

L'utilisation d'acides aminés libres dans l'aliment des porcelets permet de formuler des régimes à très basse teneur en protéines

Mathieu GLOAGUEN (1, 2), Nathalie LE FLOC'H (1, 2), Yvan PRIMOT (3), Etienne CORRENT (3) et Jaap VAN MILGEN (1, 2)

(1) INRA, UMR1348 PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

(2) Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, 35000 Rennes, France

(3) Ajinomoto Eurolysine S.A.S, 75817 Paris Cedex 17, France

jaap.vanmilgen@rennes.inra.fr

Avec la collaboration technique d'Audrey MERESSE (2), Marcelle EUDAIMON (3), Agnès STARCK (1), Yolande JAGUELIN-PEYRAUD (1), Georges GUILLEMOIS (1), Jean-François ROUAUD (1), Fabien GUERIN (1) et Patrick TOUANEL (1).

L'utilisation d'acides aminés libres dans l'aliment des porcelets permet de formuler des régimes à très basse teneur en protéines

Nous avons récemment évalué les besoins en valine, isoleucine, leucine et histidine chez le porcelet, ce qui offre la possibilité de formuler des régimes à très basse teneur en protéines. Deux essais ont permis de tester l'effet de la réduction de la teneur en protéines sur les performances zootechniques des porcelets (10-20 kg). Dans une première expérience, la rétention azotée de six blocs de quatre porcelets, répartis sur quatre régimes contenant 19,7, 16,8, 14,0 ou 12,7 % de matière azotée totale (MAT), a été mesurée. La réduction de la MAT de 19,6 à 16,8 % ne pénalise pas la rétention azotée et diminue l'excrétion d'azote de 29 %. A 14,0 et 12,7 % de MAT la rétention azotée est réduite ($P < 0,01$). Dans une deuxième expérience, les performances de quatorze blocs de six porcelets, répartis sur six régimes contenant 17,6, 15,6, 13,5 et 11,8 % de MAT avec du tourteau de soja ou 13,0 et 14,0 % de MAT sans tourteau de soja, ont été mesurées. De 17,6 à 13,5 % de MAT les performances sont maintenues ; à 11,8 % de MAT le GMQ est réduit ($P < 0,01$). Le régime formulé sans tourteau de soja contenant 13,0 % de MAT réduit l'efficacité alimentaire et l'addition de glutamate pour obtenir 14,0 % de MAT restaure les performances ($P < 0,01$). En conclusion, chez le porcelet, l'utilisation de valine, de leucine, d'isoleucine, d'histidine et de phénylalanine libre permet de réduire de 4 points le taux de MAT de l'aliment.

The use of free amino acids in piglet diets enables very low crude protein diets to be formulated

We have recently estimated the valine, isoleucine, histidine and leucine requirements in piglets, which enables very low crude protein (CP) diets to be formulated. Two trials were conducted to test the effect of reducing the dietary CP content on nitrogen retention and performance in 10-20 kg pigs. In a first experiment, we measured the nitrogen retention of six groups, each consisting of four pigs, allotted to four dietary levels of CP (19.7, 16.8, 14.0, and 12.7%). The reduction of CP content from 19.6 to 16.8% had no impact on nitrogen retention and decreased nitrogen excretion by 29%. A further decrease of CP content to 14.0 and 12.7% resulted in reduced nitrogen retention ($P < 0.01$). In a second experiment, we measured the performance of fourteen groups of six pigs each, allotted to six dietary levels of CP with soybean meal (17.6, 15.6, 13.5, and 11.8%) or without soybean meal (13.0 and 14.0%). Decreasing the dietary CP content from 17.6 to 13.5% had no effect on performance. Growth rate was reduced in pigs receiving the 11.8% CP diet ($P < 0.01$). Feeding the diet formulated without soybean meal with 13.0% of CP content resulted in reduced feed efficiency but the addition of glutamate to increase the dietary CP content from 13.0 to 14.0% restored performance ($P < 0.01$). In conclusion, the use of free Val, Leu, Ile, His, and Phe enables a reduction of 4 percentage units of dietary CP in piglets.

INTRODUCTION

La réduction des rejets azotés issus des déjections des porcs est nécessaire pour assurer la durabilité de la production porcine. De plus, l'élevage de porcelets pose des questions très spécifiques car ils doivent, du fait de leur capacité d'ingestion limitée et de leur fort potentiel à déposer des protéines, ingérer un aliment riche en protéines. Or, les protéines non digestibles favorisent la prolifération des bactéries pathogènes dans le tractus gastro-intestinal à l'origine de troubles digestifs (Ball et Aherne, 1987). La baisse de la teneur en protéines des aliments des porcelets et l'utilisation conjointe d'acides aminés (AA) libres permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote et de réduire l'incidence des troubles digestifs (Heo *et al.*, 2009) tout en maintenant les performances de croissance. Les besoins en AA les plus limitants pour la croissance, la lysine (Lys), la thréonine (Thr), la méthionine (Met) (+ Cystine, Cys), et le tryptophane (Trp), ont été évalués et leur utilisation sous forme libre a permis de réduire significativement la matière azotée totale (MAT) des aliments. Le contexte actuel, du fait du coût élevé des matières premières, de la disponibilité des AA sur le marché et des attentes environnementales, reste favorable à une baisse supplémentaire de la MAT. Nous avons récemment estimé les besoins en valine (Val), isoleucine (Ile), histidine (His) et leucine (Leu) chez le porcelet, exprimés en rapport avec la Lys digestible iléale standardisée (DIS Val:Lys, Ile:Lys, His:Lys et Leu:Lys), à respectivement 70, 49, 32 et 102 % (Barea *et al.*, 2009 ; Gloaguen *et al.*, 2012 ; van Milgen *et al.*, 2012). Ces résultats peuvent être utilisés en formulation pour la fabrication de régimes à très basse teneur en protéines.

Pour étudier l'ampleur de la baisse possible de MAT dans les régimes, nous avons testé dans une première expérience l'effet d'une forte réduction de la teneur en protéines sur la rétention azotée du porcelet puis, dans une seconde expérience, sur les performances de croissance.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Dispositif expérimental

Les deux essais ont été réalisés sur des porcelets (Piétrain × (Large White × Landrace)) femelles et mâles castrés, sevrés à 28 jours et issus du troupeau de l'INRA à St-Gilles (35). Durant les 10 premiers jours post-sevrage (PS), les porcelets, logés en cages individuelles, ont reçu un aliment premier âge. Celui-ci a été ensuite progressivement remplacé (sur 3 jours) par l'aliment expérimental. Des blocs de porcelets ont été constitués sur la base du poids vif, du sexe et selon leur origine génétique (frères, demi-frères ou sœurs, demi-sœurs) avant d'être répartis, intra-bloc, entre les régimes expérimentaux. Durant toute la durée des expériences, l'eau a été distribuée à volonté et la température ambiante a été maintenue à 28 °C durant la première semaine PS puis réduite de 1 °C par semaine. Les expériences ont été réalisées à partir de 2 semaines PS (6 semaines d'âge) alors que les porcelets pesaient en moyenne 12 kg. Les porcelets sont pesés à jeun au début et à la fin de la période expérimentale. Les refus d'aliment sont collectés chaque semaine pour la mesure de la MS et un échantillon moyen est constitué à la fin de la période expérimentale en vue des analyses de laboratoire. L'objectif de la formulation des régimes expérimentaux était de minimiser la MAT de l'aliment en substituant du tourteau de soja par du blé tendre, de l'orge, du maïs et des AA libres (Tableau 1).

Les régimes ont été formulés pour couvrir les besoins en DIS Thr:Lys (65 %), (Met + Cys):Lys (60 %), Trp:Lys (22 %), Val:Lys (70 %), Ile:Lys (51 %), Leu:Lys (100 %), His:Lys (32 %), phénylalanine Phe:Lys (61 %), (Phe + Tyrosine):Lys (95 %) et arginine Arg:Lys (42 %).

Pour tester si la baisse de la teneur en protéines des régimes permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote, l'expérience 1 avait pour but d'étudier l'effet de la réduction de la MAT des aliments sur la rétention azotée chez des porcelets rationnés. Six blocs de quatre porcelets mâles castrés ont été répartis entre quatre aliments expérimentaux contenant 19,7, 16,8, 14,0 et 12,7 % de MAT, 1,15 % de Lys DIS et une teneur en énergie nette (EN) variant de 9,9 à 10,4 kJ/g (Tableau 1). La distribution de l'aliment était limitée à 3,5 % du poids vif et les rations étaient ajustées tous les 3 jours selon le gain de poids vif anticipé. L'expérience a duré deux semaines pendant lesquelles les urines et les fèces ont été collectées quotidiennement pour déterminer la rétention d'azote. Les fèces étaient pesées et homogénéisées après chaque semaine de collecte et un échantillon moyen était lyophilisé en vue des analyses de laboratoire. Les urines étaient collectées dans une solution d'H₂SO₄ à 10 % (≈ 10 mL/L) et un échantillon moyen était prélevé chaque semaine pour les analyses de laboratoire.

La deuxième expérience a été réalisée afin d'étudier l'effet de la réduction de la MAT des aliments sur les performances de croissance de porcelets nourris à volonté. Quatorze blocs de six porcelets ont été répartis entre six régimes expérimentaux contenant 17,6, 15,6, 13,5, 11,8, 13,0 et 14,0 % de MAT et une teneur en Lys DIS sublimitante à 1,00 % (Barea *et al.*, 2009). Les aliments ont été élaborés pour être légèrement carencés en Lys DIS pour pouvoir identifier les apports d'AA relativement à la Lys qui ne sont pas limitants pour la croissance selon le concept de la protéine idéale pour lequel tous les AA sont co-limitants pour la croissance (Boisen *et al.*, 2000). Le régime à 13,0 % de MAT a été formulé sans tourteau de soja à base de 40 % de blé tendre, 28 % d'orge et des AA indispensables sous forme libre.

De la L-Glycine (Gly) et de la L-Proline (Pro) ont été utilisées pour que les apports de (Gly + sérine, Ser):Lys et de Pro:Lys DIS soient équivalents à ceux de l'aliment ayant une teneur en MAT de 15,6 %. Du L-Glutamate (L-Glu) a été utilisé comme source d'azote pour atteindre une MAT de 13,0 % (Tableau 1). Le régime à 14,0 % de MAT diffère du régime à 13,0 % de MAT par l'addition de L-Glu (Tableau 1). Les régimes étaient iso-EN (10,2 kJ/g), contenaient 4,0 g/kg de phosphore digestible, un rapport de Ca/P digestible de 2,9 et un bilan électrolytique maintenu à 180 mEq/kg. L'expérience a duré trois semaines pendant lesquelles la vitesse de croissance (GMQ) et la consommation moyenne journalière (CMJ) ont été mesurées et l'indice de consommation (IC) a été calculé.

1.2. Analyses de laboratoire

Les teneurs en matière sèche et matières azotées (NF V18-100) ont été mesurées pour chaque régime et chaque échantillon de fèces alors que l'azote des urines a été déterminé à partir des échantillons sous forme liquide.

En complément, l'énergie brute des régimes a été analysée (ISO 9831) et les teneurs en AA totaux et en AA libres ont été déterminées par le laboratoire d'AJINOMOTO EUROLYSINE S.A.S. (Amiens, France) par échange d'ions (JLC-500 / V AminoTac Amino Acid Analyzer, Jeol, Croissy-sur-Seine, France).

Tableau 1 – Composition des régimes expérimentaux

Expérience	1				2					
MAT, % ¹	19,7	16,8	14,0	12,7	17,6	15,6	13,5	11,8	13,0	14,0
Matières premières, %										
Blé tendre	16,04	17,90	19,92	20,83	19,37	23,58	30,54	32,76	50,00	50,00
Orge	16,04	17,90	19,92	20,83	19,37	23,58	30,54	32,76	28,40	28,40
Maïs	32,08	35,80	39,83	41,65	12,91	15,72	20,36	21,84	-	-
Tourteau de soja 48	26,93	18,85	9,27	4,88	25,19	18,52	8,56	1,97	-	-
Amidon de maïs	4,00	4,00	4,00	4,00	15,00	10,06	-	-	8,10	6,29
Huile de tournesol	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	3,00	2,96	2,21	1,46	1,56
L-Lys HCl	0,34	0,59	0,90	1,04	0,28	0,46	0,72	0,92	1,00	1,00
L-Thr	0,13	0,25	0,40	0,46	0,12	0,20	0,31	0,40	0,45	0,45
L-Trp	0,05	0,09	0,14	0,17	0,42	0,06	0,10	0,13	0,14	0,14
DL-Met	0,13	0,21	0,31	0,35	0,12	0,16	0,21	0,27	0,32	0,32
L-Val	-	0,15	0,32	0,39	-	0,09	0,21	0,32	0,39	0,39
L-His	-	-	0,10	0,15	-	-	0,06	0,12	0,17	0,17
L-Ile	-	-	0,18	0,27	-	-	0,11	0,22	0,28	0,28
L- Leu	-	-	0,25	0,37	-	-	0,18	0,34	0,54	0,54
L-Phe	-	-	0,22	0,37	-	-	0,10	0,29	0,43	0,43
L-Arg	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08	0,08
L-Glu	-	-	-	-	-	-	-	-	1,88	3,59
L-Gly	-	-	-	-	-	-	-	-	0,56	0,56
L-Pro	-	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,20
Phytase	-	-	-	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Bicarbonate de sodium	-	-	-	-	0,09	0,39	0,81	1,15	1,30	1,30
Sel	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Carbonate de calcium	1,10	1,10	1,10	1,10	1,97	2,02	2,08	2,13	2,14	2,14
Phosphate bicalcique	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Complément oligo-vitaminique	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Caractéristiques nutritionnelles, %²										
EN, Mj/kg ³	9,79	10,08	10,40	10,44	10,11	10,16	10,16	10,19	10,41	10,62
MAT	19,47	16,78	13,68	12,89	17,12	15,12	13,21	11,45	12,33	13,17
Lys DIS ⁴	1,13	1,15	1,15	1,10	0,95	0,93	0,91	0,88	0,91	0,92
Thr DIS ⁴	0,69	0,70	0,62	0,65	0,62	0,61	0,61	0,59	0,58	0,58
Met DIS ⁴	0,36	0,40	0,49	0,49	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,38
Cys DIS ⁴	0,26	0,22	0,18	0,16	0,21	0,20	0,18	0,16	0,14	0,14
Trp DIS ⁴	0,25	0,25	0,24	0,24	0,52	0,22	0,19	0,18	0,19	0,19
Ile DIS ⁴	0,71	0,57	0,56	0,57	0,61	0,52	0,49	0,48	0,47	0,48
Val DIS ⁴	0,77	0,77	0,76	0,77	0,68	0,67	0,66	0,64	0,63	0,64
Leu DIS ⁴	1,34	1,13	1,11	1,12	1,12	0,97	0,94	0,91	0,91	0,92
Phe DIS ⁴	0,85	0,69	0,71	0,76	0,74	0,64	0,59	0,62	0,69	0,69
Tyr DIS ⁴	0,59	0,47	0,34	0,29	0,50	0,42	0,33	0,25	0,20	0,19
His DIS ⁴	0,42	0,34	0,35	0,34	0,35	0,31	0,28	0,27	0,28	0,29
Arg DIS ⁴	1,10	0,87	0,59	0,46	0,94	0,80	0,57	0,39	0,38	0,37
(Gly + Ser) DIS ⁴	1,45	1,19	0,85	0,72	1,30	1,12	0,87	0,66	1,07	1,07
Pro DIS ⁴	1,05	0,93	0,78	0,70	0,90	0,85	0,80	0,71	0,81	0,81

¹ Valeurs anticipées de MAT lors de la formulation.² Valeurs analysées et ajustées à 87,3 % de matière sèche.³ Valeurs d'énergie nette calculées à partir de l'analyse de l'énergie brute de l'aliment (Noblet et al., 1994).⁴ Valeur digestible iléale standardisée des acides aminés calculée à partir de l'analyse des acides aminés des régimes et des valeurs de digestibilité des matières premières (Sauvant et al., 2004).

1.3. Calculs et analyses statistiques

Les pertes d'azote fécal ont été calculées à partir de la quantité de fèces collectée et de la teneur en azote de ces fèces. La quantité d'azote absorbée a alors été estimée en soustrayant la quantité d'azote fécale de l'azote ingéré. L'azote retenu a été calculé en soustrayant la quantité d'azote urinaire de la quantité d'azote absorbée.

Les données ont été soumises à une analyse de variance en utilisant la procédure MIXED de SAS (SAS Inst. Inc., 1999-2000. Version 8.1, Cary, NC) avec le régime comme effet principal et le bloc comme effet aléatoire.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. La réduction de la teneur en protéines

L'aliment standard pour porcelet, formulé à partir de céréales et de tourteau de soja et supplémenté avec les AA les plus limitants (L-Lys, L-Thr, DL-Met et L-Trp), contient 19,7 % de MAT et 1,15 % de Lys DIS (Expérience 1). L'apport de L-Val dans l'aliment permet de réduire la MAT à 16,8 % sans réduire la rétention azotée ni le GMQ (Tableau 2). L'utilisation conjointe de L-Ile, L-Phe, L-His et L-Leu permet de réduire davantage la teneur en MAT à respectivement 14,0 % et à 12,7 % (Expérience 1). Cependant, le GMQ et la rétention azotée sont également réduits ($P < 0,01$, Tableau 2). Les porcelets utilisent moins efficacement l'aliment pour leur croissance puisque l'IC augmente de 19 % lorsque la MAT est réduite de 16,8 à 12,7 %. Les résultats de l'expérience 2 montrent que, lorsque l'aliment est apporté à volonté, la teneur en MAT peut être réduite de 17,6 à 13,5 %, sans pénaliser le GMQ et l'IC, avec un apport de 1,00 % de Lys DIS dans l'aliment, en utilisant de la L-Val, L-Ile, L-Phe, L-His et L-Leu (Tableau 3). De 13,5 à 11,8 % de MAT, le GMQ diminue et l'IC augmente ($P < 0,01$). Ces résultats indiquent donc que le taux de MAT des aliments des porcelets peut être réduit de 4 points avec l'utilisation de Val, de Leu, d'His, d'Ile et de Phe sous forme libre sans pénaliser les performances. Au-delà, la vitesse de croissance est réduite du fait d'une baisse de la rétention azotée et de l'efficacité alimentaire.

L'expérience 2 a permis de tester la formulation d'aliments sans tourteau de soja et à très basse teneur en protéines. L'ingestion du régime à 13,0 % de MAT a réduit l'efficacité d'utilisation de l'aliment par rapport au régime à 17,6 % de MAT ($P < 0,01$). Néanmoins, l'apport de Glu de 13,0 à 14,0 % de MAT restaure l'efficacité alimentaire et indique qu'un aliment ne contenant que du blé tendre et de l'orge comme source de protéines peut maintenir les performances des porcelets si l'aliment est renforcé en AA libres.

2.2. L'efficacité d'utilisation de l'azote

Les données obtenues avec le bilan azoté (Tableau 2) nous indiquent que l'excrétion d'azote diminue de 29 % lorsque le taux de MAT est réduit de 2,9 points (de 19,7 à 16,8 % de MAT). Ces résultats confirment que l'excrétion azotée est réduite de 10 % par point de MAT dans des régimes à basse teneur en protéines supplémentés avec des AA libres (Canh *et al.*, 1998 ; Dourmad *et al.*, 1993 ; Le Bellego et Noblet, 2002). Dans l'expérience 2, nous avons vu que les performances ne sont pas pénalisées lorsque la MAT est réduite de 17,6 à 13,5%. L'excrétion d'azote résultant de l'ingestion d'un aliment pourrait donc être réduite de 40 % chez le porcelet sans pénaliser les performances.

Nos résultats montrent que le coefficient d'utilisation digestive de l'azote ne varie pas avec la teneur en protéines, confirmant ainsi que l'excès de protéines est principalement excrété dans les urines (Canh *et al.*, 1998). Notre étude démontre aussi que les porcelets peuvent retenir efficacement l'azote puisque 71 % de l'azote ingéré est retenu, 15 % est excrété sous forme de fèces et 14 % sous forme d'urine lorsqu'ils ingèrent l'aliment à 16,8 % de MAT (Tableau 2). Chez des porcs en croissance de 65 kg, Le Bellego *et al.* (2001) ont montré que l'amélioration de l'équilibre des AA de l'aliment permet de réduire la MAT de l'aliment jusqu'à 12,3 % sans pénaliser la rétention azotée. Dans cette étude, les porcs ont retenu 65 % de l'azote ingéré, excrété 11 % d'azote sous forme de fèces et 24 % d'azote sous forme d'urine.

2.3. La protéine idéale

La baisse de la MAT des aliments et l'apport de L-Lys réduisent les rapports d'AA relativement à la Lys DIS. Un apport minimal d'AA doit cependant être assuré sous formes de protéines ou d'AA libres, pour couvrir les besoins en AA des porcelets. Dans l'expérience 2, les apports d'Ile:Lys, Leu:Lys, His:Lys, Phe:Lys et (Phe + Tyr):Lys DIS ont été réduits jusqu'à 51, 100, 32, 61 et 95 % lorsque la MAT a été abaissée de 17,6 à 13,5 %, ceci sans baisse de performance. Ce résultat indique que ces apports ne sont pas limitants pour la croissance des porcelets dans un aliment complet à base de céréales et de tourteau de soja. Ces résultats valident donc le profil de la protéine idéale utilisé dans la présente étude. Le besoin en Arg:Lys DIS est actuellement estimé à 46 % (NRC, 2012). Le régime à 14,0 % de MAT (Expérience 2) apporte 42 % d'Arg:Lys. La consommation de ce régime ne réduit pas les performances des porcelets par rapport à ceux ingérant le régime à 17,6 % de MAT. Nous pouvons donc suggérer que le besoin en Arg:Lys DIS est inférieur ou égal à 42 %.

2.4. Les facteurs limitant la baisse de la teneur en protéines

L'utilisation sous forme libre des AA indispensables et potentiellement limitants pour la croissance (Lys, Thr, Met, Trp, Val, Leu, Ile, His, Phe et Arg) ne suffit pas à maintenir les performances du porcelet lorsque la MAT est réduite à 14,0 % (pour une Lys DIS à 1,15 %, expérience 1) et 11,8 % (pour une Lys DIS à 1,00 %, expérience 2). Dans l'expérience 2, l'apport de Glu a permis d'augmenter la teneur en MAT de 13,0 à 14,0%, améliorant ainsi l'efficacité alimentaire (Tableau 3, $P < 0,01$). Le Glu est un AA non indispensable qui constitue une source d'azote pour la synthèse des AA non indispensables. Dans le régime à 13,0 % de MAT, une carence en azote limiterait la synthèse des AA non indispensables et le dépôt de protéines à l'origine de la baisse de l'efficacité alimentaire observée. Trois études ont évalué le besoin en azote pour la croissance du porc en exprimant ce besoin par le rapport entre l'azote fourni par les AA indispensables et l'azote total de l'aliment (N_{AAE}/N_{total}) (Götterbarm *et al.*, 1998 ; Heger *et al.*, 1998 ; Lenis *et al.*, 1999). Pour ces trois études, le besoin en azote, estimé en utilisant la rétention azotée comme critère de réponse, a été évalué entre 43 et 45 % d' N_{AAE}/N_{total} . Nous estimons, d'après l'expérience 2, qu'un apport de 13,5 % de MAT dans l'aliment, pour une teneur en Lys DIS de 1,00 %, est nécessaire au maintien des performances de croissance, ce qui correspond à un rapport d' N_{AAE}/N_{total} de 45 %.

L'impact de l'apport de certains AA non indispensables sur les performances de croissance n'a pas été clairement établi. Chung et Baker (1992) suggèrent qu'un apport de Gly, Glu et

Pro, comme source d'azote, permet une meilleure utilisation de l'azote qu'un apport de Glu seul. C'est pourquoi, dans l'expérience 2, nous avons formulé les régimes à 13,0 et 14,0 % de MAT avec un minimum d'apport de Pro:Lys et de (Gly + Ser):Lys. L'apport de Gly a été raisonné avec l'apport de Ser puisque la Gly peut être synthétisée à partir de la Ser. Une réponse du dépôt de protéines à l'apport de Pro a été observée par Ball *et al.* (1986) chez des porcelets de 1 à 5 kg alors qu'aucun effet n'est observé dans l'étude de Chung et Baker (1993) chez des porcelets de 5 kg nourris pendant 28 jours. Plus récemment, Powell *et al.* (2011) ont constaté qu'un aliment à base de maïs et de tourteau de soja contenant 13,0 % de MAT ne permettait pas de maximiser la croissance de porcs de 20 à 40 kg du fait de la carence en Gly ou Gly + Arg. Cette carence n'est pas liée à un manque d'azote puisque la supplémentation de Glu n'améliorait pas les performances. La Gly peut donc être un AA semi-indispensable chez le porc et la capacité de l'animal à synthétiser de la Gly pourrait être

insuffisante pour couvrir ses besoins lorsque la teneur en protéines de l'aliment est trop basse. Il semble donc que certains AA (semi-indispensables) peuvent devenir limitants pour la croissance dans des régimes à très basse teneur en protéines.

La réduction de l'apport de protéines et l'apport d'AA sous forme libre s'accompagnent d'une baisse du bilan électrolytique (BE) de la ration. Ce bilan, exprimé en mEq/kg de matière sèche, se définit de la manière suivante : $BE = [Na^+] + [K^+] - [Cl^-]$. Le BE permet de mesurer le pouvoir acidogène (BE faible) ou alcalinogène (BE élevé) de la ration. Une augmentation du BE accroît le pH sanguin et les concentrations en bicarbonates de manière quadratique (Apper-Brossard *et al.*, 2009). Chez le ruminant et le porc, la baisse du BE diminue la consommation d'aliment (Apper-Brossard *et al.*, 2009). Cette relation est curvilinéaire avec un maximum à 200 mEq/kg pour le porc. La baisse de l'apport de tourteau de soja s'accompagne d'une baisse du BE puisque la

Tableau 2 – Effet de la réduction de la teneur en protéines de l'aliment sur les performances et le bilan azoté du porcelet entre 10 et 20 kg (expérience 1 ; moyennes ajustées).

Régime	A	B	C	D	Statistiques ²	
MAT, % ¹	19,7	16,8	14,0	12,7	ETR	P
Performances						
PV initial, kg	11,5	11,9	11,8	11,7	0,8	0,90
PV final, kg	16,5	16,4	16,0	15,7	0,9	0,56
CMJ, g/j ³	513	529	524	525	24	0,46
GMQ, g/j ³	375 ^a	364 ^a	323 ^b	305 ^b	41	<0,01
IC, g/g ³	1,37 ^a	1,45 ^{ab}	1,62 ^{bc}	1,72 ^c	0,25	<0,01
Bilan azoté						
N ingéré, g/j	15,5 ^a	13,8 ^b	11,5 ^c	10,5 ^d	0,8	<0,01
N absorbé, g/j	13,3 ^a	11,7 ^b	9,7 ^c	9,0 ^d	0,7	<0,01
N retenu, g/j	9,9 ^a	9,8 ^a	8,3 ^b	7,5 ^c	0,8	<0,01
CUDN, % ⁴	85,8	84,8	84,3	85,7	2,3	0,47
CUPN, % ⁴	63,9 ^a	71,0 ^b	72,2 ^b	71,4 ^b	4,1	<0,01

¹ Valeurs anticipées de MAT lors de la formulation. Les valeurs analysées de MAT des régimes A, B, C et D sont respectivement de 19,5, 16,8, 13,7 et 12,9 % pour une Lys DIS de 1,15 %.

² ETR : écart-type résiduel. P : valeur pour l'effet régime. Sur une même ligne, les moyennes ajustées non suivies d'une même lettre sont différentes ($P < 0,05$).

³ Ajustée à 87,3 % de matière sèche. CMJ : consommation moyenne journalière ; GMQ : gain moyen quotidien ; IC : indice de consommation.

⁴ CUDN : coefficient d'utilisation digestive de l'azote = $N \text{ absorbé} \times 100 / N \text{ ingéré}$; CUPN : coefficient d'utilisation pratique de l'azote = $N \text{ retenu} \times 100 / N \text{ ingéré}$.

Tableau 3 – Effet de la réduction de la teneur en protéines de l'aliment sur les performances du porcelet entre 10 et 20 kg (expérience 2 ; moyennes ajustées).

Régime	A	B	C	D	E	F	Statistiques ²	
MAT, % ¹	17,6	15,6	13,5	11,8	13,0	14,0	ETR	P
PV initial, kg	12,7	12,7	12,6	12,6	13,0	12,8	0,6	0,60
PV final, kg	22,2 ^a	22,2 ^a	21,9 ^a	20,1 ^b	21,8 ^a	22,3 ^a	1,7	<0,01
CMJ, g/j ³	766	775	779	734	810	782	96	0,55
GMQ, g/j ³	450 ^a	454 ^a	442 ^a	358 ^b	420 ^a	451 ^a	67	<0,01
IC, g/g ³	1,71 ^a	1,71 ^a	1,78 ^a	2,16 ^b	1,94 ^b	1,75 ^a	0,25	<0,01

¹ Valeurs anticipées de MAT lors de la formulation. Les valeurs analysées de MAT des régimes A, B, C, D, E et F sont respectivement de 17,1, 15,1, 13,2, 11,5, 12,3 et 13,2 % pour une Lys DIS de 1,00 %. Les régimes contenant une MAT de 13,0 et 14,0 % ont été formulés sans tourteaux de soja et diffèrent par l'apport de L-Glu.

² ETR : écart-type résiduel. P : valeur pour l'effet régime. Sur une même ligne, les moyennes ajustées non suivies d'une même lettre sont différentes ($P < 0,05$).

³ Ajustée à 87,3 % de matière sèche. CMJ : consommation moyenne journalière ; GMQ : gain moyen quotidien ; IC : indice de consommation.

teneur en potassium du tourteau de soja est élevée (2,1 %). Dans l'expérience 2, si l'on ne prend pas en compte l'apport de bicarbonate de sodium exogène, les BE des régimes contenant 17,6, 15,6, 13,5, 11,8, 13, et 14,0 % de MAT (expérience 2) sont respectivement de 170, 130, 80, 40, 20 et 20 mEq/kg. La relation curvilinéaire entre le BE et les performances de croissance du porc décrite par Apper-Brossard *et al.* (2009) nous permet d'estimer que la quantité de matière sèche ingérée serait réduite de 8 % et le GMQ de 12 % du fait d'une baisse du BE de 200 à 20 mEq/kg. Dans l'expérience 2, du bicarbonate de sodium a été apporté pour maintenir un BE de 180 mEq/kg malgré la baisse de la teneur en protéines. Néanmoins, les voies d'actions du BE sur les performances zootechniques ne sont pas clairement établies, mais il constitue avec les AA et l'azote un facteur potentiellement limitant pour l'ingestion et la croissance dans des régimes à très basse teneur en protéines.

CONCLUSION

La réduction de la matière azotée totale de l'aliment de 17,6 à 13,5 % pour une Lys DIS de 1,00 %, par l'utilisation conjointe de Val, de Leu, d'Ile, d'His et de Phe libre, permet de réduire l'excrétion azotée de 40 % tout en maintenant les performances des porcelets tant que les besoins des AA indispensables sont couverts. Le tourteau de soja de l'aliment peut être totalement substitué par des céréales et des AA libres dans ces régimes à très basse teneur en protéines.

En dessous de 13,5 % de MAT pour une Lys DIS de 1,00 %, l'azote semble devenir un facteur limitant pour la croissance.

A ces niveaux très bas de protéines, une attention particulière doit être apportée à l'apport de certains AA semi-indispensables, comme la Gly, et à l'équilibre acido-basique de l'aliment qui sont fortement réduits.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Apper-Brossard E., Peyraud J.-L., Dourmad J.Y., 2009. Effet du bilan électrolytique de la ration sur l'équilibre acido-basique et les performances zootechniques des animaux domestiques à fort niveau de production. *INRA Prod. Anim.*, 22, 117-130.
- 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.
- Ball R.O., Atkinson J.L., Bayley H.S., 1986. Proline as an essential amino acid for the young pig. *Br. J. Nutr.*, 55, 659-668.
- Barea R., Brossard L., Le Floc'h N., Primot Y., Melchior D., van Milgen J., 2009. The standardized ileal digestible valine-to-lysine requirement ratio is at least seventy percent in postweaned piglets. *J. Anim. Sci.*, 87, 935-947.
- Boisen S., Hvelplund T., Weisbjerg M.R., 2000. Ideal amino acid profiles as a basis for feed protein evaluation. *Livest. Prod. Sci.*, 64, 239-251.
- Canh T.T., Aarnink A.J.A., Schutte J.B., Sutton A., Langhout D.J., Verstegen M.W.A., 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. *Livest. Prod. Sci.*, 56, 181-191.
- Chung T.K., Baker D.H., 1992. Ideal amino acid pattern for 10-kilogram pigs. *J. Anim. Sci.*, 70, 3102-3111.
- Chung T.K., Baker D.H., 1993. A note on the dispensability of proline for weanling pigs. *Anim. Prod.*, 56, 407-408.
- Dourmad J.Y., Henry Y., Bourdon Y., Quiniou N., Guillou D., 1993. Effect of growth potential and dietary protein input on growth performance, carcass characteristics and nitrogen output in growing-finishing pigs. *Proceedings Congress on Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences*, Wageningen, pp. 206-211.
- Gloaguen M., Le Floc'h N., Primot Y., Corrent E., van Milgen J., 2012. Response of piglets to the standardized ileal digestible isoleucine, histidine and leucine supply in cereal-soybean meal-based diets. *Animal*, FirstView, 1-8.
- Gotterbarm G.G., Roth F.X., Kirchgessner M., 1998. Influence of the ratio of indispensable: dispensable amino acids on whole-body protein turnover in growing pigs. *J. Anim. Physiol. and Anim. Nutr.*, 79, 174-183.
- 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.
- Heo J.M., Kim J.C., Hansen C.F., Mullan B.P., Hampson D.J., Pluske J.R., 2009. Feeding a diet with decreased protein content reduces indices of protein fermentation and the incidence of postweaning diarrhea in weaned pigs challenged with an enterotoxigenic strain of *Escherichia coli*. *J. Anim. Sci.*, 87, 2833-2843.
- Le Bellego L., Noblet J., 2002. Performance and utilization of dietary energy and amino acids in piglets fed low protein diets. *Livest. Prod. Sci.*, 76, 45-58.
- Le Bellego L., van Milgen J., Dubois S., Noblet J., 2001. Energy utilization of low-protein diets in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 79, 1259-1271.
- 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.
- Noblet J., Fortune H., Shi X.S., Dubois S., 1994. Prediction of net energy value of feeds for growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 72, 344-354.
- NRC, 2012. *Nutrient Requirement of Swine*. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC, 210 p.
- 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.
- Sauvant D., Perez J.-M., Tran G., 2004. *Table of composition of nutritional value of feed materials*. Pigs, Poultry, Cattle, Sheep, Goats, Rabbits, Horses, Fish. 2nd ed. INRA Editions, Paris, 80-287.
- van Milgen J., Gloaguen M., Le Floc'h 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.