <i>et al</i> (2011)
13-32	65	% DIS Val:Lys	96	Gaines <i>et al</i> (2011)
9-25	70	% DIS Val:Lys	103	Vinyeta <i>et al</i> (2011)

Figure 3. Réponse de croissance des porcs (Gain Moyen Quotidien, GMQ) à l'apport d'isoleucine digestible avec ou sans utilisation de produits sanguins (d'après van Milgen et al 2012).



a suscité peu d'intérêt et on dénombre seulement deux études réalisées chez des porcs de 10-20 kg. Augspurger et Baker (2004) ont déterminé le besoin en leucine à partir de deux doses-réponses. Dans le 1^{er} essai, les performances zootechniques ont augmenté linéairement quand l'apport de leucine digestible est passé de 8,7 à 10,7% et le besoin n'a pu être estimé car la vitesse de croissance n'a pas atteint un plateau. Dans le deuxième essai, les données indiquent que l'apport de leucine qui maximise la croissance est proche de 100% DIS relativement à la lysine. Plus récemment, Gloaguen *et al* (2012b) ont également estimé un besoin en leucine à l'aide de deux doses-réponses et les auteurs concluent à un besoin de 102% DIS relativement à la lysine. Les résultats de ces deux études sont proches et le

besoin moyen en leucine, estimé à 101% DIS relativement à la lysine, est en accord avec les valeurs proposées par les tables nutritionnelles (NRC 1998, BSAS 2003).

3.5 / L'histidine

L'histidine est synthétisée *de novo* et l'enzyme qui catalyse l'étape finale de la biosynthèse d'histidine, l'histidinol déshydrogénase, est présente dans le foie et les reins, mais pas dans le muscle des porcs (Onodera 2003). Cependant chez le porc, l'histidine est considérée comme un AAI pour la croissance par Mertz *et al* (1952). Comme pour la leucine, le besoin en histidine a été peu étudié chez le porc. Deux études évaluant le besoin en histidine sont anciennes (Eggert *et al* 1955, Rechcigl *et al* 1956)

avec des animaux à faible potentiel de croissance et par une estimation du besoin en histidine exprimé en g/kg d'aliment. Les résultats de ces études sont donc difficilement transposables à des porcs à fort potentiel de croissance tels que ceux utilisés actuellement en élevage. La référence pour le NRC (1998) est l'étude réalisée par Izquierdo *et al* (1988) qui ont estimé un besoin en histidine à 3,6 g/kg d'aliment pour des porcelets de 10-20 kg avec un apport de lysine non limitant. Plus récemment, Li *et al* (2002) ont évalué un besoin en histidine à 30% en digestibilité iléale apparente relativement à la lysine chez des porcs de 10-20 kg, ce qui correspond à 91% du besoin estimé par le NRC (33%, 1998). Par ailleurs, Gloaguen *et al* (2012b) ont estimé un besoin en histidine pour la vitesse de croissance maximale à 32% DIS relativement à la lysine ce qui confirme le besoin proposé par le NRC (1998).

4 / Conséquence d'un déséquilibre des acides aminés de l'aliment

L'ingestion d'un régime déséquilibré en AAI peut réduire les performances des animaux. Ces déséquilibres peuvent être classés en quatre catégories : la carence, la toxicité, l'« *imbalance* » et l'antagonisme. Les régimes à basse teneur en protéines supplémentés avec des AAI libres sont particulièrement susceptibles d'être déséquilibrés.

4.1 / La carence

Un aliment est carencé en AAI lorsque la teneur en AAI dans l'aliment est inférieure au besoin. La baisse de la vitesse de croissance induite par les carences en AAI résulte soit d'un manque d'AAI pour la synthèse de protéines soit d'une baisse de la consommation d'aliment. La réduction des teneurs en valine, isoleucine, leucine et histidine de l'aliment est associée à une diminution de la consommation volontaire des porcelets (Barea *et al* 2009a, Gloaguen *et al* 2012b). Ces chutes de consommation expliquent environ les deux tiers des baisses de vitesse de croissance observées lors d'une carence en valine, isoleucine, leucine et histidine. Par ailleurs, l'effet des carences en AAI sur les performances varie selon l'AAI. Par exemple, une carence de 10% d'isoleucine réduit de 9% la vitesse de croissance alors qu'une carence de 10% de leucine ou d'histidine ne la réduit que de 3% (Gloaguen *et al* 2012b). La baisse de la consommation volontaire est également le premier signe de carence nutritionnelle en valine, isoleucine, leucine et histidine. Ainsi quand l'apport d'aliment est rationné, une teneur en valine de 64% DIS relativement à la

lysine dans l'aliment permet de maximiser le dépôt quotidien de protéines alors qu'une teneur de 70% est nécessaire pour maximiser la vitesse de croissance chez des animaux nourris à volonté (Gloaguen *et al* 2011). En d'autres termes, seuls la consommation volontaire des porcelets et le dépôt de protéines associé diminuent quand la teneur en valine de l'aliment est réduite de 70 à 64% DIS relativement à la lysine, la diminution de l'efficacité d'utilisation des acides aminés pour déposer des protéines intervenant en dessous de 64%.

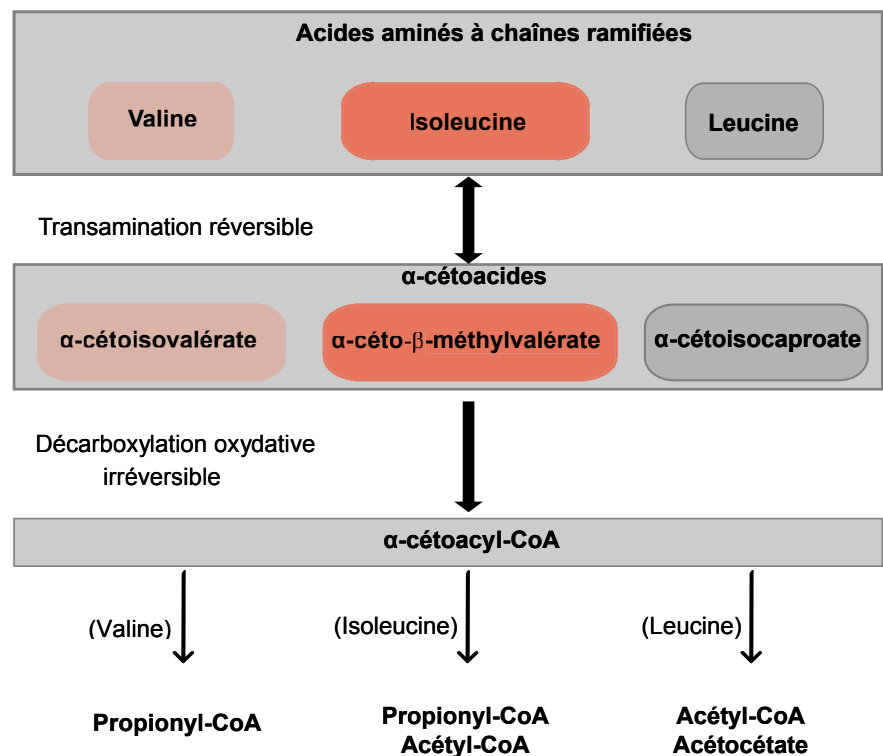
4.2 / La toxicité

La toxicité résulte de l'ingestion d'une quantité excessive d'un seul AAI. Ainsi on sait que la méthionine est l'AAI le plus toxique chez le porcelet et que l'apport de 2% de DL-méthionine libre dans un aliment contenant 20% de MAT réduit fortement la consommation et le gain de poids (Edmonds et Baker 1987). En comparaison, la toxicité de la L-leucine n'apparaît qu'à 6% d'incorporation. De ce fait, les teneurs en AAI libres utilisées en pratique (< 1%) dans l'alimentation des porcs ne sont pas assez élevées pour induire de la toxicité.

4.3 / L'« imbalance »

Le terme « imbalance » désigne un fort déséquilibre en AAI lorsqu'un ou plusieurs AAI sont ajoutés en excès dans un régime déjà déficitaire en un autre AAI (Harper *et al* 1970). L'effet de la carence en AAI est accentué, principalement par une baisse de la consommation, et l'apport de l'AAI déficitaire restaure les performances. Une caractéristique commune à l'ingestion de ce type d'aliment déséquilibré en acides aminés est la baisse de la concentration de l'acide aminé limitant dans le plasma et dans le cerveau (Peng *et al* 1972). Chez le rat, l'hypothèse privilégiée pour expliquer la baisse de la consommation est la détection de la concentration de l'acide aminé déficitaire au niveau du cortex piriforme antérieur, qui initie une réponse comportementale à l'origine d'une aversion alimentaire (Beverly *et al* 1991, Gietzen *et al* 1998, Park 2006). La perception de ce déséquilibre au niveau cérébral est accentuée par la compétition entre acides aminés pour leur transport à travers la barrière hémato-encéphalique. Les AACR sont considérés, avec la phénylalanine, la tyrosine, l'histidine et le tryptophane, comme des acides aminés neutres à longues chaînes (« Large Neutral Amino Acids », LNAA). Avec les niveaux de concentrations en LNAA rencontrés dans le plasma, leur transporteur (système L1) à travers la barrière hémato-encéphalique est saturé (Pardridge 1977). De ce fait, les concentrations en LNAA du liquide céphalo-

Figure 4. Catabolisme des acides aminés à chaîne ramifiée.



rachidien dépendent des proportions des différents LNAA du plasma. Chez le rat, la consommation d'un excès de leucine diminue les concentrations des autres LNAA dans le cerveau et est associée à une baisse de la consommation (Peng *et al* 1973). Lorsque la valine, l'isoleucine, l'histidine ou la leucine sont limitantes dans un aliment à basse teneur en protéines, une diminution du rapport Val:LNAA, Ile:LNAA, His:LNAA ou Leu:LNAA peut potentiellement créer une situation d'« imbalance » à l'origine de baisse de consommation alimentaire. L'hémoglobine des SDBC contient peu d'isoleucine (5% Ile:Lys) mais avec un fort rapport de Val:Lys (99%), de Leu:Lys (144%), de Phe:Lys (76%) et d'His:Lys (83%). Ainsi, l'incorporation de SDBC dans l'aliment diminue l'apport d'isoleucine relativement aux LNAA créant une situation d'« imbalance » pouvant être en partie à l'origine des baisses de performances observées avec l'incorporation de SDBC (Barea *et al* 2009b, Wiltafsky *et al* 2009a).

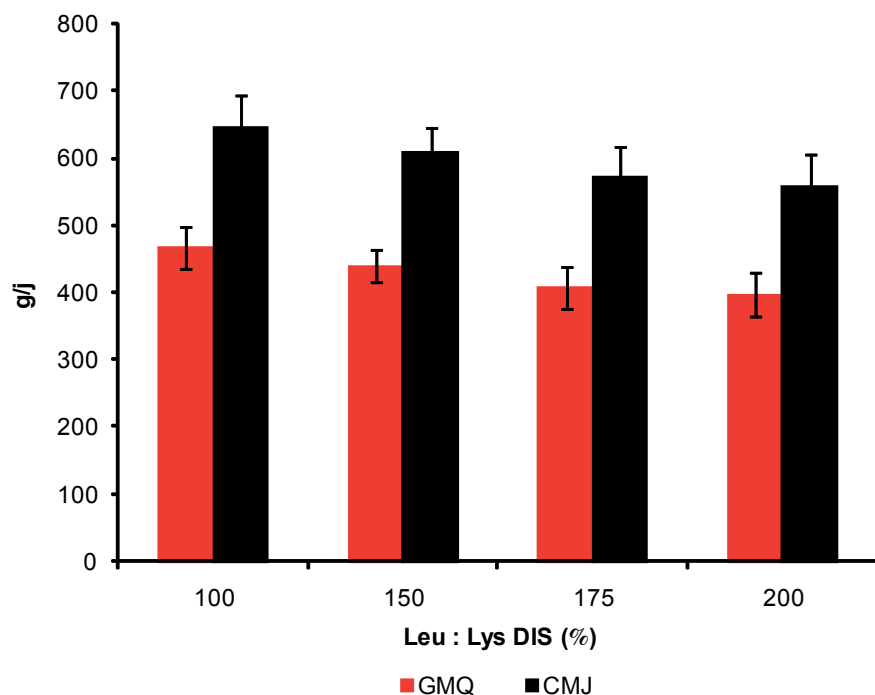
4.4 / L'antagonisme, exemple des acides aminés à chaîne ramifiée

a) Le catabolisme spécifique des acides aminés à chaîne ramifiée

La première étape du catabolisme de la leucine, de l'isoleucine et de la valine est une transamination réversible produisant respectivement de l'alpha-cétoisocaproate (KIC), de l'alpha-céto-beta-méthylvalérate (KMV) et de l'alpha-cétoisovalérate (KIV) (figure 4). Cette réaction est assurée

par l'aminotransférase des AACR (« Branched-Chain Amino Transferase », BCAT) commune aux trois AACR. Les BCAT sont spécifiques des AACR et du glutamate avec une affinité croissante pour le glutamate, la valine, la leucine et l'isoleucine (Wallin *et al* 1990, Hall *et al* 1993, Davoodi *et al* 1998). Chez l'Homme, le rat ou le singe, plus de 65% de la capacité totale de transamination des AACR, calculée en multipliant les activités des BCAT par la masse des tissus, se situe dans le muscle (Suryawan *et al* 1998, Brosnan et Brosnan 2006). L'implication du muscle dans le catabolisme est une particularité des AACR puisque les autres acides aminés sont principalement catabolisés dans le foie. Aucun mécanisme spécifique de régulation n'a été identifié pour les BCAT et la transamination dépend alors des concentrations des BCAT et de leurs substrats (AACR et alpha-cétoacides). La vitesse de transamination dépend de l'activité de la deuxième enzyme impliquée dans le catabolisme irréversible des AACR. Cette deuxième étape est une décarboxylation oxydative irréversible des alpha-cétoacides à chaîne ramifiée assurée par le complexe déshydrogénase mitochondrial (BCKDH) avec la plus forte activité dans le rein suivi par le foie, le cerveau et le cœur chez l'Homme et le singe (Suryawan *et al* 1998). Le complexe de la BCKDH comprend trois sous-unités : une décarboxylase des AACR (E1), une dihydrolipoyl transacylase (E2) et une dihydrolipoyl déshydrogénase (E3). La décarboxylation oxydative des KIV, KMV et KIC par la BCKDH produit respectivement

Figure 5. Effet de l'incorporation croissante de Leucine (Leu) dans un aliment carencé en isoleucine sur la Consommation Moyenne Journalière (CMJ) et le Gain Moyen Quotidien (GMQ) du porcelet (d'après Wiltafsky et al 2010).



de l'isovalineéryl-CoA, du α -méthylbutyryl-CoA et de l'isobutyryl-CoA. A la différence de la BCAT, le complexe multienzymatique est régulé par un cycle réversible de phosphorylation et déphosphorylation de la sous unité E1, l'enzyme active étant sous la forme déphosphorylée. La phosphorylation de la sous unité E1 par la kinase de la BCKDH inhibe alors l'activité de la BCKDH. La kinase est régulée par des modifications de concentrations en KIC (Paxton et Harris 1984) qui inhibe la kinase et favorise l'oxydation des α -cétoacides. Les produits de la décarboxylation oxydative des α -cétoacides suivent des voies métaboliques différentes. La valine est glucoformatrice et est catabolisée en propionyl-CoA, l'isoleucine est glucoformatrice et cétoène et produit du propionyl-CoA et de l'acétyl-CoA et la leucine est uniquement cétoène et sera catabolisée en acétoacétate et acétyl-CoA.

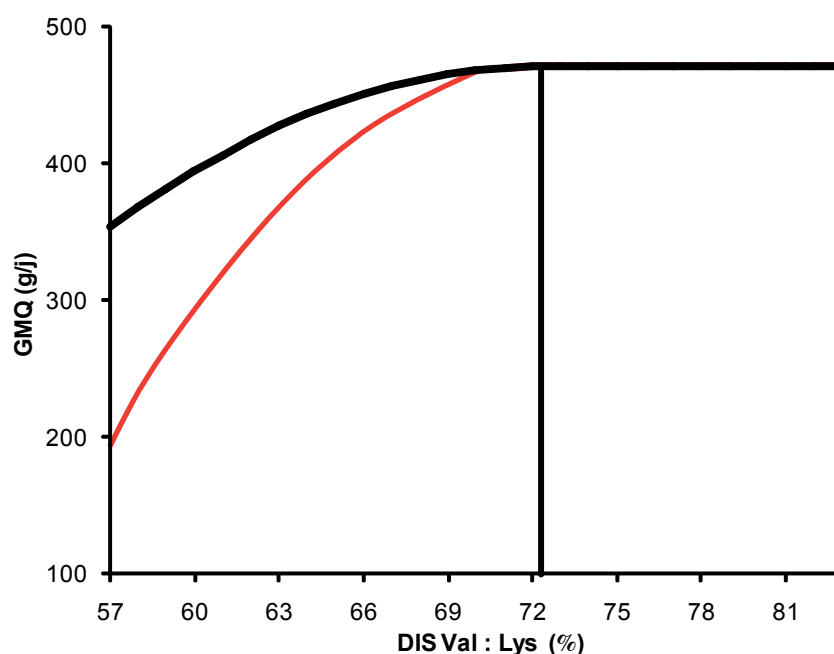
b) Interactions entre les apports d'acides aminés à chaîne ramifiée

Comme décrit précédemment, les AACR partagent les mêmes enzymes lors des deux premières étapes de leur catabolisme. La deuxième étape de décarboxylation oxydative irréversible est stimulée par un excès de KIC qui favorise l'oxydation des α -cétoacides et diminue la disponibilité de la valine, de l'isoleucine et de la leucine. Chez le porc, les interactions entre la valine, l'isoleucine et la leucine ont été décrites par de nombreux auteurs (Henry et al 1976,

Langer et al 2000, Wiltafsky et al 2010). Ces études montrent que l'ingestion d'un régime apportant de la leucine en excès réduit les concentrations plasmatiques de valine et d'isoleucine. Wiltafsky et al (2010) ont observé qu'un excès de leucine stimulait l'activité de la déshydrogénase des α -cétoacides dans le foie. Cette étude confirme que, chez le porc, le catabolisme des AACR, la baisse des concentrations plasmatiques d'isoleucine et de valine et la diminution de la

vitesse de croissance peuvent être induits par l'augmentation de la teneur en leucine dans l'aliment (figure 5). Ces observations pourraient expliquer les réductions de performances liées à l'incorporation de SDBC dans l'aliment des porcs. L'incorporation de SDBC, un produit sanguin déficitaire en isoleucine et excédentaire en valine et en leucine relativement à la lysine, augmenterait le catabolisme des AACR, ce qui amplifierait la carence en isoleucine. En revanche, un excès de leucine dans l'aliment (165% Leu:Lys DIS) n'affecte pas l'estimation du besoin en valine (70% Val:Lys DIS) mais aggrave l'effet de la carence (figure 6). C'est pourquoi, si un régime est carencé en valine (60% Val:Lys DIS), le GMQ diminue de 25% lorsque l'apport de leucine relativement à la lysine augmente de 100 à 165%. Ce déséquilibre entre la leucine et la valine ne peut pas se produire avec l'utilisation de produits sanguins qui sont riches en ces deux AAI. En pratique, le niveau de leucine relativement à la lysine dans l'aliment standard ne dépasse généralement pas 130% DIS. Seule l'incorporation de farine de gluten de maïs dont l'apport de leucine relativement à la lysine est de 900% peut aboutir à des teneurs en leucine élevées (Leu:Lys DIS > 130%) dans un aliment complet. Un rapport minimal de valine de 70% DIS relativement à la lysine garantit donc le maintien des performances lorsque l'apport de leucine relativement à la lysine est compris entre 100 et 165% DIS. Il est cependant possible qu'avec une teneur en leucine supérieure à 165% DIS relativement à la lysine, le besoin en valine pour la croissance maximale augmente. Ces résultats contrastent avec l'augmentation du besoin

Figure 6. Réponse de croissance des porcelets à l'apport de valine avec (—) ou sans (—) un excès de leucine dans l'aliment (d'après Gloaguen et al 2011).



en isoleucine lorsque des SDBC sont incorporées dans la ration. Les SDBC sont également riches en phénylalanine et en histidine et leur incorporation dans l'aliment réduit le rapport d'isoleucine sur LNAA. Ceci aboutit à une situation d'« *imbalance* » des AAI qui pourrait accroître les baisses de performances et augmenter le besoin en isoleucine pour la croissance.

5 / Implication pratique pour la formulation de régimes à basse teneur en protéines

5.1 / Actualisation de la protéine idéale

D'après les données de la bibliographie, les besoins moyens en valine, isoleucine, leucine et histidine pour la croissance sont respectivement de 70, 52, 101 et 31% DIS relativement à la lysine lorsque la protéine alimentaire est équilibrée en acides aminés (tableau 2). Ces valeurs représentent respectivement 103, 96, 100 et 98% des besoins estimés par le NRC (1998) et 100, 90, 101 et 91% de ceux estimés par la BSAS (2003). Les données de la bibliographie confirment donc les besoins en valine, histidine et leucine référencés dans les tables nutritionnelles alors que le besoin en isoleucine est jusqu'à 10% inférieur à celui estimé par la BSAS (2003). En revanche, des différences peuvent apparaître avec le profil de la protéine idéale estimé par le NRC (2012) puisque dans ce cas une approche factorielle fondée sur la prédiction des besoins d'entretien et de crois-

sance a été utilisée pour estimer les besoins en acides aminés. Ainsi, le profil proposé par le NRC (2012) maximise la rétention azotée et non la croissance. Par ailleurs, nous avons pu constater qu'il existe une forte variabilité des besoins estimés entre études référencées dans la bibliographie. Actuellement, les tables nutritionnelles présentent une seule protéine idéale pour une large gamme de poids vif. Or, nous avons vu qu'un apport déséquilibré en AAI est une source de variation importante du besoin en isoleucine. Avec seulement trois études disponibles, les données restent également très limitées et les recommandations sont peu robustes pour l'estimation du besoin en leucine, histidine et isoleucine.

5.2 / Les prochains facteurs limitant la baisse de la teneur en protéines

La formulation, à base de céréales et de tourteau de soja, d'un aliment complet à basse teneur en protéines nous indique que l'apport d'isoleucine, de leucine et d'histidine sont les principales contraintes limitant la baisse de la teneur en protéines après la valine. Néanmoins, avec un besoin en phénylalanine et en phénylalanine et tyrosine estimé à respectivement 61 et 95% DIS relativement à la lysine par le NRC (1998), la phénylalanine et la tyrosine deviennent quasi co-limitants pour la croissance avec la leucine, l'isoleucine et l'histidine. De ce fait, après l'incorporation de L-valine dans l'aliment, une supplémentation simultanée d'isoleucine, de leucine, d'histidine et de phénylalanine serait néces-

saire pour obtenir une baisse supplémentaire significative de la teneur en protéines de l'aliment. Le besoin en phénylalanine a cependant été peu étudié et les tables nutritionnelles se fondent sur des données anciennes où le besoin en phénylalanine est estimé en g par kg d'aliment (Mertz *et al* 1954, Robbins et Baker 1977). Ces estimations sont donc difficilement utilisables en pratique quand les apports d'acides aminés sont raisonnés en apport digestibles relativement à la lysine. La composition en AAI des protéines de la carcasse du porcelet indique que la teneur en phénylalanine est de 55% relativement à la lysine (Conde-Aguilera *et al* 2010), ce qui suggère que le besoin en phénylalanine pour la croissance est inférieur à 60% DIS relativement à la lysine si les efficacités d'utilisation métabolique et les besoins d'entretien ne sont pas différents entre la phénylalanine et la lysine. Dans ce cas, la phénylalanine serait moins limitante pour la croissance des porcelets lorsque la teneur en protéines des aliments est basse.

Les deux derniers nutriments considérés comme indispensables à la synthèse de protéines sont l'azote et l'arginine. Avec les acides aminés libres disponibles sur le marché et les teneurs en protéines actuelles des aliments des porcelets, l'arginine et l'azote ne peuvent pas être limitants pour la croissance. L'arginine est considérée comme un acide aminé semi-indispensable pour assurer la croissance (Southern et Baker 1983). Les protocoles expérimentaux ne permettent pas d'estimer le besoin en arginine sur

Tableau 2. Profil en acides aminés indispensables digestibles, exprimé relativement à la lysine (AA: Lys, DIS) de la protéine idéale du porcelet.

AA:Lys, DIS	Sève (1994)	NRC (1998)	BSAS (2003)	NRC (2012)	INRA ⁽¹⁾
Lys:Lys	100	100	100	100	100
Thr:Lys	65	62	65	59	65
Met:Lys	30	27	30	29	30
(Met + Cys):Lys	60	57	59	55	60
Trp:Lys	18	18	19	16	22
Val:Lys	70	68	70	63	70
Ile:Lys	60	54	58	51	52-60 ⁽²⁾
Leu:Lys	100	101	100	100	101
Phe:Lys	50	61	57	58	54 ⁽³⁾
(Phe + Tyr):Lys	95	94	100	93	-
Tyr:Lys	-	-	-	-	40
His:Lys	32	32	34	34	31

⁽¹⁾ les besoins en thréonine, méthionine et (méthionine + cystéine) sont ceux proposés par Sève (1994). Le besoin en tryptophane est issu d'une méta-analyse (Simongiovanni *et al* 2012). Les besoins en valine, isoleucine, leucine et histidine sont les besoins moyens calculés à partir des données de la littérature. Les besoins en phénylalanine et tyrosine sont issus de données de doses-réponses réalisées à l'INRA et non publiées.

⁽²⁾ besoin en isoleucine conseillé lorsque l'aliment contient une source de protéines déséquilibrée en acides aminés à base d'hémoglobine (cellules sanguines, farines de sang...).

⁽³⁾ besoin en phénylalanine minimal lorsque l'aliment contient un minimum de 40% DIS de tyrosine relativement à la lysine.

une base digestible et relativement à la lysine. A des niveaux bas de protéines dans l'aliment, la synthèse des AANI peut être limitée par la quantité d'azote disponible du fait de la réduction de l'apport d'azote alimentaire. Le besoin en azote est généralement exprimé comme le rapport entre l'azote provenant des AAI et l'azote des AANI ($AAI_N/AANI_N$) ou l'azote total. Ce mode d'expression du besoin est discutable puisque l'azote issu du catabolisme des AAI n'est pas considéré dans le besoin en azote. Or, une partie des AAI n'est pas utilisée pour la synthèse protéique et est obligatoirement dégradée. Une partie de l'azote issue de cette dégradation pourrait être alors utilisée, *via* des transaminations, pour la synthèse des AANI. Ainsi, les excès d'AAI augmentent le rapport $AAI_N/AANI_N$ alors qu'ils devraient libérer davantage d'azote pour la synthèse des AANI. Chez le porc en croissance, le besoin en $AAI_N/AANI_N$ a été estimé à 45/55 (Wang et Fuller 1989), 48/52 (Heger *et al* 1998) et 50/50 (Lenis *et al* 1999). Wang et Fuller (1989) n'ont pas inclus l'arginine, qui est riche en azote (32%), dans les AAI ce qui peut expliquer le plus faible rapport $AAI_N/AANI_N$ qu'ils obtiennent. Certains AANI ont aussi été étudiés bien que leurs impacts sur les performances de croissance n'aient pas été clairement établis. Chung et Baker (1992) suggèrent qu'un apport de glycine, de glutamate et de proline, comme source d'azote, permet une meilleure utilisation de l'azote qu'un apport de glutamate. Plus récemment, Powell *et al* (2011) ont établi qu'un aliment à base de maïs et de tourteau de soja contenant 13% de pro-

teïnes ne permet pas de maximiser la croissance de porcs entre 20 et 40 kg de poids vif du fait de la carence en glycine ou en glycine et arginine. Cette carence n'est pas liée à un manque d'azote puisque la supplémentation de glutamate n'améliore pas les performances. Wu (2010) suggère que les AANI qui régulent des étapes clés du métabolisme, comme la glutamine, le glutamate, la proline ou l'arginine, devront être à l'avenir inclus dans la protéine idéale.

Conclusion

La réduction de la teneur en protéines des aliments s'accompagne d'une diminution des apports d'AAI dont la valine, la leucine, l'isoleucine et l'histidine qui sont potentiellement des facteurs limitant la croissance des porcelets avec un aliment à basse teneur en protéines. L'étude des réponses de croissance et d'ingestion aux apports d'AAI est alors nécessaire pour estimer leurs besoins et atteindre la croissance maximale. Les protocoles expérimentaux mis en œuvre doivent permettre une estimation du besoin sur une base d'apport d'AAI digestibles exprimés relativement à la lysine selon le concept de la protéine idéale utilisé en pratique. Outre la vitesse de croissance, la mesure de la consommation d'aliment des porcs est essentielle puisque les carences en valine, isoleucine, leucine et histidine réduisent la consommation d'aliment. Par ailleurs, le choix du modèle statistique pour représenter et interpréter la réponse influence l'estimation du besoin et le

modèle curvilinéaire-plateau semble le mieux adapté pour estimer le besoin en acide aminé d'une population de porcs.

Les besoins moyens en valine, en histidine, en isoleucine et en leucine sont estimés respectivement à 70, 31, 52 et 101% DIS relativement à la lysine. Dans des régimes à basse teneur en protéines la majorité des AAI sont co-limitants pour la croissance. Les apports déséquilibrés d'AAI peuvent pénaliser les performances puisque les AAI sont en compétition pour leur transport et leur catabolisme. Ainsi, l'incorporation de sources de protéines déséquilibrées en AAI à base d'hémoglobine (farine de sang, cellules sanguines...) dans l'aliment augmente le besoin en isoleucine relativement à la lysine (> 54% DIS).

L'actualisation de la protéine idéale, l'étude des réponses de croissance aux apports d'AAI ainsi que l'étude des facteurs de variation des réponses permettent de diminuer l'apport de protéines des aliments des porcelets. L'adéquation des apports en AAI de l'aliment au besoin de l'animal doit être recherchée et tant les carences que les excès d'AAI doivent être maîtrisés pour atteindre l'objectif de production tout en minimisant les rejets azotés.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Etienne Corrent et Yvan Primot pour leur relecture approfondie du manuscrit et leurs critiques avisées.

Références

- Augsburger N.R., Baker D.H., 2004. An estimate of the leucine requirement for young pigs. *Anim. Sci.*, 79, 149-153.
- Ball R.O., Aherne F.X., 1987. Influence of dietary nutrient density, level of feed intake and weaning age on young pigs. 2. Apparent nutrient digestibility and incidence and severity of diarrhea. *Can. J. Anim. Sci.*, 67, 1105-1115.
- Barea R., Brossard L., Le Floch N., Primot Y., Melchior D., van Milgen J., 2009a. The standardized ileal digestible valine-to-lysine requirement ratio is at least seventy percent in postweaned piglets. *J. Anim. Sci.*, 87, 935-947.
- Barea R., Brossard L., Le Floch N., Primot Y., van Milgen J., 2009b. The standardized ileal digestible isoleucine-to-lysine requirement ratio may be less than fifty percent in eleven- to twenty-three-kilogram piglets. *J. Anim. Sci.*, 87, 4022-4031.
- Beverly J.L., Gietzen D.W., Rogers Q.R., 1991. Threonine concentration in the prepyriform cortex has separate effects on dietary selection and intake of a threonine-imbalanced diet by rats. *J. Nutr.*, 121, 1287-1292.
- Boisen S., 2003. Ideal dietary amino acid profiles for pigs. In *Amino acids in animal nutrition* D'Mello J.P.F. (Ed). CABI Publishing, Oxon, UK., 175-168.
- Brosnan J.T., Brosnan M.E., 2006. Branched-chain amino acids: enzyme and substrate regulation. *J. Nutr.*, 136, 207S-211S.
- BSAS, 2003. Nutrient requirement standards for pigs. *Br. Soc. Anim. Sci.*, Penicuik, UK., 13-16.
- Chung T.K., Baker D.H., 1992. Ideal amino acid pattern for 10-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.*, 70, 3102-3111.
- Conde-Aguilera J.A., Barea R., Le Floch N., Lefaucheur L., van Milgen J., 2010. A sulfur amino acid deficiency changes the amino acid composition of body protein in piglets. *Animal*, 4, 1349-1358.
- Davoodi J., Drown P.M., Bledsoe R.K., Wallin R., Reinhart G.D., Hutson S.M., 1998. Overexpression and characterization of the human mitochondrial and cytosolic branched-chain aminotransferases. *J. Biol. Chem.*, 273, 4982-4989.
- DeRouchey J.M., Tokach M.D., Nelssen J.L., Goodband R.D., Dritz S.S., Woodworth J.C., James B.W., 2002. Comparison of spray-dried blood meal and blood cells in diets for nursery pigs. *J. Anim. Sci.*, 80, 2879-2886.
- 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.
- Eggert R.G., Maynard L.A., Sheffy B.E., Williams H.H., 1955. Histidine-An essential nutrient for growth of pigs. *J. Anim. Sci.*, 14, 556-561.
- Figuerola J.L., Lewis A.J., Miller P.S., Fischer R.L., Diedrichsen R.M., 2003. Growth, carcass traits, and plasma amino acid concentrations of gilts fed low-protein diets supplemented with amino acids including histidine, isoleucine, and valine. *J. Anim. Sci.*, 81, 1529-1537.
- Gaines A.M., Srichana P., Ratliff B.W., Allee G.L., Ursy J.L., 2006. Evaluation of the true ileal digestible (TID) valine requirement of 8 to 20 kg pigs. *J. Anim. Sci.*, 84, 284.

- Gaines A.M., Kendall D.C., Allee G.L., Ursy J.L., Kerr B.J., 2011. Estimation of the standardized ileal digestible valine-to-lysine ratio in 13- to 32-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 736-742.
- Gietzen D.W., Erecius L.F., Rogers Q.R., 1998. Neurochemical changes after imbalanced diets suggest a brain circuit mediating anorectic responses to amino acid deficiency in rats. *J. Nutr.*, 128, 771-781.
- Gloaguen M., Le Floch N., Brossard L., Barea R., Primot Y., Corrent E., van Milgen J., 2011. Response of piglets to the valine content in diet in combination with the supply of other branched-chain amino acids. *Animal*, 5, 1734-1742.
- Gloaguen M., Le Floch N., Corrent E., Primot Y., van Milgen J., 2012a. Providing a diet deficient in valine but with excess leucine results in a rapid decrease in feed intake and modifies the postprandial plasma amino acid and α -keto acid concentrations in pigs. *J. Anim. Sci.*, 90, 3135-3142.
- Gloaguen M., Le Floch N., Primot Y., Corrent E., van Milgen J., 2012b. Response of piglets to the standardized ileal digestible isoleucine, histidine and leucine supply in cereal-soybean meal-based diets. *Animal*, 7, 901-908.
- Hall T.R., Wallin R., Reinhart G.D., Hutson S.M., 1993. Branched chain aminotransferase isoenzymes. Purification and characterization of the rat brain isoenzyme. *J. Biol. Chem.*, 268, 3092-3098.
- Harper A.E., Benevenga N.J., Wohlhueter R.M., 1970. Effects of ingestion of disproportionate amounts of amino acids. *Physiol. Rev.*, 50, 428-558.
- Heger J., Mengesha S., Vodehnal D., 1998. Effect of essential:total nitrogen ratio on protein utilization in the growing pig. *Br. J. Nutr.*, 80, 537-544.
- Henry Y., 1993. Affinement du concept de la protéine idéale pour le porc en croissance. *INRA Productions Animales*, 6, 199-212.
- Henry Y., Duee P.H., Rerat A., 1976. Isoleucine requirement of the growing pig and leucine-isoleucine interrelationship. *J. Anim. Sci.*, 42, 357-364.
- Izquierdo O.A., Wedekind K.J., Baker D.H., 1988. Histidine requirement of the young pig. *J. Anim. Sci.*, 66, 2886-2892.
- Jackson H.D., Mertz E.T., Beeson W.M., 1953. Quantitative valine requirement of the weanling pig. *J. Nutr.*, 51, 109-116.
- James J.W., Goodband R.D., Tokach M.D., Nelssen J.L., DeRouchey J.M., C.W.J., 2001. The optimum valine:lysine ratio in nursery diets to maximize growth performance in weanling pigs. *J. Anim. Sci.*, 79, 48.
- Jones D.B., 1931. Factors for converting percentages of nitrogen in foods and feeds into percentages of proteins. *USDA Circular No.* 183, 1-21.
- Kerr B.J., Kidd M.T., Cuaron J.A., Bryant K.L., Parr T.M., Maxwell C.V., Weaver E., 2004. Utilization of spray-dried blood cells and crystalline isoleucine in nursery pig diets. *J. Anim. Sci.*, 82, 2397-2404.
- Langer S., Scislawski P.W., Brown D.S., Dewey P., Fuller M.F., 2000. Interactions among the branched-chain amino acids and their effects on methionine utilization in growing pigs: effects on plasma amino- and keto-acid concentrations and branched-chain keto-acid dehydrogenase activity. *Br. J. Nutr.*, 83, 49-58.
- Lenis N.P., van Diepen H.T., Bikker P., Jongbloed A.W., van der Meulen J., 1999. Effect of the ratio between essential and nonessential amino acids in the diet on utilization of nitrogen and amino acids by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 77, 1777-1787.
- Lewis A.J., Nishimura N., 1995. Valine requirement of the finishing pig. *J. Anim. Sci.*, 73, 2315-2318.
- Li D.F., Zhang J.H., Gong L.M., 2002. Optimum ratio of histidine in the piglet ideal protein model and its effects on the body metabolism II. Optimum ratio of histidine in 10-20 kg piglet ideal protein and its effects on blood parameters. *Arch. Anim. Nutr. Archiv Fur Tierernahrung*, 56, 199-212.
- Liu H., Allee G.L., Touchette K.J., W. F.J., D. S.J., 2000. Amino acid fortified corn diets for late-finishing barrows. *J. Anim. Sci.*, 78, 66.
- Lordelo M.M., Gaspar A.M., Le Bellego L., Freire J.P., 2008. Isoleucine and valine supplementation of a low-protein corn-wheat-soybean meal-based diet for piglets: growth performance and nitrogen balance. *J. Anim. Sci.*, 86, 2936-2941.
- Mavromichalis I., Kerr B.J., Parr T.M., Albin D.M., Gabert V.M., Baker D.H., 2001. Valine requirement of nursery pigs. *J. Anim. Sci.*, 79, 1223-1229.
- Mertz E.T., Beeson W.M., Jackson H.D., 1952. Classification of essential amino acids for the weanling pig. *Arch. Biochem. Biophysics*, 38, 121-128.
- Mertz E.T., Henson J.N., Beeson W.M., 1954. Quantitative phenylalanine requirement of the weanling pig. *J. Anim. Sci.*, 13, 927-932.
- Millet S., De Boever J., Aluwé M., De Paep M., De Brabander D., 2010. Optimal ileal digestible valine/lysine ratio for the performance of piglets. *EAAP Conf. Heraklion, Greece*.
- Noblet J., Quiniou N., 1999. Principaux facteurs de variation du besoin en acides aminés du porc en croissance. *Techni-Porc*, 22, 9-19.
- NRC, 1998. *Nutrient Requirement of Swine. 10th ed.* Natl. Acad. Press, Washington, DC, 212p.
- NRC, 2012. *Nutrient Requirement of Swine. 11th ed.* Natl. Acad. Press, Washington, DC, 400p.
- Onodera R., 2003. Essentiality of histidine in ruminant and other animals including human beings. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.*, 16, 445-454.
- Pardridge W.M., 1977. Kinetics of competitive inhibition of neutral amino acid transport across the blood-brain barrier. *J. Neurochem.*, 28, 103-108.
- Park B.C., 2006. Amino acid imbalance-biochemical mechanism and nutritional aspects. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.*, 19, 1361-1368.
- Paxton R., Harris R.A., 1984. Regulation of branched-chain alpha-ketoacid dehydrogenase kinase. *Arch. Biochem. Biophys.*, 231, 48-57.
- Peng Y., Tews J.K., Harper A.E., 1972. Amino acid imbalance, protein intake, and changes in rat brain and plasma amino acids. *Am. J. Physiol.*, 222, 314-321.
- Peng Y., Gubin J., Harper A.E., Vavich M.G., Kemmerer A.R., 1973. Food intake regulation: amino acid toxicity and changes in rat brain and plasma amino acids. *J. Nutr.*, 103, 608-617.
- Pomar C., Kyriazakis I., Emmans G.C., Knap P.W., 2003. Modeling stochasticity: Dealing with populations rather than individual pigs. *J. Anim. Sci.*, 81, E178-186.
- Powell S., Bidner T.D., Payne R.L., Southern L.L., 2011. Growth performance of 20- to 50-kilogram pigs fed low-crude-protein diets supplemented with histidine, cystine, glycine, glutamic acid, or arginine. *J. Anim. Sci.*, 89, 3643-3650.
- Rehcgil M., Loosli J.K., Horvath D.J., Williams H.H., 1956. Histidine requirement of baby pigs. *J. Nutr.*, 60, 619-629.
- Robbins K.R., Baker D.H., 1977. Phenylalanine requirement of weanling pig and its relationship to tyrosine. *J. Anim. Sci.*, 45, 113-118.
- Robbins K.R., Saxton A.M., Southern L.L., 2006. Estimation of nutrient requirements using broken-line regression analysis. *J. Anim. Sci.*, 84, E155-165.
- Seve B., 1994. Alimentation du porc en croissance : intégration des concepts de protéine idéale, de disponibilité digestive des acides aminés et d'énergie nette. *INRA Prod. Anim.*, 7, 275-291.
- Simongiovanni A., Corrent E., Le Floch N., van Milgen J., 2012. Estimation of the tryptophan requirement in piglets by meta-analysis. *Animal*, 6, 594-602.
- Southern L.L., Baker D.H., 1983. Arginine requirement of the young pig. *J. Anim. Sci.*, 57, 402-412.
- Sripem N., Pesti G.M., Tillman P.B., 2011. Evaluation of the fixed nitrogen-to-protein (N:P) conversion factor (6.25) versus ingredient specific N:P conversion factors in feedstuffs. *J. Sci. Food Agric.*, 91, 1182-1186.
- Suryawan A., Hawes J.W., Harris R.A., Shimomura Y., Jenkins A.E., Hutson S.M., 1998. Molecular model of human branched-chain amino acid metabolism. *Am. J. Clinical Nutr.*, 68, 72-81.
- Torrallardona D., Harris C.I., Fuller M.F., 2003. Pigs' gastrointestinal microflora provide them with essential amino acids. *J. Nutr.*, 133, 1127-1131.
- Trautwein J., Dusel G., J.B., 2010. Ideal Protein - Reducing crude protein demand by Valine supplementation in feeds. 9. *Wien. BOKU-symposium Tierernahrung*.
- van Milgen J., Gloaguen M., Le Floch N., Brossard L., Primot Y., Corrent E., 2012. Meta-analysis of the response of growing pigs to the isoleucine concentration in the diet. *Animal*, 6, 1601-1608.
- Vinyeta E., Gerritsen R., Rovers M., Corrent E., 2011. Le besoin en valine des porcelets. *Journ. Rech. Porcine*, 131-132.
- Waguespack A.M., Bidner T.D., Payne R.L., Southern L.L., 2012. Valine and isoleucine requirement of 20- to 45-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.*, 90, 2276-2284.
- Wallin R., Hall T.R., Hutson S.M., 1990. Purification of branched chain aminotransferase

from rat heart mitochondria. *J. Biol. Chem.*, 265, 6019-6024.

Wang T. C., Fuller M. F., 1989. The optimum dietary amino acid pattern for growing pigs. 1. Experiments by amino acid deletion. *Br. J. Nutr.*, 62, 77-89.

Wiltafsky M.K., Pfaffl M.W., Roth F.X., 2010. The effects of branched-chain amino acid interactions on growth performance, blood metabolites, enzyme kinetics and transcriptomics in weaned pigs. *Br. J. Nutr.*, 103, 964-976.

Wiltafsky M.K., Bartelt J., Relandeau C., Roth F.X., 2009a. Estimation of the optimum ratio of standardized ileal digestible isoleucine to lysine for eight- to twenty-five-kilogram pigs in diets containing spray-dried blood cells or corn gluten feed as a protein source. *J. Anim. Sci.*, 87, 2554-2564.

Wiltafsky M.K., Schmittlein B., Roth F.X., 2009b. Estimates of the optimum dietary ratio of standardized ileal digestible valine to lysine for eight to twenty-five kilograms of body weight pigs. *J. Anim. Sci.*, 87, 2544-2553.

Wu G., 2010. Functional amino acids in growth, reproduction, and health. *Adv. Nutr. Int. Rev. J.*, 1, 31-37.

Wu G., Wu Z., Dai Z., Yang Y., Wang W., Liu C., Wang B., Wang J., Yin Y., 2013. Dietary requirements of "nutritionally non-essential amino acids" by animals and humans. *Amino Acids*, 44, 1107-1113.

Résumé

Le coût élevé des matières premières ainsi que la pression environnementale rendent le contexte favorable à une réduction supplémentaire de la teneur en protéines des aliments des porcelets. Les acides aminés indispensables comme les acides aminés à chaîne ramifiée (la valine, l'isoleucine, la leucine) et l'histidine peuvent alors devenir des facteurs limitants pour la croissance. L'estimation du besoin en ces acides aminés est alors nécessaire pour équilibrer la protéine alimentaire et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote. L'analyse de la réponse des performances à l'apport d'acides aminés est la méthode la plus employée pour estimer les besoins de croissance. Le protocole expérimental, le choix du critère de réponse et les méthodes d'estimation de la réponse sont des facteurs importants de la variation des besoins estimés. Les besoins moyens en valine, isoleucine, leucine et histidine, issus des données empiriques de la bibliographie et exprimés sur la base d'un rapport avec la lysine digestible iléale standardisée, sont respectivement estimés à 70, 52, 101 et 31%. Cependant, tout comme les carences, les excès d'acides aminés peuvent réduire les performances car les acides aminés sont en compétition pour leur catabolisme et leur transport. L'incorporation de sources de protéines contenant de l'hémoglobine augmente le besoin en isoleucine et un excès de leucine dans l'aliment augmente l'effet de la carence en valine. L'adéquation entre les apports et les besoins en acides aminés doit être recherchée pour baisser l'apport de protéines, réduire les rejets azotés et assurer l'objectif de production.

Abstract

Update on amino acid requirements for piglets fed with low crude protein diets

The current context is favorable for a further reduction in the crude protein content in piglet diets. Knowledge of amino acid requirements and the use of free amino acids in diets allow reducing the dietary crude protein content and improving nitrogen utilization while maintaining performance of piglets. In low-protein diets, the branched chained amino acids (valine, isoleucine, and leucine) and histidine have been identified as limiting amino acids for growth. Therefore, the estimation of their requirements is necessary to balance the dietary amino acid supply. Dose-response experiments are usually carried out to estimate amino acid requirements. The experimental design, the response criteria used and the statistical analysis method contribute to the variability in reported requirement estimates. The average valine, isoleucine, leucine and, histidine requirements, based on empirical data and expressed relative to lysine on a standardized ileal digestible basis, are estimated to be 70, 52, 101, and 31% respectively. Excess amino acids can reduce growth due to competition for catabolism and transport. The use of blood cells in the diet increases the isoleucine requirement and an excess leucine supply aggravates the effect of a valine deficiency. A better adequacy should be sought between the supply and requirements of amino acids to reduce the dietary crude protein content and to ensure the production objective.

GLOAGUEN M., LE FLOC'H N., VAN MILGEN J., 2013. Couverture des besoins en acides aminés chez le porcelet alimenté avec des régimes à basse teneur en protéines. *INRA Prod. Anim.*, 26, 3, 277-288.