

Effets de la réduction du taux de protéines de l'aliment et de la fréquence de distribution des repas sur l'utilisation de l'énergie chez le porc en croissance

L. LE BELLEGO, J. NOBLET, J. VAN MILGEN, S. DUBOIS

*Institut National de la Recherche Agronomique
Station de Recherches Porcines - 35590 Saint-Gilles*

*Avec la collaboration technique de A. Roger pour le suivi des animaux
et de R. Vilboux pour la fabrication des régimes expérimentaux*

Effets de la réduction du taux de protéines de l'aliment et de la fréquence de distribution des repas sur l'utilisation de l'énergie chez le porc en croissance

Trois essais ont été conduits chez le porc en croissance de 60 kg de façon à préciser les effets de la réduction du taux de matières azotées totales (MAT), associée à une supplémentation en acides aminés industriels (lysine, méthionine, thréonine, tryptophane, isoleucine et valine), sur l'utilisation digestive et métabolique de l'azote et de l'énergie. Dans l'essai 1, une large variation du taux de MAT (18,9 à 12,3%; 4 aliments) a été étudiée alors que dans les essais 2 et 3, deux aliments ayant des teneurs en MAT de 17,4 et 13,9 ont été utilisés. Dans les essais 1 et 2, l'aliment est distribué en 4 repas par jour alors que dans l'essai 3, 2 fréquences (2 et 7 repas) sont comparées. Nos résultats montrent que la diminution du taux de MAT permet une réduction de 40 (essais 2 et 3) à 60% (essai 1) des rejets d'azote, sans affecter la quantité d'azote fixé. Par ailleurs, elle se traduit par une diminution des pertes d'énergie dans les urines et sous forme de chaleur de respectivement 3,5 et 7 kJ par gramme de protéines ingérées en moins. Ces données confirment le moindre rendement de l'énergie des MAT excédentaires par rapport aux besoins du porc et sont en total accord avec les conclusions du système énergie nette. La fréquence des repas est, en revanche, sans effet sur l'utilisation de l'azote et de l'énergie.

Effects of reducing the dietary crude protein level and of meals frequency on energy utilization in growing pigs

Three trials were conducted with growing pigs of 60 kg body weight, in order to evaluate the effects of reducing the dietary crude protein (CP) content, in association with industrial amino acids supplementation (lysine, methionine, threonine, tryptophan, isoleucine and valine), on digestive and metabolic utilization of nitrogen and energy. In trial 1, four diets ranging in CP level between 18,9 to 12,3% were used, whereas in trial 2 and 3, two diets with 17,4 and 13,9% CP were used. In trials 1 and 2, the feed was given in 4 meals per day whereas in trial 3, 2 frequencies (2 and 7 meals/day) were compared. The results show that decreasing the CP content allows a reduction of nitrogen excretion by 40 (trials 2 and 3) or 60% (trial 1), without affecting the nitrogen retention. In addition, this reduction in nitrogen excretion was accompanied by both a reduction in urinary energy loss and of heat production, corresponding to 3,5 and 7 kJ per gram decrease in protein intake, respectively. These data confirm the lower energy utilization of CP supplied above the pig's requirement and are in full agreement with the conclusions of the net energy system. Meals frequency (trial 3) had no effect on nitrogen and energy utilization.

INTRODUCTION

L'amélioration de la connaissance du besoin des porcs en acides aminés ainsi que l'augmentation constante du nombre d'acides aminés industriels disponibles, permettent de réduire le taux de protéines dans l'aliment, tout en maintenant les performances des animaux avec, pour conséquence essentielle, une réduction marquée des rejets d'azote dans les effluents (BOURDON et al, 1995; JONDREVILLE et al, 1995; CANH et al, 1998). La réduction du taux de protéines dans l'aliment entraîne également une épargne d'énergie liée en particulier à la diminution de l'excrétion azotée et à une moindre production de chaleur (NOBLET et al, 1987; NOBLET et al, 1994; QUINIOU et al, 1995). Il résulte de ces observations que le remplacement des protéines par de l'amidon et/ou des matières grasses entraîne une moindre production de chaleur de l'animal et une augmentation de la valeur énergétique nette de l'aliment. Cependant, le système énergie nette a été établi avec des régimes dont le taux de protéines était en moyenne de 19,8% (par rapport à la matière sèche), soit des valeurs très supérieures aux taux pouvant être pratiqués chez le porc en croissance. On peut donc s'interroger sur la validité des équations de prédiction de la valeur énergétique nette pour les régimes à basse teneur en protéines. Enfin, il a été montré que de faibles fréquences de distribution des repas (1 à 2 repas par jour) pouvaient être associées à une détérioration de l'utilisation des acides aminés apportés sous forme libre et, en conséquence, à des performances moindres des animaux (BATTERHAM et BAYLEY, 1989).

L'objectif des 3 essais mis en place était de mesurer l'effet de la diminution du taux de protéines dans l'aliment sur la production de chaleur et l'utilisation de l'énergie en fonction de la fréquence de distribution des repas, chez le porc en croissance. Dans le premier essai, il s'agissait de déterminer l'effet du remplacement partiel des protéines par de l'amidon sur l'utilisation de l'énergie. L'objectif du second essai était de valider les résultats de l'essai 1 avec des régimes formulés à partir de matières premières conventionnelles et, dans un troisième essai, de tester l'effet de la fréquence de distribution des repas sur l'utilisation de l'énergie et des protéines de ces régimes.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Régimes expérimentaux

Dans l'essai 1, 4 régimes ont été formulés de façon à abaisser le taux de protéines de 18,9% (régime 1) à 12,3% (régime 4), en substituant progressivement des protéines d'isolat de soja par de l'amidon de maïs (tableau 1). Les régimes 2, 3 et 4 ont été supplémentés en L-lysine, D/L-méthionine, L-thréonine, L-tryptophane, L-isoleucine et L-valine afin, d'une part, de maintenir un rapport lysine digestible/énergie nette constant (0,76 g/MJ) et, d'autre part, de respecter des rapports optimaux pour la croissance entre les acides aminés essentiels (HENRY, 1993) (tableau 2). Dans le second et le troisième essai, 2 régimes ont été formulés à partir de matières premières conventionnelles. Le taux

de protéines était abaissé de 17,4% (régime 1) à 13,9% (régime 2) en substituant une partie du tourteau de soja par du blé et du maïs. Les 2 régimes respectaient par ailleurs les mêmes contraintes nutritionnelles que ceux de l'essai 1.

1.2. Animaux et dispositifs expérimentaux

Les animaux utilisés étaient des mâles castrés de race Piétrain x (Landrace x Large White) d'environ 60 kg de poids vif en début de période expérimentale. Dans l'essai 1, les animaux ont été affectés de façon à équilibrer les poids vifs et les âges entre les 4 traitements. Dans les essais 2 et 3, des couples de frères (ou blocs) étaient affectés aux 2 aliments (essai 2) ou aux 2 fréquences d'alimentation d'un aliment (essai 3). De 5 à 7 animaux ont été affectés à chaque traitement. Dans les essais 1 et 2, la fréquence des repas était de 4 repas/jour (9h, 13h, 17h et 21h) et, dans l'essai 3, de 2 (9h et 18h) ou 7 (9h, 12h, 15h, 18h, 21h, 1h et 5h) repas/jour. La fréquence 7 est représentative du nombre de repas effectués par des animaux nourris à volonté (QUINIOU et al, 1999). Tous les animaux étaient adaptés à la nature et au mode de distribution de l'aliment et à la cage de digestibilité pendant deux semaines et recevaient environ 1,90 MJ d'EN par kg de PV^{0,60} à l'issue de la période d'adaptation. Les fèces et les urines ont été collectées quotidiennement pendant 8 jours dont les 5 derniers en chambre respiratoire. Pendant 2 jours supplémentaires, les animaux étaient maintenus à jeun en chambre respiratoire afin de mesurer leur production de chaleur au jeûne.

1.3. Mesures sur animaux

Les animaux étaient pesés au début et à la fin de la période de collecte des excréta, ainsi qu'à la sortie de la période en chambre respiratoire. Durant toute la collecte, les quantités d'aliment ingéré ont été mesurées quotidiennement. Les urines et les fèces étaient également collectées quotidiennement et cumulées sur toute la période. Des échantillons d'aliments, de fèces et d'urines ont été constitués pour les analyses de laboratoire.

Pendant les 7 derniers jours, les animaux étaient placés en chambre respiratoire afin d'estimer leur production de chaleur quotidienne. Les installations utilisées étaient composées de 2 chambres respiratoires, précédemment décrites par NOBLET et al (1993), pouvant recevoir chacune un porc en cage de digestibilité. La température ambiante a été maintenue à 24°C et la photopériode était de 13h de lumière et 11h d'obscurité. L'ingestion d'aliment et l'activité physique des animaux ont été suivies grâce à des capteurs placés sous l'auge et sous les pieds de la cage. Les échanges respiratoires, le comportement alimentaire et l'activité physique ont été mesurés en continu. Les quantités d'azote évaporé ont également été déterminées.

1.4. Analyses de laboratoire

Les échantillons d'aliment (1 par régime) ont été analysés pour leur teneur en énergie brute, azote, amidon, matières grasses, cellulose brute, NDF, ADF et ADL (tableau 2) selon les techniques décrites par NOBLET et al (1989). Les teneurs

Tableau 1 - Composition centésimale des régimes expérimentaux

Composition des régimes, %	Essai 1				Essais 2 et 3	
	1	2	3	4	1	2
Blé	40,52	40,52	40,52	40,52	36,85	42,44
Maïs	40,53	40,53	40,53	40,53	36,84	42,43
Tourteau de soja	7,00	7,00	7,00	7,00	23,00	11,00
Isolat de soja	8,70	5,80	2,90	-	-	-
Amidon de maïs	-	2,54	4,98	7,28	-	-
L-lysine	-	0,20	0,39	0,58	0,06	0,43
D/L-méthionine	-	0,05	0,11	0,18	-	0,11
L-thréonine	-	0,08	0,16	0,25	-	0,16
L-tryptophane	-	0,03	0,05	0,08	-	0,05
L-isoleucine	-	-	0,03	0,14	-	0,04
L-valine	-	-	0,08	0,19	-	0,09
Phosphate bicalcique	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Carbonate de calcium	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Sel	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
CMV	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tableau 2 - Composition chimique et valeur nutritionnelle des régimes expérimentaux

Régimes	Essai 1				Essais 2 et 3	
	1	2	3	4	1	2
Composition chimique, % (1)						
Matières minérales	4,5	4,4	4,3	4,1	5,0	4,3
Matières azotées totales	18,9	16,7	14,6	12,3	17,4	13,9
Amidon	48,1	50,3	52,5	54,5	45,0	52,2
Matières grasses	2,1	2,1	2,2	2,1	2,4	2,4
Cellulose brute	1,7	1,7	1,7	1,8	2,4	1,9
NDF	8,2	7,8	7,9	8,6	10,5	8,5
ADF	2,3	2,2	2,2	2,4	3,4	2,7
ADL	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3
Acides aminés totaux, % (1)						
Lysine	0,91	0,90	0,88	0,89	0,89	0,87
Thréonine	0,65	0,63	0,61	0,61	0,61	0,59
Tryptophane	0,22	0,20	0,19	0,18	0,21	0,19
Méthionine	0,29	0,31	0,33	0,37	0,27	0,30
Méthionine + Cystine	0,58	0,58	0,57	0,58	0,57	0,55
Isoleucine	0,75	0,62	0,54	0,52	0,70	0,51
Leucine	1,51	1,33	1,13	0,96	1,42	1,08
Valine	0,86	0,73	0,69	0,67	0,82	0,67
Histidine	0,42	0,38	0,32	0,27	0,40	0,30
Phénylalanine	0,87	0,74	0,64	0,52	0,84	0,61
Valeurs Nutritionnelles (2)						
ED, MJ/kg	14,24	14,17	14,07	13,97	14,00	13,93
EM, MJ/kg	13,70	13,69	13,65	13,61	13,45	13,50
EN, MJ/kg	10,25	10,35	10,44	10,51	9,96	10,29
Lysine digestible, g/MJ EN	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76

(1) Valeurs mesurées et exprimées pour une teneur en matière sèche moyenne de 87,3%

(2) Teneurs en énergie digestible (ED) et métabolisable (EM) calculées selon les tables I.N.R.A. (1989); teneurs en énergie nette (EN) selon Noblet et al. (1994); teneurs en lysine digestible standardisée selon les tables Eurolysine - ITCF (1995); données exprimées pour une teneur en matière sèche moyenne de 87,3%

en acides aminés totaux ont été contrôlées par le laboratoire d'EUROLYSINE à Amiens. Tous les échantillons d'urines et de fèces ont été analysés pour leur teneurs en azote et en énergie brute. Les teneurs en matières grasses et en cellulose brute ont été déterminées sur des pools de fèces par régime (et par fréquence pour l'essai 3). Enfin, les solutions piégeant l'azote évaporé des chambres respiratoires ont été analysées pour leur teneur en azote.

1.5. Calculs et analyses des données

Les coefficients d'utilisation digestive (CUD) de la matière sèche, de la matière organique, des matières grasses, de la cellulose brute, de l'azote et de l'énergie brute ainsi que les éléments du bilan d'azote ont été calculés selon les méthodes habituelles. La production de chaleur totale de chaque animal a été calculée à partir des cinétiques de consommation d'O₂ et de production de CO₂ et de CH₄ et le bilan d'énergie a été déterminé selon les méthodes décrites par NOBLET et al (1989). La mesure en continu des échanges respiratoires, du comportement alimentaire et de l'activité physique a permis de modéliser les cinétiques d'échanges respiratoires et de calculer la production de chaleur associée à chacun de ces événements (VAN MILGEN et al, 1997; 2000). La connaissance de la production de chaleur liée à l'activité physique permet d'ajuster les données de production de chaleur pour une activité standard ou une activité nulle. L'effet thermique de l'aliment correspond à la différence entre la production de chaleur pour une activité nulle chez l'animal nourri et sa production de chaleur à jeun, également pour une activité nulle. Les teneurs en énergie digestible (ED), métabolisable (EM) et nette (EN) de l'aliment ainsi que les quantités d'énergie fixée par les animaux ont été calculées selon les méthodes décrites par NOBLET et al (1989).

1.6. Analyses statistiques

L'analyse statistique des données a été réalisée par analyse de variance et de covariance avec comparaison des moyennes grâce à la procédure GLM du logiciel SAS (1989). Les données ont été généralement rapportées au poids métabolique (kg PV^{0,60}) (NOBLET et al, 1999). Dans l'essai 1, les données ont été traitées selon un modèle prenant en compte l'effet du régime (n=4) avec comme covariable la quantité d'énergie ingérée (ED ou EN, MJ/jour/kg PV^{0,60}). Dans l'essai 2, le modèle prenait également en compte le bloc et l'interaction entre le régime et le bloc. Les données de l'essai 3 ont été traitées selon un modèle prenant en compte le régime, le bloc (intra-régime), la fréquence de distribution des repas et l'interaction entre le régime et la fréquence de distribution.

2. RÉSULTATS

La composition chimique des régimes a été conforme aux objectifs fixés lors de la formulation avec une réduction progressive du taux de protéines de 18,9 à 12,3% pour l'essai 1 et de 17,4 à 13,9% pour les essais 2 et 3 (tableau 2). Dans l'essai 1, l'utilisation d'isolat de soja et d'amidon de maïs a permis de réduire le taux de protéines sans affecter

les autres caractéristiques chimiques de l'aliment, alors que dans les essais 2 et 3, le remplacement partiel du tourteau de soja a entraîné une diminution d'environ 20% de la teneur en fibres du régime 2. En ce qui concerne les animaux, ils étaient en moyenne âgés de 110 jours en début de collecte des excréta dans les essais 1 et 2 et de 107 jours dans l'essai 3 et pesaient respectivement 61, 58 et 59 kg. Les vitesses de croissance n'ont pas été affectées par les traitements et étaient en moyenne de 1042, 1008 et 864 g/jour respectivement pour les essais 1, 2 et 3.

2.1. Essai 1

Les données du tableau 3 indiquent que les poids des animaux étaient identiques d'un régime à l'autre et que les animaux ont reçu, conformément au protocole, les mêmes quantités d'aliment. Les coefficients utilisation digestive des nutriments (CUD) tendent à augmenter avec la diminution du taux de protéines, à l'exception du CUD des matières azotées qui diminue significativement. Les quantités d'énergie perdue sous forme de méthane (% ED) ne semblent pas affectées par la nature du régime, alors que les quantités d'énergie perdue dans les urines diminuent significativement avec l'abaissement du taux de protéines. Les données du tableau 3 montrent également une diminution significative des quantités d'azote ingéré et excrété du régime 1 au régime 4 sans que les quantités d'azote fixé soient affectées, même si l'on note une légère tendance à la réduction. Il en résulte une augmentation significative du coefficient de rétention azotée.

Les données du tableau 4 (p 222) montrent que les quantités de chaleur liées à l'activité physique et la production de chaleur à jeun des animaux n'ont pas été affectées par le régime. En revanche, la production de chaleur totale ou pour une activité physique nulle est significativement réduite avec l'abaissement du taux de protéines. L'effet est le plus marqué lorsque les données sont ajustées pour une même EN ingérée. Cette diminution de la production de chaleur est à associer à la réduction de l'effet thermique de l'aliment, même si celle-ci n'est pas significative. Il en résulte une augmentation des quantités d'énergie retenue sous forme de lipides. Cet effet n'est toutefois plus significatif lorsque les données sont ajustées pour une même EN ingérée. Le quotient respiratoire augmente significativement lors du remplacement partiel des protéines par de l'amidon. Les résultats du tableau 4 (p 222) montrent enfin que la hiérarchie entre régimes pour leurs valeurs énergétiques est inversée lorsque l'on passe de l'expression en ED à l'expression en EN. De plus, pour les régimes à basse teneur en protéines, la valeur EN mesurée est légèrement plus élevée que la valeur EN estimée.

2.2. Essais 2 et 3

Dans l'essai 3, la fréquence de distribution des repas (2 vs 7) n'a pas affecté les critères mesurés dans l'expérience, tant pour ce qui concerne l'utilisation digestive, le bilan d'azote ou l'utilisation de l'énergie. Seuls les résultats moyens par régime seront donc présentés dans les tableaux 5 (p 223) et 6 (p 224). Dans les 2 essais, les animaux affectés au régime 2 étaient plus légers d'environ 3 kg; ils ont en conséquence

Tableau 3 - Effet de la teneur en protéines du régime sur les performances des animaux, les coefficients d'utilisation digestive (CUD) des nutriments et de l'énergie et le bilan d'azote (essai 1; n=6, 5, 5, 6 animaux respectivement pour les régimes 1, 2, 3 et 4)

Régimes	1	2	3	4	ETR	Effet (1)
Poids vif moyen, kg	65,2	65,9	65,5	65,2	2,0	
Matière sèche ingérée, g/j	2012	2024	2044	1980	74	
CUD des nutriments, % (2)						
Matière sèche	90,0	90,3	90,4	90,9	0,6	
Matière organique	92,0	92,2	92,4	92,7	0,5	
Matières azotées	91,5a	91,2a	90,0ab	89,4b	1,2	R*
Matières grasses (3)	63	66	66	68	-	-
Cellulose brute (3)	51	50	54	54	-	-
Énergie	90,7	91,0	91,0	91,5	0,7	
Énergie du méthane, % ED (3)	0,70	0,46	0,60	0,50	-	-
Énergie des urines, % ED	3,80a	3,32b	2,87c	2,27d	0,2	R**
Bilan d'azote (4)						
Azote ingéré, g/j	69,7a	61,8b	54,6c	44,7d	2,0	R**
Azote excrété, g/j	37,0a	31,1b	24,8c	15,7d	2,0	R**
Azote fixé, g/j	32,8	30,7	29,8	29,0	2,6	
Coefficient de rétention azotée	0,51a	0,54a	0,61b	0,72c	0,04	R**

(1) Significations statistiques: analyse de variance selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R). Niveau de signification : ns : $P > 0,05$; * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$. Des indices différents sont attribués aux moyennes lorsqu'elles sont significativement différentes ($P < 0,05$). ETR: Ecart type résiduel

(2) CUD = Coefficient d'Utilisation Digestive

(3) La cellulose brute et les matières grasses ont été analysées sur des fèces poolées par régime et l'énergie du méthane correspond à une valeur moyenne pour chaque régime ; l'analyse statistique n'a donc pu être réalisée sur ces données

(4) Azote excrété = azote des fèces + azote des urines + azote évaporé; azote fixé = azote ingéré - azote excrété; coefficient de rétention azotée = azote retenu / (azote ingéré - azote des fèces)

reçu moins d'aliment (g/j) (tableau 5, p 223). Les données du tableau 5, en particulier pour l'essai 3, confirment la diminution du CUD des matières azotées et l'augmentation des CUD de la matière sèche, de la matière organique et de l'énergie avec la diminution du taux de protéines. Dans les 2 essais, les quantités d'énergie perdues sous forme de méthane et d'urines (% ED) sont plus faibles pour le régime 2. Les résultats du bilan d'azote sont conformes à ceux de l'essai 1 et montrent une diminution significative des quantités d'azote ingéré et excrété avec l'abaissement du taux de protéines. En revanche, les quantités d'azote fixé diminuent significativement dans l'essai 2. Ce résultat n'est pas confirmé dans l'essai 3. Dans les 2 essais, le coefficient de rétention azotée augmente significativement avec la réduction du taux de protéines dans l'aliment.

Le tableau 6 (p 224) présente l'effet du taux de protéines et de la fréquence des repas sur l'utilisation de l'énergie. Conformément aux résultats de l'essai 1, la production de chaleur due à l'activité physique et la production de chaleur à jeun des animaux n'ont pas été affectées par le traitement. De même, l'abaissement du taux de protéines se traduit par une diminution significative de la production de chaleur totale ou exprimée relativement à l'EM ingérée. Pour une même EN ingérée et une activité physique nulle, les 2 essais mettent

en évidence une réduction de la production de chaleur avec la diminution du taux de protéines. Ils confirment également que cet effet est imputable à une réduction de l'effet thermique de l'aliment. Il s'ensuit, comme pour l'essai 1, une augmentation significative des quantités d'énergie retenue sous forme de lipides avec la diminution du taux de protéines. Le quotient respiratoire augmente significativement du régime 1 au régime 2. Les résultats des essais 2 et 3 confirment enfin que la diminution du taux de protéines se traduit par une augmentation significative de la valeur EN de l'aliment.

3. DISCUSSION

Les régimes de l'essai 1 étaient des formules expérimentales, comportant à la fois des matières premières atypiques en nutrition animale et des acides aminés non disponibles à des prix acceptables (valine et isoleucine) (tableau 1 p 219). Toutefois, ces régimes montrent qu'une diminution du taux de protéines d'environ 6,5 points, conduit à diviser par plus de 2 les rejets d'azote (tableaux 2 et 3). Les essais 2 et 3 confirment, avec des formules pratiques, la possibilité de réduire les rejets d'azote d'environ 40%, conformément aux observations de DOURMAD et HENRY (1994). Cette diminu-

Tableau 4 - Effet de la teneur en protéines du régime sur l'utilisation de l'énergie
(essai 1; n=6, 5, 5, 6 animaux respectivement pour les régimes 1, 2, 3 et 4)

Régimes	1	2	3	4	ETR	Effet (1)
Poids vif moyen, kg (2)	67,6	67,5	67,3	67,1	2,2	
Bilan énergétique (3)						
ED	2,735	2,752	2,764	2,671	0,077	
EM	2,614	2,649	2,669	2,598	0,073	
Chaleur (4)	1,482a	1,462a	1,420ab	1,373b	0,062	R*
Énergie retenue	1,131a	1,187ab	1,249b	1,225b	0,056	R*
Protéines	0,394a	0,371ab	0,362b	0,350b	0,025	R*
Lipides	0,737a	0,816ab	0,888b	0,875b	0,064	R**
Chaleur liée à l'activité physique	0,207	0,237	0,212	0,200	0,038	
Quotient respiratoire	1,13a	1,16b	1,20c	1,19bc	0,02	R**
Chaleur à jeun (3)	0,793	0,785	0,762	0,782	0,053	
Chaleur, % EM ingérée	57,2a	55,6ab	53,5bc	53,1c	1,7	R**
Effet thermique de l'aliment, % EM ingérée	18,9	17,0	17,0	15,3	2,7	
Pour une même ED ingérée (3,5)						
Chaleur (4)	1,271a	1,226ab	1,193b	1,190b	0,043	R*
Énergie retenue	1,125a	1,188b	1,229bc	1,248c	0,042	R**
Pour une même ENg ingérée (3,6)						
Chaleur (4)	1,292a	1,231b	1,185bc	1,171c	0,043	R**
Énergie retenue	1,153	1,195	1,218	1,223	0,043	
Valeurs énergétiques						
ED, MJ/kg MS	16,84a	16,75ab	16,60b	16,60b	0,12	R**
EM, MJ/kg MS	16,08	16,12	16,02	16,14	0,12	
EN mesurée MJ/kg MS (7),	11,74	12,10	12,18	12,40	0,27	R**
EN mesurée/ED, % (7)	69,7a	72,2b	73,4bc	74,7c	1,6	R**
EN mesurée/ENg, % (7)	99,4	101,4	101,8	102,4	2,2	

(1) Voir tableau 3

(2) Poids vif moyen sur la période en chambre respiratoire

(3) En MJ/jour/kg PV^{0,60}

(4) Chaleur = 3,866 x O₂ cons. (l.) + 1,2 x CO₂ prod. (l.) - 0,518 x CH₄ (l.) - 1,4317 x azote urinaire (g)

(5) Données corrigées pour une activité nulle et ajustées par analyse de covariance pour une énergie digestible ingérée de 2,507 MJ/jour/kg PV^{0,60}, selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R)

(6) Données corrigées pour une activité nulle et ajustées par analyse de covariance pour une énergie nette (ENg) ingérée de 1,796 MJ/jour/kg PV^{0,60}, selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R). ENg est égal à la moyenne des valeurs énergétiques nettes calculées selon les équations ENg2, ENg4 et ENg7 établies par Noblet et al. (1994) corrigée pour une activité nulle

(7) Pour une activité et une production de chaleur à jeun moyennes et égales aux moyennes de l'essai, soit respectivement 0,213 et 0,780 MJ/jour/kg PV^{0,60}

EN mesurée, MJ/kg=(0,780 x PV^{0,60} + énergie retenue, MJ/j)/ Matière sèche ingérée, kg/j

tion représente environ 10 % par point de réduction du taux de protéines pour nos 3 essais. Un chiffre similaire est proposé par CANH et al (1998). La réduction de la rétention azotée avec la diminution du taux de protéines, observée surtout dans l'essai 2, serait imputable à la technique utilisée. En effet, la technique des bilans sous-estime les rejets d'azote et donc surestime la rétention azotée, l'erreur étant d'autant plus importante que le taux de protéines dans l'aliment est élevé (QUINIOU et al, 1995). De façon plus générale, nos essais tout comme ceux de DOURMAD et HENRY (1994) ou CANH et al (1998) montrent que les techniques

de supplémentation en acides aminés industriels actuellement disponibles permettent de réduire le taux de protéines dans l'aliment de 3 à 4 points sans affecter le dépôt de protéines et, par voie de conséquence, la croissance musculaire et pondérale du porc. Les 3 essais confirment également que l'abaissement du taux de protéines dans l'aliment permet une première épargne d'énergie liée à la diminution de l'excrétion azotée. L'exploitation des résultats de teneurs en azote et en énergie brute effectuées sur les échantillons d'urines des 3 essais montre que l'énergie correspondant à un gramme d'azote excrété représente en moyenne 51 kJ

Tableau 5 - Effet de la teneur en protéines du régime et de la fréquence d'alimentation sur les performances des animaux, les coefficients d'utilisation digestive (CUD) des nutriments et de l'énergie et le bilan d'azote (essai 2: n=5 animaux/régime; essai 3: n=13 animaux pour le régime 1 et 12 pour le régime 2)

Régimes	Essai 2 (1)				Essai 3 (2)			
	1	2	ETR	Effet	1	2	ETR	Effet
Poids vif moyen, kg	64,0	60,8	1,7	R*	63,6	60,7	2,1	R**
Matière sèche ingérée, g/j	1953	1835	34	R**	1896	1871	13	R**
CUD des nutriments, % (3)								
Matière Sèche	89,8	90,1	1,0		89,1	90,2	0,7	R**
Matière Organique	91,8	91,9	0,9		91,1	92,1	0,6	R**
Matières Azotées	89,8	88,7	1,6		88,2	89,4	0,7	R**
Matières Grasses (3)	70	68	-		72	71	-	
Cellulose Brute (3)	62	51	-		54	49	-	
Énergie	90,5	90,4	1,1		89,6	90,7	0,7	R**
Énergie du méthane, % ED (4)	0,72	0,41	-		0,61	0,51	-	
Énergie des urines, % ED	3,79	2,85	0,2	R**	3,80	2,77	0,2	R**
Bilan d'azote (5)								
Azote ingéré, g/j	62,4	46,7	0,9	R**	60,6	47,6	0,4	R**
Azote excrété, g/j	33,2	20,5	1,8	R**	34,5	21,2	1,7	R**
Azote retenu, g/j	29,2	26,2	1,4	R*	26,1	26,5	1,6	
Coefficient de rétention azotée	0,52	0,63	0,03	R**	0,49	0,62	0,03	R**

(1) Significations statistiques: analyse de variance sur les deux traitements selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R) et l'effet du Bloc (B). Niveau de signification : * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$. Des indices différents sont attribués aux moyennes lorsqu'elles sont significativement différentes ($P < 0,05$). ETR: Ecart type résiduel

(2) Significations statistiques: analyse de variance sur les quatre traitements selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R), l'effet du Bloc (B), l'effet de la fréquence (F) et l'interaction (RxF). Niveau de signification : * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$. Des indices différents sont attribués aux moyennes lorsqu'elles sont significativement différentes ($P < 0,05$). ETR: Ecart type résiduel

(3) CUD = Coefficient d'Utilisation Digestive

(4) La cellulose brute et les matières grasses ont été analysées sur des fèces poolées par régime et l'énergie du méthane correspond à une valeur moyenne pour chaque régime, l'analyse statistique n'a donc pu être réalisée sur ces données

(5) Azote évaporé = azote des "condensats" + "azote air"; Azote excrété = azote des fèces + azote des urines + azote évaporé; Azote fixé = azote ingéré - azote excrété; Coefficient de rétention azotée = azote retenu / (azote ingéré - azote excrété)

mais cette valeur augmente significativement avec l'abaissement du taux de protéines (42 et 71 kJ/g d'azote pour les régimes 1 et 4 de l'essai 1). En fait, l'augmentation de l'excrétion d'énergie dans les urines est, pour un stade physiologique donné et des apports équilibrés en acides aminés, directement dépendante de la quantité d'azote dans l'aliment. Une analyse portant sur les données des 3 essais (n=58) montre alors que l'énergie perdue dans les urines s'accroît de 3,5 kJ par gramme supplémentaire de matières azotées totales dans l'aliment.

Dans les 3 essais, la réduction du taux de protéines était accompagnée d'une diminution de la production de chaleur des animaux et de l'effet thermique de l'aliment. Ce résultat est en accord avec le rendement d'utilisation de l'EM plus faible pour les matières azotées que pour l'amidon (NOBLET et al, 1994). Une analyse de covariance de la production de chaleur (pour une activité physique nulle) effectuée sur les 3 essais et prenant en compte les quantités d'EM et d'azote ingéré montre alors que la production de chaleur s'accroît d'environ 7 kJ par gramme de protéines supplémentaires

ingérées. Nos résultats confirment par ailleurs que le système ED ne permet pas de prédire précisément les quantités d'énergie retenue par les animaux (tableaux 4 et 6). En revanche, le système EN prend en compte la meilleure utilisation de l'énergie apportée par les régimes à basse teneur en protéines et permet ainsi de mieux prédire l'énergie réellement disponible pour l'animal. Le rapport des valeurs EN mesurées sur les valeurs EN estimées selon NOBLET et al (1994) est proche de 100%, ce qui confirme la fiabilité des équations de prédiction de la valeur EN des aliments. Toutefois, nous mettons en évidence, en particulier dans l'essai 2, une tendance des équations du système EN à sous-estimer la valeur EN des régimes pour lesquels le taux de protéines dans l'aliment est abaissé.

Les résultats de l'essai 3 montrent que l'utilisation de l'azote et de l'énergie apportées par les formules à basse teneur en protéines n'est pas différente lorsque l'on compare la fréquence 2 repas/jour à une alimentation à volonté. La vitesse d'absorption plus rapide des acides aminés libres n'est donc pas un facteur limitant de l'utilisation des régimes fortement

Tableau 6 - Effet de la teneur en protéines du régime et de la fréquence d'alimentation sur l'utilisation de l'énergie (essai 2: n=5 animaux/régime; essai 3: n=13 animaux pour le régime 1 et 12 pour le régime 2)

Régimes	Essai 2 (1)				Essai 3 (2)			
	1	2	ETR	Effet	1	2	ETR	Effet
Poids vif moyen , kg (3)	65,8	62,8	1,5	R*	65,2	62,5	2,2	R*
Bilan énergétique (4)								
ED	2,608	2,536	0,039	R*	2,543	2,591	0,069	
EM	2,490	2,454	0,040		2,431	2,506	0,065	R*
Chaleur (5)	1,470	1,388	0,023	R**	1,379	1,342	0,032	R*
Énergie Retenue	1,019	1,066	0,028	R(0,06)	1,051	1,164	0,071	R**
Protéines	0,354	0,330	0,022		0,320	0,331	0,018	
Lipides	0,666	0,736	0,012	R**	0,732	0,833	0,074	R**
Chaleur liée à l'activité physique	0,227	0,201	0,037		0,200	0,187	0,019	
Quotient Respiratoire	1,11	1,14	0,01	R**	1,13	1,17	0,03	R**
Chaleur à jeun (4)	0,784	0,757	0,017		0,750	0,760	0,040	
Chaleur , % EM ingérée	59,6	56,7	1,0	R**	57,4	54,1	1,8	R**
Effet thermique de l'aliment , % EM ingérée	19,0	17,7	2,0		18,3	16,3	0,8	R**
Pour une même ED ingérée (4,6)								
Chaleur (5)	1,230	1,200	0,014	R(0,05)	1,183	1,153	0,040	
Énergie retenue	1,012	1,073	0,018	R*	1,074	1,132	0,040	R**
Pour une même ENg ingérée (4,7)								
Chaleur (5)	1,253	1,178	0,016	R**	1,186	1,150	0,040	
Énergie retenue	1,025	1,061	0,017	R(0,05)	1,100	1,103	0,040	
Valeurs énergétiques								
ED, MJ/kg MS	16,47	16,40	0,20		16,31	16,45	0,13	R*
EM, MJ/kg MS	15,73	15,87	0,17		15,59	15,91	0,13	R**
EN mesurée, MJ/kg MS (8)	11,32	11,76	0,27	R(0,06)	11,63	12,15	0,29	R**
EN mesurée/ED, % (8)	68,7	71,7	1,2	R*	71,3	73,8	1,4	R**
EN mesurée/ENg, % (8)	97,7	98,8	1,7		100,9	101,7	2,1	

(1,2), Voir tableau 5

(3) Poids vif moyen sur la période en chambre respiratoire

(4) En MJ/jour/kg PV^{0,60}

(5) $HP = 3,866 \times O_2 \text{ cons. (l.)} + 1,2 \times CO_2 \text{ prod. (l.)} - 0,518 \times CH_4 \text{ (l.)} - 1,4317 \times \text{azote urinaire (g)}$

(6) Données corrigées pour une activité nulle et ajustées par analyse de covariance pour une énergie digestible ingérée de 2,349 MJ/jour/kg PV^{0,60} pour l'essai 2 et de 2,361 MJ/jour/kg PV^{0,60} pour l'essai 3, selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R) et l'effet du bloc (B) pour l'essai 2 et l'effet régime (R) pour l'essai 3

(7) Données corrigées pour une activité nulle et ajustées par analyse de covariance pour une énergie nette (Eng) de 1,678 MJ/jour/kg PV^{0,60} pour l'essai 2 et de 1,691 MJ/jour/kg PV^{0,60} pour l'essai 3, selon le modèle prenant en compte l'effet du régime (R) et l'effet du bloc (B) pour l'essai 2 et l'effet régime (R) pour l'essai 3. ENg est égal à la moyenne des valeurs énergétiques nettes calculées selon les équations ENg2, ENg4, ENg7 établies par Noblet et al. (1994) corrigée pour une activité nulle

(8) Pour une activité et une production de chaleur à jeun moyennes égales aux moyennes de chaque essai, soit respectivement 0,212 et 0,760 MJ/jour/kg PV^{0,60} pour l'essai 2, 0,192 et 0,755 MJ/jour/kg PV^{0,60} pour l'essai 3; EN mesurée, MJ/kg = (0,760 ou 0,755 x PV^{0,60} + énergie retenue, MJ/j) / Matière Sèche Ingérée, kg/j

supplémentés, dès lors qu'ils sont distribués au moins en 2 repas/jour.

CONCLUSION

Nos résultats confirment que réduire le taux de protéines dans l'aliment, tout en supplémentant en acides aminés industriels, permet de diminuer de manière importante les

rejets d'azote sans affecter les performances des animaux. La marge de diminution est directement dépendante du nombre d'acides aminés indispensables qui seront utilisables en pratique. L'abaissement du taux de protéines se traduit également par une amélioration de l'utilisation de l'énergie de l'aliment et, en particulier, par une diminution de la production de chaleur des animaux et un accroissement de l'énergie disponible pour le dépôt de lipides. Ces résultats sont en accord avec les données du système EN. Il en résulte

que la formulation des régimes à basse teneur en protéines doit être faite sur la base de leur teneur en EN et de rapports optimaux entre les acides aminés indispensables et la teneur en EN si l'on souhaite prévenir les conséquences négatives sur le dépôt de lipides et l'engraissement excessif des carcasses. Nous avons également pu montrer qu'à partir de 2 repas par jour, la fréquence de distribution est sans effet

sur l'utilisation de l'azote et de l'énergie des régimes à basse teneur en protéines.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient DEGUSSA-HÜLS AG et EURO-LYSINE S.A. pour leur soutien financier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATTERHAM E.S., BAYLEY H.S., 1989. *Br. J. Nutr.*, 62, 647-655.
- BOURDON D., DOURMAD J.Y., HENRY Y., 1995. *Journées Rech. Porcine en France*, 27, 269-278.
- CANH T.T., AARNINK A.J.A., SCHUTTE J.B. et al, 1998. *Livest. Prod. Sci.*, 56, 181-191.
- DOURMAD J.Y., HENRY Y., 1994. *Prod. Anim.*, 7, 263-274.
- HENRY Y., 1993. *Prod. Anim.*, 6, 199-212.
- JONDREVILLE C., GÂTEL F., GROSJEAN F., CALLU P., BRINET, 1995. *Journées Rech. Porcine en France*, 27, 279-284.
- NOBLET J., HENRY Y., DUBOIS S., 1987. *J. Anim. Sci.*, 65, 717-726.
- NOBLET J., FORTUNE H., DUBOIS S., HENRY Y., 1989. *Nouvelles bases d'estimation des teneurs en énergie digestible métabolisable et nette des aliments pour le porc*. INRA éd., Paris.
- NOBLET J., SHI X.S., DUBOIS S., 1993. *Br. J. Nutr.*, 70, 407-419.
- NOBLET J., SHI X.S., FORTUNE H. et al, 1994. *Journées Rech. Porcine en France*, 26, 235-250.
- NOBLET J., KARÉGÉ C., DUBOIS S., Van MILGEN J., 1999. *J. Anim. Sci.*, 77, 1208-1216.
- QUINIQU N., DUBOIS S., NOBLET J., 1995. *Livest. Prod. Sci.*, 41, 51-61.
- QUINIQU N., NOBLET J., DUBOIS S., 1999. *Livest. Prod. Sci.*, (sous presse)
- Van MILGEN J., NOBLET J., DUBOIS S., BERNIER J.F., 1997. *Br. J. Nutr.*, 78, 397-410.
- Van MILGEN J., NOBLET J., DUBOIS S., 2000. *Journées Rech. Porcine en France*, 32, 225-240.