

Influence du niveau de phosphore des aliments sur les performances zootechniques et la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer et zinc chez le porc de 20 à 100 kg de poids vif

Candido POMAR (1), Catherine JONDREVILLE, (2), Jean-Yves DOURMAD (2) et Jean BERNIER (3)

(1) Agriculture et agroalimentaire Canada, C.P 90, Lennoxville, Québec, J1M 1Z3 Canada

(2) INRA UMR SENAH, 35590 Saint-Gilles

(3) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, Québec, G1K 7P4 Canada

pomarc@agr.gc.ca

Influence du niveau de phosphore des aliments sur les performances zootechniques et la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer et zinc chez le porc de 20 à 100 kg de poids vif

L'influence du niveau de phosphore (P) alimentaire sur les performances zootechniques et la rétention corporelle minérale a été étudiée sur 50 porcs entre 20 à 100 kg de poids vif. Les aliments ont été formulés pour satisfaire les besoins en nutriments, autre que le P, pendant des phases d'alimentation débutant à 20, 40 et 70 kg de poids vif. Cinq aliments ont été formulés pour chacune de ces phases avec des niveaux de P de 60, 80, 100, 120 et 140% des besoins estimés. Cependant, les performances des porcs ont été supérieures aux valeurs attendues, en particulier pendant la première phase d'alimentation. Selon ces performances, les apports de P du traitement contenant le plus de P seraient légèrement supérieurs aux besoins calculés. Malgré cette sous-alimentation en P, le gain de poids, la consommation volontaire, l'efficacité alimentaire et le gain de protéines et lipides n'ont pas été affectés ($P > 0,05$) par le niveau de P alimentaire. Par contre, le P retenu a augmenté linéairement ($P < 0,0001$) entre 3,4 à 5,3 g/kg de gain et la résistance à la rupture des tibias entre 3,7 et 6,0 kN. Conséquemment, le niveau optimal de P alimentaire peut être établi en fonction de la fragilité des os et des rejets de P souhaités. Par ailleurs, l'utilisation d'une quantité fixe de P retenu par unité de gain de poids dans la méthode du bilan simplifié doit être reconsidérée lorsque l'apport de P digestible dans l'aliment est réduit pour limiter son excrétion.

Effect of dietary phosphorus concentration on pigs' performance and the body retention of calcium, phosphorus, potassium, sodium, magnesium, iron and zinc of 20 to 100 kg of live weight pigs

The effect of reducing dietary phosphorus (P) concentration on pigs' growth performance and body mineral retention was studied on 50 pigs between 20 to 100 kg live weight (LW). Diets were formulated to satisfy the requirements of nutrients, other than the P, during the feeding phases beginning at 20, 40 and 70 kg LW. Five diets were formulated for each one of these feeding phases with levels of P being 60, 80, 100, 120 and 140% the estimated P requirements. However, pig performances were higher than expected, in particular during the first feeding phase. According to these performances, the treatment containing more dietary P had slightly higher P than the calculated requirements. In spite of this under P supply, body weight gain, voluntary feed intake, feed efficiency, and protein and lipid retention rates were not affected ($P > 0.05$) by dietary P concentration. Additionally, P retention increased linearly ($P < 0.0001$) between 3.4 to 5.3 g/kg of gain and tibiae breaking strength between 3.7 and 6.0 kN. Thus, the optimal dietary P concentration can be established according to bone fragility and the desired P excretion. Also, the use of a fixed amount of retained P per unit of weight gain in the simplified balance method used to estimate farms' P excretion must be reconsidered when dietary digestible P is under supplied to minimise its excretion.

INTRODUCTION

La diminution des rejets des nutriments pouvant devenir des polluants et la limitation de l'utilisation des ressources non renouvelables sont des composantes essentielles d'une production durable de porc (Jondreville et Dourmad, 2005). L'excrétion de certains nutriments, dont l'azote (N) et un nombre important de minéraux, dépend de la quantité ingérée de ces nutriments, de leur disponibilité et de l'adéquation entre les apports et les besoins des animaux (Jongbloed et Lenis, 1992). Pour minimiser les rejets il devient donc essentiel de bien connaître la teneur nutritionnelle des matières premières, d'améliorer leur digestibilité, de bien définir les besoins et d'ajuster avec précision les apports nutritionnels des aliments à ces besoins (Pomar et al., 1996).

En Europe, la valeur phosphore (P) des aliments et les besoins des animaux sont exprimés en s'appuyant sur le concept de digestibilité apparente (Jongbloed et al., 1999 ; CVB 2000 ; INRA-AFZ 2004; Jondreville et Dourmad, 2005) alors que la disponibilité métabolique (Kornegay, 2001 ; NRC, 1998 ; Knowlton et al., 2004) est utilisée dans d'autres pays. Dans la méthode factorielle, le besoin en P digestible apparent de l'animal correspond à la somme des besoins d'entretien (incluant les pertes endogènes minimales urinaires de P, mais excluant les pertes endogènes fécales) et de croissance. Les besoins quotidiens pour la croissance sont calculés à partir de la teneur en P du gain de poids, elle-même estimée à partir de la teneur corporelle en P selon le poids de l'animal (Jongbloed et al., 1999 ; Jondreville et Dourmad, 2005). Néanmoins, peu d'études ont évalué la rétention de P des porcs en croissance lorsque ceux-ci sont alimentés avec des niveaux de P suboptimums. Le but de cette étude était donc d'évaluer l'influence du niveau de phosphore des aliments sur la performance zootechnique et la rétention corporelle de Ca, P, K, Na, Mg, Fe et Zn chez le porc de 20 à 100 kg de poids vif.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Aliments

Tous les aliments ont été formulés pour satisfaire les besoins en énergie nette, acides aminés digestibles, vitamines et minéraux, autres que le P, des porcs (NRC, 1998) au début des phases d'alimentation débutant à 20, 40 et 70 kg de poids vif (PV). Cinq aliments ont été formulés pour chacune des phases d'alimentation en modifiant les apports de phosphore inorganique afin que les aliments contiennent des niveaux de P très bas (TB), bas (B), témoin (T), haut (H) et très haut (TH). Ces niveaux représentent 60, 80, 100, 120 et 140 % des besoins estimés des porcs pour chaque intervalle (Tableau 1). Le niveau du Ca a été ajusté pour que le ratio Ca/P total soit proche de 1,3. Les besoins en P digestible ont été estimés à respectivement 2,6 ; 2,2 et 1,9 g / kg d'aliment au début de chaque phase d'alimentation en utilisant les équations de Jondreville et Dourmad (2005) avec des indices de consommation de respectivement 2,2 ; 2,6 et 3,1. La phytase microbienne n'a pas été ajoutée aux aliments pour diminuer les sources de variation non contrôlées de la digestibilité de P (Jean dit Bailleul et al., 2001). Le maïs et le

tourteau de soja ont été utilisés comme ingrédients principaux. Le blé a été incorporé au taux fixe de 10 % pour assurer une bonne qualité des granulés. La lysine industrielle a été incorporée pour améliorer la qualité de la protéine.

1.2. Animaux et procédure expérimentale

Soixante-deux mâles castrés d'approximativement 7 kg de poids vif ont été sélectionnés au sevrage et transportés au centre de recherche. Dès leur arrivée et pendant toute l'expérience les porcelets ont été nourris et abreuvés à volonté. Une semaine avant le début de l'expérience, au poids vif d'environ 20 kg, 12 porcelets ont été abattus afin de déterminer la composition corporelle initiale. Les 50 porcelets restants ont été placés dans des cages individuelles et assignés aux traitements de façon aléatoire. Les porcelets ont été nourris chaque jour et les refus mesurés une fois par semaine. Les aliments ont été changés à 28 jours d'intervalle aux poids vifs approximatifs de 40 et 70 kg. Le poids et les épaisseurs du gras et muscle dorsaux ont été mesurés au début et à la fin de l'expérimentation ainsi qu'aux changements d'aliment. L'expérimentation a pris fin au jour 85.

1.3. Composition chimique corporelle et des os

À la fin de l'expérimentation, après 12 h de jeûne, les porcs ont été abattus et éviscérés. Le tibia et le péroné de la patte avant droite ont été prélevés. Le contenu du système digestif et des vésicules a été vidé et les viscères incluant le sang et les carcasses non épilées ont été congelés à -15°C. Les viscères et carcasses ont ensuite été broyés ensemble et un échantillon représentatif a été prélevé pour la détermination de la matière sèche (MS), des protéines, des lipides, des cendres et de Ca, P, K, Na, Mg, Fe et Zn. Les dimensions des tibias ainsi que leur résistance à la rupture (Instron Universal Testing Machine, model 4201, Instron Corp., Canton MA) ont été mesurés. La force maximale de cisaillement de cet appareil était de 6 kN. La composition chimique (cendres, Ca, P, K, Na, Mg, Fe, Zn et Cu) de l'ensemble tibia-péroné de chaque porc a été obtenue après incinération. Tous les minéraux ont été mesurés par spectrométrie d'absorption atomique.

1.4. Essai de digestibilité

Dix-huit mâles castrés de caractéristiques similaires aux animaux de l'essai de croissance ont été élevés en groupe et alimentés avec les aliments du traitement H jusqu'au poids approximatif de 40 kg. À ce poids, les animaux ont été placés dans des cages individuelles permettant la collecte séparée des fèces et urines. Seuls les aliments formulés pour les traitements TB, T et TH pour l'intervalle d'alimentation 40-70 kg ont été utilisés dans cet essai. Les animaux ont été assignés aléatoirement aux traitements. Les animaux ont été nourris deux fois par jour, l'eau et la nourriture étant offertes à volonté. La consommation d'aliment a été mesurée tous les jours alors que les fèces et les urines ont été collectées deux fois par jour entre les jours 16 et 21 de l'essai, inclusivement. L'urine collectée était maintenue à un pH inférieur à 3 avec l'ajout de H₂SO₄ 0,5 M. Après homogénéisation, 10 %

Tableau 1 - Composition des aliments expérimentaux^a

	Poids vif (kg) au début des phases d'alimentation																	
	20						40						70					
	Très bas (TB)	Bas (B)	Témoin (T)	Haut (H)	Très haut (TH)		Très bas (TB)	Bas (B)	Témoin (T)	Haut (H)	Très haut (TH)		Très bas (TB)	Bas (B)	Témoin (T)	Haut (H)	Très haut (TH)	
Matières premières (g/kg)																		
Blé	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Maïs	570,0	559,0	548,0	538,0	526,0		686,0	674,0	665,0	656,0	647,0		797,0	786,0	780,0	772,0	763,0	
Tourteau de soja	307,0	309,0	311,0	313,0	315,0		195,0	197,0	198,0	200,0	202,0		84,0	86,0	87,0	88,0	90,0	
Gras animal	5,0	8,5	12,5	16,5	20,5		6,0	9,5	12,5	16,0				5,0	6,5	9,5		
Pierre à chaud (38 % Ca)	4,5	6,9	9,6	12,0	14,6		4,8	7,0	9,1	11,4	13,3		4,1	6,0	7,5	9,3	11,2	
P. ^{ate} bicalcique (24 % Ca, 18,5 % P)	2,0	5,0	7,0	9,0	12,0		2,0	4,0	6,0	8,0	10,0		2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	
Lysine HCl (98 %)							0,9	0,9	0,8	0,8	0,8		1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	
Choline 60 (51.7 %)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
Sel	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
Premis minéral ^b	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
Composition chimique (g/kg)																		
Matière sèche	874,0	881,5	883,9	889,0	888,7		875,5	866,7	867,9	901,2	881,0		871,7	878,0	881,5	903,3	874,7	
Énergie brute (Mcal/kg)	4,39	4,36	4,34	4,34	4,31		4,41	4,39	4,45	4,39	4,29		4,36	4,35	4,35	4,33	4,35	
Énergie digestible (Mcal/kg) ^c	3,48	3,47	3,47	3,48	3,47		3,46	3,48	3,48	3,47	3,48		3,47	3,48	3,48	3,47	3,47	
Protéine brute	194,5	191,6	195,3	213,3	185,7		151,8	161,4	157,3	171,4	159,5		112,3	112,1	115,6	125,1	119,9	
lysine digestible (l'éale apparente) ^c	9,4	9,4	9,4	9,5	9,5		7,4	7,4	7,4	7,4	7,4		5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	
Gras	35,7	37,5	37,5	36,9	51,9		39,9	42,5	52,6	50,5	46,2		41,5	46,8	45,1	43,1	62,8	
Cendres	45,0	49,3	52,2	49,9	65,3		36,9	42,5	46,7	42,7	51,0		32,4	35,3	38,0	34,1	44,3	
Ca	5,2	6,8	7,8	8,2	13,0		4,0	6,1	7,3	7,6	9,9		3,5	4,8	5,7	5,6	7,6	
P	4,1	4,7	5,1	5,7	6,0		4,3	4,8	5,2	5,1	5,7		3,8	4,2	4,5	4,5	5,4	
Phosphore disponible ^c	1,3	2,2	2,6	3,0	3,6		1,4	1,8	2,2	2,6	3,0		1,0	1,5	1,9	2,3	2,7	
Phosphore digestible ^c	1,4	1,8	2,0	2,3	2,7		1,2	1,5	1,7	2,0	2,3		1,1	1,4	1,6	1,9	2,1	
Cu	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2		0,1	0,1	0,2	0,1	0,2		0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	
Zn	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3		0,3	0,2	0,2	0,2	0,2		0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	
IK	5,2	5,0	5,2	5,4	5,2		4,3	4,4	4,5	4,4	4,3		3,1	3,1	3,1	3,0	3,2	
Na	2,4	2,9	2,8	2,1	2,7		2,5	2,4	2,6	2,2	2,4		2,4	2,0	1,6	2,0	2,3	
Mg	1,6	1,7	1,7	1,8	1,9		1,6	1,6	1,8	1,6	1,6		1,5	1,6	1,6	1,3	1,6	
Fe	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5		0,3	0,4	0,4	0,3	0,4		0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	
Activité phytasique (FTU/kg)	37	0	67	22	54		44	92	80	76	104		44	37	52	17	27	

^a Les mélanges ont été préparés avec 0,5 g/kg de Myco Curb (inhibiteur de moisissures), Kemin Industries, Inc., Des Moines, Iowa, USA.

^b Apporté par kg d'aliment : pour les aliments servis à partir de 20 kg de poids vif : vitamine A, 10497 IU ; vitamine D, 1049,7 IU ; vitamine E, 32 IU ; vitamine K (menadione), 0,81 mg ; vitamine B12, 0,03 mg ; acide folique, 0,21 mg ; niacine, 1,5 mg ; acide pantothénique, 11,8 mg ; pyridoxine, 0,93 mg ; riboflavine, 3,29 mg ; thiamine, 1,33 mg ; choline, 500 mg ; cuivre, 117 mg ; iode, 0,27 mg ; fer, 196,6 mg ; manganèse, 63,3 mg ; sélénium, 0,3 mg ; zinc, 140 mg. pour les aliments servis à partir de 40 kg de poids vif : vitamine A, 9300 IU ; vitamine D, 930 IU ; vitamine E, 28 IU ; vitamine K (menadione), 0,76 mg ; vitamine B12, 0,02 mg ; acide folique, 0,13 mg ; niacine, 13,4 mg ; acide pantothénique, 11,3 mg ; pyridoxine, 0,72 mg ; riboflavine, 3,05 mg ; thiamine, 1,2 mg ; choline, 460 mg ; cuivre, 110 mg ; iode, 0,25 mg ; fer, 178 mg ; manganèse, 54 mg ; sélénium, 0,3 mg ; zinc, 124 mg. pour les aliments servis à partir de 70 kg de poids vif : vitamine A, 9597 IU ; vitamine D, 960 IU ; vitamine E, 29 IU ; vitamine K (menadione), 0,77 mg ; manganèse, 54 mg ; sélénium, 0,3 mg ; zinc, 124 mg. pour les aliments servis à partir de 70 kg de poids vif : vitamine A, 9597 IU ; vitamine D, 960 IU ; vitamine E, 29 IU ; vitamine K (menadione), 0,77 mg ; manganèse, 54 mg ; sélénium, 0,3 mg ; zinc, 124 mg ; niacine, 13,8 mg ; acide pantothénique, 11,4 mg ; pyridoxine, 0,77 mg ; riboflavine, 3,11 mg ; thiamine, 1,23 mg ; choline, 420 mg ; cuivre, 112 mg ; iode, 0,26 mg ; fer, 183 mg ; manganèse, 56,3 mg ; sélénium, 0,3 mg ; zinc, 128 mg.

^c Valeurs calculées

des urines et 20 % des fèces journalières ont été congelées à -20°C. L'ensemble des collectes de fèces et urines de chaque porc ont été mélangées et un échantillon représentatif prélevé pour analyse chimique (MS, énergie brute, N, lipides, cendres, Ca, P, K, Na, Mg, Fe et Zn).

1.6. Analyses statistiques

Le rapport entre le poids vif vide (PVV) et le PV des porcs abattus à 20 et 100 kg a servi à estimer le PVV des porcs de l'essai de croissance. Des analyses de régression entre la teneur en eau, protéine, lipides, cendres et minéraux (Ca, P, K, Na, Mg, Fe et Zn) corporels et le PVV des porcs abattus à 20 kg ont été effectuées au moyen de la procédure REG de SAS (SAS, 2003). Elles ont servi à déterminer la composition corporelle des porcs au début de l'essai de croissance. Le gain moyen quotidien en protéines, lipides et minéraux des animaux a été calculé à partir de la composition corporelle finale mesurée et de la composition initiale estimée. Le coefficient de digestibilité fécal apparent (CDA) de la matière sèche, des protéines, de l'énergie et des minéraux a été calculé à partir des quantités de nutriments ingérés et excrétés dans les fèces. Les performances zootechniques et de la composition corporelle des porcs de l'essai de croissance et les données de digestibilité ont été analysées selon un dispositif complètement aléatoire. Les effets linéaire, quadratique et restant (cubique plus quartique) des traitements ont été évalués avec des contrastes orthogonaux au moyen de la procédure MIXED de SAS.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Aliments

Hormis pour le Ca et les protéines, les teneurs nutritionnelles des aliments mesurées sont, en général, proches des valeurs calculées à partir des tables de composition utilisées. Par contre, les aliments H contiennent légèrement plus de pro-

téines brutes qu'attendu alors que les niveaux de Ca excèdent de 0 à 35 % les teneurs calculées. Le ratio Ca/P oscille entre 0,9 et 2,2.

2.2. Essai de digestibilité

Les données d'un porcelet alimenté avec le régime TB ont été enlevées lors des analyses statistiques, car la teneur de plusieurs minéraux dans les fèces et urines a été considérée aberrante. Le poids, la consommation d'aliment et le gain de poids des animaux étaient comparables entre les traitements (Tableau 2) et comparables à ceux observés pendant l'essai de croissance.

Les CDA des nutriments étudiés dans cette expérimentation ne diffèrent pas entre les aliments TB, T et TH ($P > 0,05$) et ce malgré le niveau croissant d'incorporation du P et du Ca de ces nutriments. Les CDA moyens de ces minéraux sont, respectivement de 44 et 56 %.

L'augmentation de la teneur en P de l'aliment a été obtenue par l'accroissement du taux d'incorporation du phosphate bicalcique qui était de respectivement de 2, 6 et 10 % dans les aliments TB, T et TH. Les CDA de P attendus de ces mélanges étaient de 34, 40 et 44 %, respectivement (INRA-AFZ, 2004). Cette augmentation de la digestibilité qui reflète la contribution croissante du P provenant du phosphate bicalcique au P total dans l'aliment n'a donc pas été observée dans notre essai. La teneur en P digestible des aliments TB, T et TH était de respectivement 1,9 ; 2,2 et 2,6 g / kg. La mise en oeuvre de régulations des sécrétions endogènes et de l'absorption de P liées à une couverture variable du besoin en P des animaux pourrait expliquer l'absence d'augmentation de la digestibilité de P avec l'augmentation de la teneur en P de l'aliment (Jondreville et Dourmad, 2005). De plus, compte tenu du contrôle homéostatique commun de P et de Ca (Crenshaw, 2001 ; Létourneau-Montminy, 2005), il est possible que la faible teneur en Ca de l'aliment TB ait

Tableau 2 - Digestibilité fécale apparente des aliments formulés pour les porcs de 40-70 kg de poids vif avec des niveaux très bas (TB), témoin (T) et très élevés (TE) de phosphore alimentaire

Variables	Traitements alimentaires			SEM	Effet du traitement	
	Très bas (TB)	Témoin (T)	Très haut (TH)		Lin.	Quad.
n	5	6	6			
Poids vif initial, kg	46,7 ± 4,83	44,5 ± 5,23	44,6 ± 4,35			
Gain moyen quotidien, g/j	1,26 ± 0,22	1,21 ± 0,26	1,25 ± 0,21			
Consommation moyenne quotidienne, kg/j	2,03 ± 0,20	2,10 ± 0,12	2,01 ± 0,12			
Digestibilité fécale apparente (Lsmeans, %)						
Matière sèche	90,0	91,3	89,6	0,77	n.s.	n.s.
Protéine brute	81,7	84,0	83,1	1,45	n.s.	n.s.
Énergie brute	88,2	90,2	88,2	0,90	n.s.	< 0,10
Ca	61,5	54,3	53,5	5,26	n.s.	n.s.
P	43,6	42,5	44,8	3,28	n.s.	n.s.

entraîné une stimulation de l'absorption de P consécutive à la stimulation de l'absorption de Ca. La complexité des interactions existant entre les apports de Ca et de P peut difficilement être maîtrisée sans l'utilisation de méthodes numériques comme celle proposée par Létourneau-Montminy et al. (2006).

2.3. Essai de croissance

Quatre porcelets, deux TB, un B et un H ont été éliminés de l'expérimentation pour des raisons indépendantes des traitements expérimentaux. Par ailleurs, des problèmes de pattes associés au manque d'activité physique ont été observés occasionnellement mais ils ont été partiellement corrigés en permettant aux porcelets les plus affectés de sortir périodiquement de leurs parcs.

Les performances des porcs ont été supérieures aux valeurs attendues, en particulier pendant la première phase d'alimentation de l'essai (indice de consommation mesuré de 1,9 ; 2,5 et 3,0 contre des valeurs prévisionnelles de 2,2 ; 2,6 et 3,1). En se basant sur les performances observées, on peut calculer selon la méthode factorielle décrite par Jondreville et Dourmad (2005) que les apports de P digestible nécessaires à la couverture des besoins pour chacune des phases d'alimentation, sont de respectivement 2,9 ; 2,3 et 1,9 g/kg. Ces niveaux de P digestible n'ont été apportés par aucun traitement pendant la première phase d'alimentation, par le traitement TH dans la deuxième phase et par les traitements H et TH dans la troisième (Tableau 1). Néanmoins, lorsque les apports et les besoins sont calculés selon les recommandations du NRC (1998) les besoins en P disponible sont de 2,4 ; 1,9 et 1,6 g/kg, valeurs qui sont apportées par les aliments T des trois périodes de croissance, mais ces recommandations du NRC(1998) sont indépendantes du niveau de performance des animaux alors que ce dernier était particulièrement élevé dans notre étude. Pour les porcs de 20 kg de PV, ces recommandations sont inférieures aux 3,2 g/kg de P digestible proposé par Ekpe et al. (2002) ou les 3,2 g/kg de P disponible proposés par Fent et al. (2003).

Les principales composantes du poids vif vide de l'animal sont l'eau, les protéines, les lipides et les cendres, le corps ne contenant que des petites quantités d'hydrates de carbone emmagasinés sous la forme de glycogène dans le foie et les muscles (Whittemore, 1993). Dans cette expérimentation, l'addition des composantes principales citées ci dessus représente $98,4 \pm 0,23$ % du poids corporel, les 1,6 % manquants correspondant à la fraction lipidique qui n'est pas extraite par la méthode utilisée (Tableau 3). En début d'expérience, les porcelets pesaient $18,6 \pm 3,04$ kg et avaient $6,56 \pm 1,22$ mm de gras dorsal. Les porcelets assignés aux différents traitements étaient de poids et composition corporelle similaires ($P > 0,05$; données non présentées). Seule l'épaisseur du muscle dorsal tendait ($P < 0,067$) à être supérieure chez les porcs assignés au traitement H. Les teneurs moyennes en protéines, lipides et cendres corporelles s'élevaient respectivement à 16,3 ; 7,8 et 2,7 %, ce qui est en accord avec les valeurs habituelles de la bibliographie (Whittemore, 1993).

Le niveau de P dans les aliments n'a pas eu d'effet ($P > 0,05$) sur le poids final, sur l'épaisseur du muscle dorsal ou sur la teneur en composantes corporelles non minérales (eau, protéine et lipides). À la fin de cette expérimentation les teneurs corporelles moyennes en protéines et lipides était respectivement de 15,2 et 28,8 %, ce qui correspond à des porcs ayant un niveau d'engraissement moyen (Whittemore, 1993). Néanmoins, les porcelets alimentés avec des niveaux moyens de P avaient des épaisseurs de gras plus élevées que ceux des extrêmes (effet quadratique : $P = 0,04$). Outre l'épaisseur de gras, l'apport alimentaire de P a affecté les minéraux corporels. En effet, la quantité de cendres corporelles augmente linéairement ($P < 0,0001$) avec le niveau de P alimentaire. Les quantités corporelles de P, Ca, Mg et Zn augmentent de la même manière que les cendres (effet linéaire : $P < 0,0001$) quoique l'augmentation de la quantité de Ca soit légèrement moins marquée pour le niveau plus élevé de P alimentaire (effet quadratique : $P = 0,049$). D'autres minéraux (Na, K et Fe) n'ont pas été affectés par les traitements. Ainsi, la teneur corporelle finale en cendres est respectivement de 1,9 ; 2,3 ; 2,6 ; 2,7 et 2,9 % chez les porcs recevant les aliments TB, B, T, H et TH. La teneur de l'aliment en Ca s'élevait pour ces mêmes traitements à respectivement 0,61 ; 0,74 ; 0,88 ; 0,95 et 1,02 % tandis que la teneur en P était de 0,36 ; 0,41 ; 0,46 ; 0,49 et 0,52 %. L'augmentation de la quantité de cendres s'accompagne d'une augmentation du poids des os ($P = 0,016$) mais sans modification de leurs dimensions ($P > 0,05$). Parallèlement, la résistance à la rupture des tibias augmente linéairement ($P > 0,0001$) avec le niveau de P des aliments, passant de 3,7 kN pour le traitement TB à 6,0 kN pour le traitement TH qui a abouti aux os les plus durs. Il est néanmoins important de noter que la force de cisaillement de l'appareil utilisé était de 6 kN. Aucun des os provenant des porcs alimentés avec les aliments TH n'a pu être cassé et la valeur de 6 kN attribuée à ce traitement est vraisemblablement sous-estimée.

Dans la présente expérimentation le gain de poids, la consommation volontaire, l'efficacité alimentaire et le gain de protéines ou de lipides n'ont pas été affectés ($P > 0,05$) par le niveau de P dans les aliments (Tableau 4). Les valeurs moyennes de ces variables étant respectivement de 1,00 kg/j, 2,51 kg/j, 2,49 kg/kg, 150 g/j et 314 g/j. Ces résultats ne corroborent pas ceux de la littérature montrant une réponse curvilinéaire aux apports de P chez les jeunes porcs (Ekpe et al., 2002 ; Fent et al., 2003). Par contre la rétention de P augmente linéairement de 3,26 à 5,32 g/j, valeurs obtenues avec les traitements à plus faible et à plus haut niveau de P des aliments. Exprimée par rapport au gain de poids, la rétention de P était de 3,4 g/kg de gain pour le traitement à moindre apport de P et de 5,3 g/kg de gain pour le traitement ayant le plus haut niveau de P. En accord avec la bibliographie récente (Poulsen et al, 1999 ; Dourmad et al., 2002 ; Jondreville et al., 2004) la valeur de 5,3 g de P / kg de poids vif a été proposée par le CORPEN (2003).

CONCLUSION

Les résultats de cette expérimentation indiquent que de faibles apports alimentaires de Ca et de P aux porcs en croissance

Tableau 3 - Nombre d'animaux, épaisseurs du gras et muscle dorsaux, composition chimique corporelle et caractéristiques des os tibia et fibula lors de l'abattage des porcs à la fin de l'expérimentation

Variables	Apports de phosphore					SEM	Effet du traitement		
	Très bas (TB)	Bas (B)	Témoin (T)	Haut (H)	Très haut (TH)		Lin.	Quad.	Res.
n	8	9	10	9	10				
Poids vif, kg	98,8	103,3	101,9	106,2	104,1	3,3	n.s.	n.s.	n.s.
Épaisseur du gras dorsal, mm	16,8	19,3	21,4	20,1	18,8	1,5	n.s.	0,0403	n.s.
Épaisseur du muscle, mm	54,6	56,4	54,9	54,3	54,6	2,0	n.s.	n.s.	n.s.
Composition corporelle (g)									
Eau	52481	52163	50349	53375	52547	1397	n.s.	n.s.	n.s.
Protéine	15531	15499	15100	16236	15715	394	n.s.	n.s.	n.s.
Lipides	24319	28451	29188	28705	27999	1984	n.s.	n.s.	n.s.
Cendres	1892	2336	2606	2861	3027	105	<0,0001	n.s.	n.s.
Ca	609	762	895	1010	1063	31	<0,0001	0,0489	n.s.
P	360,7	419,5	464,4	510,2	537,1	14,0	<0,0001	n.s.	n.s.
Na	107,5	101,5	106,4	117,4	108,5	4,3	n.s.	n.s.	0,0553
Mg	23,9	26,6	28,3	31,1	31,8	0,8	<0,0001	n.s.	n.s.
K	128,2	123,5	121,5	129,4	128	4	n.s.	n.s.	n.s.
Fe	4,61	4,62	4,54	4,80	4,50	0,16	n.s.	n.s.	n.s.
Zn	1,96	2,00	2,13	2,24	2,28	0,06	<0,0001	n.s.	n.s.
Caractéristiques du tibia et fibula									
Poids, g	240	244	254	263	267	10	0,0163	n.s.	n.s.
Longueur, cm	16,9	17,0	16,8	17,1	17,2	0,3	n.s.	n.s.	n.s.
Circonférence, cm	7,2	7,2	7,2	7,4	7,4	0,1	n.s.	n.s.	n.s.
Résistance, kN	3,7	4,6	4,4	5,6	6,0	0,2	<0,0001	n.s.	0,0105

peuvent ne pas affecter leurs performances. Par exemple, les niveaux de P des aliments TB ont apporté en moyenne 54 % des besoins estimés par la méthode proposée par Jondreville et Dourmad (2005) ou 64 % des besoins estimés selon le NRC (1998). Par conséquent, les besoins de P et de Ca pour maximiser les performances sont inférieurs aux recommandations alimentaires actuelles. Cependant, la composition corporelle en minéraux et la dureté des os a été fortement affectée par les niveaux de P utilisés. Nous n'avons pas observé dans la présente étude de plafond de rétention minérale avec l'augmentation des teneurs en P et Ca de la ration. Ainsi, dans la perspective de maximiser la résistance des os les niveaux de Ca et de P à apporter devraient être supérieurs à ceux utilisés dans le traitement TH de cette expérimentation, ce qui représenterait des apports supérieures à 103 % des recommandations de Jondreville et Dourmad (2005) ou supérieures à 160 % de celles du NRC (1998). L'écart important observé avec les recommandations du NRC (1998) s'explique en partie par le niveau élevé des performances des animaux dans notre essai. Puisque les rejets de P augmentent avec son niveau d'incorporation dans les aliments, les résultats de cette expérimentation indiquent que le niveau optimal de Ca et P alimentaire devra être établi en fonction du risque de cassure des os et les rejets de P souhaités.

Selon les résultats de cette étude, la rétention de Ca et de P ne peuvent pas être considérées comme indépendantes de la composition des aliments puisque les os jouent un rôle important dans la modulation du métabolisme minéral. Par conséquent, la méthode simplifiée du bilan minéral, généralement utilisée pour estimer l'excrétion des minéraux chez le porc, peut ne pas être appropriée pour le P lorsque le P digestible n'est pas apporté à des niveaux permettant d'atteindre le niveau de minéralisation retenu pour le calcul du bilan, par exemple 5,3 g P par kg de gain de poids pour le Corpen (2003). En fait, cette méthode suppose que la rétention de P est constante par unité de gain de poids corporel. L'excrétion de P peut alors être estimée par soustraction entre les quantités de P ingérée et retenue dans le corps de l'animal. Dans la présente étude, la rétention totale de P a varié entre 3,4 et 5,3 g/kg de gain vide. Par conséquent, l'utilisation d'une quantité fixe de P retenu par unité de gain dans la méthode du bilan simplifié doit être reconsidérée si la réduction de l'apport de P alimentaire dans le but de minimiser son excrétion entraîne une réduction de la rétention. On se heurte alors en pratique à la difficulté de prédire la rétention de P qui peut varier fortement pour des régimes présentant la même teneur en P total, en raison de la grande variabilité

Tableau 4 - Effet du niveau de phosphore apporté dans les aliments sur les performances zootechniques des porcs charcutiers et la rétention corporelle de protéine, lipides et minéraux

Variables	Apports de phosphore					SEM	Effet du traitement		
	Très bas (TB)	Bas (B)	Témoin (T)	Haut (H)	Très haut (TH)		Lin.	Quad.	Res.
Gain moyen quotidien, kg/j	0,955	1,017	0,993	1,036	1,011	0,031	n.s.	n.s.	n.s.
Consommation aliment, kg/j	2,36	2,49	2,54	2,61	2,53	0,107	n.s.	n.s.	n.s.
Conversion alimentaire	2,46	2,44	2,55	2,52	2,50	0,047	n.s.	n.s.	n.s.
Composition du gain^a, g/j									
Protéine	148,9	149,9	144,1	156,0	149,8	3,41	n.s.	n.s.	0,048
Lipides	272,2	322,2	330,3	323,6	315,2	23,1	n.s.	n.s.	n.s.
Cendres	16,6	22,1	25,1	27,9	29,9	1,11	<0,0001	0,068	n.s.
Ca	5,51	7,40	8,93	10,23	10,86	0,321	<0,0001	0,018	n.s.
P	3,26	3,99	4,50	5,00	5,32	0,138	<0,0001	0,092	n.s.
Na	0,99	0,93	0,98	1,11	1,00	0,049	n.s.	n.s.	0,061
Mg	0,22	0,25	0,27	0,30	0,31	0,008	<0,0001	n.s.	n.s.
K	1,18	1,14	1,11	1,19	1,17	0,034	n.s.	n.s.	n.s.
Fe	0,042	0,043	0,041	0,044	0,041	0,002	n.s.	n.s.	n.s.
Zn	0,017	0,018	0,019	0,020	0,020	0,001	<0,0001	n.s.	n.s.
P retenu, g/kg gain	3,405	3,941	4,535	4,841	5,278	0,116	<0,0001	n.s.	n.s.
N retenu, g/kg gain	25,1	23,8	23,3	24,2	23,8	0,69	n.s.	n.s.	n.s.

^a La composition corporelle initiale a été obtenue par régression à partir de la composition de 12 porcelets abattus au poids approximatif de 16,3 kg

de la digestibilité de P, notamment lorsque l'on incorpore des phytases. Toutefois, lorsque les apports de P digestibles sont déterminés selon les recommandations de Jondreville et Dourmad (2005), la rétention de P par kg de gain semble voisine de celle retenue par le Corpen (2003) et la méthode du bilan simplifié reste valide.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Marquis Roy et Yan Martel-Kennes de La Coop Fédérée de Québec pour nous avoir fourni les données utilisées dans ce projet et pour les nombreuses suggestions concernant les formulations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote - phosphore - potassium - cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, France.
- Crenshaw J.D., 2001. Calcium, Phosphorus, vitamin D and vitamin K in swine nutrition. In: A. J. Lewis and L. L. Southern (Eds) Swine Nutrition, 187-212. CRC Press, Washington DC, USA.
- CVB, 2000. Veevoedertabel. Centraal Veevoederbureau, Lelystad, The Netherlands
- Dourmad J.-Y., Pomar C., Masse D., 2002. Modélisation du flux de composés à risque pour l'environnement dans un élevage porcin. Journ. Rech. Porcine, 34, 183-194.
- Ekpe E.D., Zijlstra R.T., Patience J.F., 2002. Digestible phosphorus requirement of grower pigs. Can. J. Anim. Sci., 82, 541-549.
- Fent, R.W., Allee, G.L., Webel, D.M., Spencer, J.D., Gaines, A.M., Kendall, D.C., Frank, J.W., 2003. Available phosphorus requirement to maximize growth and bone mineralization in 24 to 50-kg pigs. J. Anim. Sci., 81 (Suppl. 1), 98 (Abstract).
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières destinées aux animaux d'élevage. D. Sauvant, J.-M. Perez and G. Tran. (Eds). Éditions INRA, Paris, France.
- Jean dit Bailleul P., Bernier J.F., van Milgen J., Sauvant D., Pomar C., 2001. Méta-analyse de l'effet de la phytase dans les aliments pour porcs. Journ. Rech. Porcine, 33, 43-48.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- Jondreville C., Revy P.S., Dourmad J.Y., Nys Y., Hillion S., Pontrucher F., Gonzalez J., Soler J., Lizardo R., Tibau J., 2004. Influence du sexe et du génotype sur la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer, zinc et cuivre chez le porc de 25 - 135 kg de poids vif. Journ. Rech. Porcine, 36, 17-24.

- Jongbloed A.W., Everts H., Kemme P.A., Mroz Z., 1999. Quantification of absorbability and requirements of macroelements. In : I. Kyriazakis (Ed). *A Quantitative Biology of the Pig*, 275-298. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- Jongbloed A.W., Lenis N.P., 1992. Alteration of nutrition as a means to reduce environmental pollution by pigs. *Livestock Prod. Sci.*, 31, 75-94.
- Knowlton K.F., Radcliffe J.S., Novak C.L., Emmerson D.A., 2004. Animal management to reduce phosphorus losses to the environment. *J. Anim Sci.*, 82, E173-E195.
- Kornegay E.T., 2001. Digestion of phosphorous and other nutrients: the role of phytases and factors influencing their activity. In: M.R. Bedford and G.G. Partridge (Eds), *Enzymes in Farm Animal Nutrition*, 237-271. CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- Letourneau Montminy M.-P., 2005. Étude et modélisation de l'absorption intestinale phosphocalcique chez le porc charcutier. DAA en Sciences animales et filière des produits. INA-PG, Paris, France.
- Letourneau Montminy M.-P., Jondreville C., Lescoat P., Meschy F., Pomar C., Dourmad J.Y., Wilfart A., van Milgen J., Sauvant D., 2006. Modélisation du métabolisme phosphocalcique chez le porc charcutier : devenir du phosphore ingéré dans les contenus digestifs. *Journ. Rech. Porcine*, 38.
- NRC. 1998. *Nutrient Requirements of Swine* (10th ed.). National Academy Press, Washington, DC, USA.
- Pomar C., Jean dit Bailleul P., Rivest J., 1996. Mieux nourrir nos porcs pour protéger l'environnement. Symposium « L'industrie porcine à l'affût de son l'environnement », Saint-Hyacinthe, Qc, 19 septembre 1996, Canada.
- Poulsen H.D., Jongbloed A.W., Latimier P., Fernandez J.A., 1999. Phosphorus consumption, utilisation and losses in pig production in France, The Netherlands and Denmark. *Livest. Prod. Sci.*, 58, 251-259.
- Whittemore C.T., 1993. *The science and practice of pig production*. Longman Ltd, London, UK.