

Optimisation des apports de phosphore et calcium pour maximiser leur utilisation chez le porc en croissance dans un contexte de durabilité

Enrique GONZALO(1), Marie-Pierre LÉTOURNEAU MONTMINY (2), Agnès NARCY (3), Jean F. BERNIER (2), Candido POMAR (1)

(1) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, Qc, Canada, J1M 1Z3

(2) Département des Sciences Animales, Université Laval, Québec, Qc, Canada, GOV 1A6

(3) INRA de Tours, UR-83, Nouzilly, 37380

Marie-Pierre.Letourneau@fsaa.ulaval.ca

Optimisation des apports de phosphore et calcium pour maximiser leur utilisation chez le porc en croissance dans un contexte de durabilité

L'impact d'une carence (déplétion) en calcium (Ca) et phosphore (P) suivie d'une alimentation adéquate (réplétion) sur l'efficacité d'utilisation de P et Ca a été étudié sur 60 porcs mâles de $14 \pm 1,6$ kg à $132 \pm 10,3$ kg. Les animaux ont été nourris avec un régime témoin (C) satisfaisant leurs besoins, ou avec un régime réduit (L) apportant 60% des besoins de P digestible et Ca total pendant quatre phases de 28 jours (15-35, 35-70, 70-100 et 100-130 kg de poids vif) selon les séquences suivantes : CCCC, CCCL, CCLC, CLCC, LCLC et LLLL. Les performances de croissance ont été estimées pour chacune des phases de croissance et le contenu minéral osseux (CMO) du corps entier et des vertèbres lombaires 2 à 4 (L2-L4) ont été estimés au début et à la fin de chaque phase par absorptiométrie biphotonique à rayons X (DXA). La consommation de l'aliment L diminuait les performances de croissance durant les deux premières phases. La déplétion engendrait une diminution de CMO dans toutes les phases de croissance tant au niveau du corps entier que des vertèbres. Notons que les vertèbres étaient plus sensibles à la déplétion et à la réplétion que l'était le corps entier. Les animaux ayant subi une phase de déplétion étaient plus efficaces à utiliser P et Ca durant la réplétion permettant un rattrapage en termes de CMO au niveau des vertèbres dès la troisième phase. D'autres études sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents impliqués dans les phases de déplétion et réplétion afin de réduire le P et Ca alimentaires sans modifier les performances des animaux.

Optimization of phosphorus and calcium supply to maximize their utilization by growing pigs for sustainable farming

The impact of dietary calcium (Ca) and phosphorus (P) deficiency (depletion) on Ca and P efficiency during a recovery period (repletion) was studied in 60 male pigs from 14 ± 1.6 kg to 132 ± 10.3 kg. Pigs were fed with a control diet (C) fulfilling the estimated nutrient requirements or with a low diet (L) providing 60% of the required digestible P and total Ca during four phases of 28 days (15-35, 35-70, 70-100 and 100-130 kg body weight) according to the following sequences: CCCC, CCCL, CCLC, CLCC, LCLC and LLLL. Growth performance was measured for each growing phase and bone mineral content (BMC) of total body and lumbar vertebrae 2 to 4 (L2-L4) were estimated at the beginning and at the end of each feeding phase by dual x-ray absorptiometry (DXA). The growth performance of pigs fed the L diet decreased during the first two phases. Depletion resulted in a decrease of BMC in total body and vertebrae in all the growing phases. It should be noted that vertebrae were more sensitive to depletion and repletion periods compared to the total body. Depleted animals used P and Ca more efficiently during repletion allowing them to recover BMC vertebrae deficit in the third phase. Further research is needed to better understand the underlying mechanisms involved in depletion and repletion for reducing dietary P and Ca without modifying animal performance.

INTRODUCTION

La réduction de phosphore (P) alimentaire, sans affecter les performances des porcs, est indispensable pour diminuer le coût d'alimentation et l'impact environnemental lié à ce minéral. Des études précédentes ont montré qu'une déplétion en P et calcium (Ca) suivie d'une période de réplétion, engendrait une augmentation de l'efficacité d'utilisation de ces minéraux, permettant aux porcs de rattraper le déficit de minéralisation osseuse totalement (Ryan *et al.*, 2011 ; Létourneau-Montminy *et al.*, 2013) ou partiellement (Aiyangar *et al.*, 2010) avec des effets variables sur les performances de croissance. L'objectif de cette étude était d'affiner la période idéale de déplétion et de réplétion permettant une utilisation accrue de P et Ca, avec un impact minimal sur la minéralisation osseuse et les performances de croissance. Les conséquences de périodes de déplétion-réplétion de P et Ca en termes de performances de croissance et de minéralisation osseuse ont été testées chez des porcs de 15 à 130 kg de poids vif.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et régimes expérimentaux

Soixante porcs mâles castrés (LW x Landrace) x Pietrain d'un poids vif initial de $14 \pm 1,6$ kg ont été utilisés dans cette expérimentation réalisée selon un plan d'alimentation comportant quatre phases de 28 jours chacune pendant lesquelles l'ensemble des besoins nutritionnels ont été satisfaits à l'exception de ceux de P et Ca. Deux aliments par phase ont été formulés. Les aliments témoin (C) qui apportaient un niveau adéquat de tous les nutriments (ex. : pour les phases 1 à 4 : Lys DIS, 11,8 à 6,9 g/kg ; EN, 9,6 à 10,2 MJ/kg ; MAT, 23,6 à 19,2 g/kg) ainsi que de P digestible (Pdig) estimé, pour les phases 1 à 4 respectivement, à 3,6, 3,2, 2,6 et 1,9 g/kg (Jondreville et Dourmad, 2005 ; Létourneau-Montminy *et al.*, 2013), tandis que les aliments réduits (L) apportaient 60% des besoins de Pdig. Le ratio Ca total/Pdig était fixe à 2,9. Les aliments étaient présentés sous forme de granulés (4 mm). En alternant les aliments C et L entre les phases, six traitements expérimentaux ont été constitués : CCCC, CCCL, CCLC, CLCC, LCLC et LLLL. Les porcs étaient assignés de façon aléatoire à un traitement et logés en groupe soit dans le parc C ou L. L'eau et la nourriture étaient disponibles à volonté.

1.2. Mesures

La consommation moyenne du groupe a été mesurée pendant la première phase d'alimentation alors qu'une alimentation automatisée (IVOG®-station, Insentec, Marknesse, Pays Bas) a permis les mesures de consommation journalière individuelle pour les autres phases. Au début de chaque phase et à la fin de l'expérience, entre 9 et 10 porcs par traitement ont été pesés, anesthésiés et le corps entier et les vertèbres lombaires 2 à 4 (L2-L4) ont été soumises à des mesures d'absorption biphotonique à rayons X (DXA ; Prodigy, GE Healthcare, Madison, WI) pour estimer le contenu minéral osseux (CMO pour le corps entier et CMOv pour les vertèbres). L'efficacité de rétention de Pdig a été estimée en divisant le gain de CMO (CMO fin – CMO initial) par le Pdig ingéré, tant pour le corps entier (Gain CMO:Pdig ingéré) que pour les vertèbres (Gain CMOv:Pdig ingéré). Des échantillons représentatifs des aliments expérimentaux ont été pris chaque semaine et

analysés à la fin de l'expérimentation pour connaître leur contenu en matière sèche, P (colorimétrie) et Ca (spectrométrie au plasma; AOAC, 1990).

1.3. Analyses statistiques

Les données ont été soumises à une analyse de variance avec la procédure MIXED de SAS (SAS 9,2, 2002, Inst. Inc. Cary, NC). Dans cette analyse le traitement était l'effet principal et le porc était l'unité expérimentale. Les effets linéaire (Lin), quadratique (Qua) et cubique (Cub) ont été étudiés pour chaque phase de croissance indépendamment avec des contrastes orthogonaux à l'intérieur des séquences de déplétion et de réplétion. Les différences sont considérées comme significatives lorsque $P < 0,05$, et une valeur de $P \leq 0,10$ dénote une tendance statistique.

2. RESULTATS

2.1. Phase 1 (de 15 à 35 kg de poids vif)

Pendant la première phase de croissance, la distribution de l'aliment L s'est traduite par une diminution du gain moyen quotidien (GMQ ; 7% ; $P = 0,05$, Tableau 1), du CMO corporel et des vertèbres (respectivement, 35 et 46% ; $P < 0,01$) et du gain de CMO corporel et des vertèbres (respectivement, 53 et 113% ; $P < 0,01$), comparativement aux porcs recevant l'aliment C.

Tableau 1 – Performance de croissance et minéralisation osseuse des porcs de 15 à 35 kg de poids vif¹ selon l'apport en phosphore

	Traitements ³		ETR ³	Valeurs de P ³
	C	L		
n	38	20		
GMQ ² , g/j	753	696	22	0,048
CMO ² , g	518	338	14	<0,001
Gain CMO ² , g/j	12,2	5,69	0,37	<0,001
CMOv ² , g	9,65	5,20	0,35	<0,001
Gain CMOv ² , g/j	0,137	-0,018	0,014	<0,001

¹ Poids vif initial : 14 ± 2 kg ; Poids vif final : 35 ± 4 kg

² GMQ, gain moyen quotidien ; CMO, contenu minéral osseux corporel ; Gain CMO, CMO fin – CMO initial ; CMOv, CMO des vertèbres L2-L4 ; Gain CMOv, CMOv fin – CMOv initial

³ C : aliment témoin ; L : aliment bas en phosphore et calcium ; ETR, Écart type résiduel ; Effet du traitement

2.2. Phase 2 (de 35 à 70 kg de poids vif)

Une déplétion dans la deuxième phase d'alimentation a entraîné une diminution de la consommation moyenne journalière (CMJ ; Lin : $P = 0,05$; Tableau 2) et du GMQ (Lin : $P = 0,01$), alors que l'efficacité alimentaire (EA) demeurait inchangée. Des résultats similaires ont été obtenus pour la minéralisation osseuse avec une diminution de CMO corporel et des vertèbres (Lin : $P < 0,01$). Le gain de CMO était quant à lui similaire entre les porcs des traitements CL et LL, tant au niveau du corps entier (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P < 0,01$) que des vertèbres (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P < 0,01$). Le gain CMO:Pdig ingéré diminuait chez les porcs CL comparativement aux porcs

Tableau 2 – Performance de croissance et minéralisation osseuse des porcs de 35 à 70 kg de poids vif¹ selon la séquence d'apport en phosphore

	Traitements ³				Valeurs de P ⁴			
	CC	CL	LC	LL	ETR ⁴	CC vs CL vs LL	CC vs LC	
						Lin	Qua	
n	29	9	10	10				
Performances²								
CMJ, kg/j	2,45	2,34	2,27	2,27	0,08	0,048	0,83	0,046
GMQ, g/j	1219	1139	1153	1124	34	0,01	0,42	0,08
EA, kg/kg	0,498	0,488	0,511	0,496	0,129	0,90	0,53	0,35
Minéralisation²								
CMO, g	1107	831	922	686	41	<0,001	0,16	<0,001
Gain CMO, g/j	21,1	11,0	21,6	11,7	0,9	<0,001	<0,001	0,62
Pdig ingéré, g/j	7,9	4,5	7,3	4,3	0,2	<0,001	<0,001	0,02
Gain CMO:Pdig ing, mg/g	2688	2457	2959	2706	83	0,84	0,014	0,004
CMOv, g	22,9	15,6	18,9	10,4	1,1	<0,001	0,42	0,003
Gain CMOv, g/j	0,477	0,199	0,491	0,183	0,037	<0,001	0,003	0,73
Gain CMOv:Pdig ing, mg/g	60,70	44,23	66,29	41,70	5,01	0,001	0,23	0,32

¹ Poids vif initial : 35 ± 4 kg ; Poids vif final : 68 ± 6 kg² CMJ, consommation moyenne journalière ; GMQ, gain moyen quotidien ; EA, efficacité alimentaire ; CMO, contenu minéral osseux corporel ; Gain CMO, CMO fin corporel – CMO initial corporel, Gain CMO:Pdig ing, gain CMO sur P digestible ingéré ; CMOv, CMO des vertèbres L2-L4 ; Gain CMOv, CMOv fin – CMOv initial ; Gain CMOv:Pdig ing, gain CMOv sur le P digestible ingéré³ C : aliment témoin ; L : aliment bas en phosphore et calcium⁴ ETR, Écart-type résiduel ; Analyse de variance avec le traitement en effet principal et le porc comme unité expérimentale, et le test par contraste des effets linéaire (Lin) et quadratique (Qua) d'une déplétion (CC vs CL vs LL) et d'une réplétion (CC vs LC)**Tableau 3** – Performance de croissance et minéralisation osseuse des porcs de 70 à 100 kg de poids vif¹ selon la séquence d'apport en phosphore

	Traitements ³					Valeurs de P ⁴				
	CCC	CCL	CLC	LCL	LLL	ETR ⁴	CCC vs CCL vs LCL vs LLL	CCC vs CLC		
							Lin	Qua	Cub	
n	19	10	9	10	10					
Performances²										
CMJ, kg/j	3,35	2,98	3,31	2,99	3,16	0,09	0,09	<0,001	0,54	0,69
GMQ, g/j	1169	1200	1163	1167	1204	35,6	0,59	0,93	0,37	0,88
EA, kg/kg	0,349	0,404	0,351	0,391	0,381	0,007	0,004	<0,001	0,03	0,89
Minéralisation²										
CMO, g	1812	1553	1580	1367	1215	66,3	<0,001	0,37	0,88	0,006
Gain CMO, g/j	24,6	17,0	26,7	15,9	18,9	1,19	<0,001	<0,001	0,62	0,15
Pdig ingéré, g/j	8,7	4,8	8,6	4,8	5,1	0,19	<0,001	<0,001	<0,001	0,63
Gain CMO:Pdig ing, mg/g	2827	3568	3103	3309	3711	136	<0,001	0,17	0,005	0,099
CMOv, g	34,4	28,2	31,5	25,0	21,3	1,63	<0,001	0,397	0,62	0,14
Gain CMOv, g/j	0,397	0,215	0,568	0,218	0,387	0,033	0,83	<0,001	0,89	<0,001
Gain CMOv:Pdig ing, mg/g	45,7	45,2	66,0	45,9	76,4	5,05	<0,001	0,001	0,18	0,002

¹ Poids vif initial : 68 ± 6 kg ; Poids vif final : 101 ± 8 kg² Voir Tableau 2³ C : aliment témoin ; L : aliment bas en phosphore et calcium⁴ ETR, Écart-type résiduel ; Analyse de variance avec le traitement en effet principal et le porc comme unité expérimentale, et le test par contraste des effets linéaire (Lin), quadratique (Qua) et cubique (Cub) d'une déplétion (CCC vs CCL vs LCL vs LLL) et d'une réplétion (CCC vs CLC)

Tableau 4 – Performance de croissance et minéralisation osseuse des porcs de 100 à 130 kg de poids vif¹ selon la séquence d'apport en phosphore

	Traitements ³						Valeurs de P ⁴					
	CCCC	CCCL	CCLC	CLCC	LCLC	LLLL	CCCC vs CCCL vs LLLL		CCCC vs CCLC vs CLCC vs LCLC			
							ETR ⁴	Lin	Qua	Lin	Qua	Cub
n	10	9	10	9	10	10						
Performances²												
CMJ, kg/j	3,76	3,45	3,68	3,30	3,55	3,62	0,11	0,36	0,08	0,04	0,14	0,06
GMQ, g/j	1179	1096	1151	1052	1085	1120	44	0,33	0,32	0,05	0,48	0,29
EA, kg/kg	0,312	0,318	0,313	0,320	0,305	0,309	0,007	0,70	0,39	0,64	0,25	0,39
Minéralisation²												
CMO, g	2499	2309	2396	2307	2161	1841	98	<0,001	0,24	0,01	0,82	0,87
Gain CMO, g/j	25,9	16,2	30,1	26,0	28,3	22,3	1,6	0,105	<0,001	0,66	0,57	0,04
Pdig ingéré, g/j	7,1	3,8	7,0	6,3	6,8	4,0	0,2	<0,001	<0,001	0,020	0,088	0,033
Gain CMO:Pdig ing, mg/g	3577	4260	4309	4123	4179	5609	118	<0,001	0,148	0,048	0,068	0,162
CMOv, g	43,1	40,2	42,1	43,0	38,8	30,9	1,9	<0,001	0,16	0,14	0,38	0,40
Gain CMOv, g/j	0,311	0,206	0,497	0,412	0,495	0,343	0,029	0,41	0,001	<0,001	0,07	0,001
Gain CMOv:Pdig ing, mg/g	43,9	55,8	71,1	66,3	73,5	85,7	5,4	<0,001	0,176	0,001	0,06	0,067

¹ Poids vif initial : 101 ± 8 kg ; Poids vif final : 132 ± 10 kg

² Voir Tableau 2

³ C : aliment témoin ; L : aliment bas en phosphore et calcium

⁴ ETR, Écart-type résiduel ; Analyse de variance avec le traitement en effet principal et le porc comme unité expérimentale, et le test par contraste des effets linéaire (Lin), quadratique (Qua) et cubique (Cub) d'une déplétion (CCCC vs CCCL vs LLLL) et d'une réplétion (CCCC vs CCLC vs CLCC vs LCLC)

ayant reçu l'aliment CC et LL (Qua : $P = 0,01$), alors qu'au niveau des vertèbres le gain CMOv:Pdig ingéré diminuait linéairement chez les porcs CL et LL (respectivement, 27 et 31% ; Lin : $P < 0,01$) comparativement aux porcs CC.

Une réplétion pendant cette deuxième phase d'alimentation (LC) engendrait des performances de croissance plus faibles que les porcs CC avec une diminution de la CMJ (7% ; $P = 0,05$) et du GMQ (5% ; $P = 0,08$). Concernant les caractéristiques de minéralisation osseuse, une déplétion dans la première phase suivie d'une réplétion a entraîné une diminution du CMO corporel et des vertèbres (respectivement, 17 et 18% ; $P < 0,01$) comparativement aux témoins CC. Le gain de CMO demeurait quant à lui inchangé chez les porcs des traitements LC et CC quelque soit la région osseuse. Le gain CMO:Pdig ingéré augmentait chez les LC (10% ; Lin : $P < 0,01$) et était inchangé pour les vertèbres.

2.3. Phase 3 (de 70 à 100 kg de poids vif)

Une déplétion dans la troisième phase a entraîné une diminution de la CMJ chez les porcs CCL et LCL comparativement aux porcs CCC et LLL (Lin : $P = 0,09$; Qua : $P < 0,01$; Tableau 3) alors que le GMQ n'a pas été modifié. Ainsi, la déplétion a engendré une meilleure EA chez les porcs CCL et la plus faible chez les CCC (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P < 0,01$; Cub : $P = 0,03$). Une diminution du CMO corporel et des vertèbres a été observée de façon proportionnelle au nombre de phases de déplétion, soit en ordre décroissant de CMO les traitements CCC, CCL, LCL et LLL (Lin : $P < 0,01$). Le gain de CMO corporel diminuait aussi avec le nombre de phases de déplétion à l'exception des porcs des traitements LLL qui avaient un gain de CMO intermédiaire entre les CCC et les CCL et LCL (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P < 0,01$). Une déplétion dans la

phase 3 (CCL et LCL) augmentait le gain CMO:Pdig ingéré par rapport aux témoins CCC alors que les LLL présentaient une meilleure efficacité de dépôt (Lin : $P < 0,01$; Cub : $P < 0,01$). Le gain CMOv était similaire entre les CCC et LLL et entre les CCL et LCL, le premier groupe ayant le meilleur gain (Qua : $P < 0,01$). Le gain CMOv:Pdig ingéré n'a pas augmenté avec la déplétion à l'exception des porcs des traitements LLL qui présentaient une valeur largement supérieure aux autres (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P < 0,01$).

Les performances de croissance étaient similaires chez les animaux «réplétés» (CCC vs CLC). Le CMO corporel était quant à lui plus faible chez les CLC (13% ; $P < 0,01$) malgré un gain de CMO similaire et une tendance ($P = 0,10$) pour une efficacité de dépôt accrue. Des résultats contraires ont été obtenus pour les vertèbres, soit un CMOv similaire chez les porcs recevant l'aliment CCC et CLC résultant d'un gain CMOv et d'un gain CMOv:Pdig ingéré accru chez les CLC (respectivement, 43% ; $P < 0,01$ et 45% ; $P < 0,01$).

2.4. Phase 4 (de 100 à 130 kg de poids vif)

Une déplétion dans la quatrième phase de croissance (CCCL et LLLL) n'a pas affecté les performances de croissance des animaux. Par contre, la déplétion a entraîné une diminution du CMO chez les CCCL et LLLL (respectivement, 8 et 26% ; Tableau 4) et CMOv (respectivement, 7 et 28%) par rapport aux CCCC (Lin : $P < 0,01$). Au niveau du gain de CMO et CMOv, un effet uniquement quadratique (Qua : $P < 0,01$) montrait un gain similaire entre les porcs CCCC et LLLL qui était supérieur à celui des CCCL (36%). Chez les porcs CCCL et LLLL, le gain CMO:Pdig ingéré était plus élevé que chez les porcs CCCC tant au niveau corporel (respectivement, 19 et 57% ; Lin : $P < 0,01$) que des vertèbres (respectivement, 27 et 95% ; Lin : $P < 0,01$).

La CMJ des porcs «réplétés» durant la quatrième phase était similaire à l'exception des CLCC qui avait une CMJ plus faible (Lin : $P = 0,04$; Cub : $P = 0,06$), alors que le GMQ diminuait linéairement entre les traitements CCCC, CCLC, LCLC à CLCC (Lin : $P = 0,05$). Une diminution de CMO corporel proportionnelle au nombre de phases de réplétion était observée (Lin : $P = 0,01$), alors que CMOv était similaire. Concernant le gain CMO, un effet cubique ($P = 0,04$) montrait un gain supérieur chez les CCLC alors que pour CMOv, les porcs CCLC et LCLC présentaient des gains similaires et supérieurs aux porcs CCCC et CLCC (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P = 0,07$; Cub : $P < 0,01$). De façon similaire, le gain CMO:Pdig ingéré était supérieur chez les LLLL et CCLC comparativement aux CLCC et CCCC (Lin : $P = 0,05$; Qua : $P = 0,07$) tout comme le gain CMOv:Pdig ingéré (Lin : $P < 0,01$; Qua : $P = 0,06$; Cub : $P = 0,07$).

3. DISCUSSION

3.1. Effet d'une déplétion

Le GMQ était diminué chez les porcs recevant l'aliment L à l'issue de la première phase. Des résultats similaires étaient obtenus pour la deuxième phase, avec une diminution de la CMJ et du GMQ proportionnelle à la durée de la déplétion et ce, sans modification de l'EA. Au regard de ces deux phases, la carence en P semble diminuer la CMJ et par conséquent le GMQ. Cependant, les résultats de la troisième phase montrent des effets des traitements sur la CMJ qui affecte en retour l'EA. À la quatrième phase, la déplétion a peu d'impact sur les performances de croissance. La diminution des performances de croissance lors de carence en P chez le porc ne semble pas systématique puisque certains auteurs montraient des effets (Cromwell *et al.*, 1993 ; Ekpe *et al.*, 2002) alors que d'autres non (Hastad *et al.*, 2004 ; Pomar *et al.*, 2006). Dans un dispositif expérimental similaire à celui utilisé dans cette étude (Létourneau-Montminy *et al.*, 2013) aucun impact sur les performances de croissance n'a été observé. Les différences entre les réponses de cette dernière étude et la nôtre pourraient provenir d'une différence de lignée paternelle utilisés dans les deux études (mélange 75/25% Piétrain et Duroc vs 100% Piétrain). En effet, Alexander *et al.* (2008) ont étudié l'impact d'une carence en P chez des porcs présentant des masses osseuses et des vitesses de croissance différentes : (PIC280 vs PIC337). Les résultats ont montré que les porcs à ossature légère étaient plus sensibles à la carence en termes d'efficacité alimentaire, de force à la rupture et dans une moindre mesure de teneur plasmatique en calcitriol (vitamine D).

La consommation de l'aliment L a engendré une diminution du CMO corporel et des vertèbres L2-L4 indépendamment de la phase de croissance. Étant donné que la majorité du Ca corporel et une partie considérable du P se retrouvent dans les os (Crenshaw, 2001), une carence en ces minéraux se traduit généralement par une déminéralisation osseuse et engendre des phénomènes de régulation via la parathormone (PTH) et le calcitriol (Eklou-Kalonji *et al.*, 1999). Bien que des déminéralisations osseuses aient été observées tant au niveau corporel que des vertèbres dans la présente étude, les magnitudes n'étaient pas toujours similaires. Durant la première phase, des gains de CMOv négatifs ont été observés chez les porcs ayant consommé l'aliment L alors que le dépôt était diminué, mais tout de même positif, pour le corps entier.

L'os est un tissu dynamique en remodelage constant par des processus de résorption et de formation étroitement liés. Il se compose de deux types de structures, l'os trabéculaire et l'os cortical. La vertèbre est un os dit trabéculaire lequel a une plus grande surface de contact et présente un remodelage plus actif, le rendant plus sensible aux apports en minéraux que le tissu cortical contenu dans les os longs par exemple (Parfitt, 1984). Ceci pourrait expliquer des dépôts négatifs dans les vertèbres chez les porcs ayant consommé l'aliment L, indiquant une mobilisation de leurs réserves osseuses pour pallier la carence. Néanmoins, cette mobilisation n'a pas été suffisante pour maintenir leurs performances de croissance comparativement aux témoins. Il est difficile de savoir si les porcs plus jeunes mobilisent davantage leurs os ou si les valeurs de rétention négatives proviennent de leurs faibles réserves comparativement aux porcs plus vieux. À l'issue de la deuxième phase, des déminéralisations osseuses proportionnelles à la durée de la déplétion et plus marquées pour les vertèbres (55%) que pour le corps entier (38%) (LL vs CC) étaient observées. Le gain CMOv était également plus faible chez les LL comparativement aux CL, alors que l'inverse était observé pour le corps entier. La déminéralisation observée dans la première phase chez les porcs ayant consommé l'aliment L semble donc s'être poursuivie dans la deuxième phase. Le gain CMO:Pdig ingéré était plus élevé de l'ordre de 10% chez les porcs LL comparativement au CL alors que l'inverse était observé pour les vertèbres. Lors d'une carence en Ca, une augmentation de PTH se produit rapidement et résulte en une augmentation de la résorption osseuse et de la synthèse de calcitriol au niveau rénal qui aura pour action d'augmenter l'absorption intestinale. Eklou-Kalonji *et al.* (1999) ont montré un minimum de 9 jours pour une augmentation de la PTH plasmatique contre 23 à 32 jours pour celle de calcitriol. Il est donc possible que les porcs LL ont été en phase de résorption intense surtout au niveau de l'os trabéculaire dans la première phase. Dans la troisième phase, les animaux «déplétés» présentaient à nouveau une diminution de CMO comparativement aux animaux témoins, qui était proportionnelle au nombre des phases de déplétion, et toujours plus marquée pour les vertèbres. Le gain de CMO corporel des animaux recevant l'aliment L dans la troisième phase (CCL, LCL, LLL) était plus faible que celui des témoins, alors que pour les vertèbres, les porcs LLL présentaient un gain CMOv similaire et un gain CMOv:Pdig ingéré augmenté de 70% par rapport aux témoins. L'augmentation du gain de CMO et de CMOv sur Pdig ingéré est probablement due à la synthèse de calcitriol créé par la diminution de l'apport de P et Ca qui a engendré une augmentation des transporteurs intestinaux actifs de P et Ca (Sommerville *et al.*, 1985 ; Saddoris *et al.*, 2010) et de la surface ostéoblastique (Eklou-Kalonji *et al.*, 1999). L'augmentation d'efficacité de dépôt accrue au niveau des vertèbres par rapport au corps entier (67 vs 31%) chez les porcs LLL par rapport au CCC proviendrait d'une plus grande activité de remodelage au niveau de l'os trabéculaire (Parfitt, 1984). À l'issue de la quatrième phase, une réduction de CMO et une augmentation de l'efficacité de dépôt proportionnelle à la durée de la déplétion (CCCL et LLLL) tant pour le corps entier que pour les vertèbres étaient observées. Notons que la diminution de CMO chez les LLLL et CCCL comparativement aux CCCC était similaire pour les deux régions osseuses, alors que le gain CMO:Pdig ingéré demeurait davantage augmenté pour la vertèbre (LLLL vs CCCC : 95 vs 57%) à l'identique des phases précédentes.

3.2. Effet d'une réplétion

Les porcs LC avaient des performances de croissance et un CMO diminués indépendamment de la région osseuse et ce malgré une augmentation de l'efficacité de rétention de Pdig d'environ 10%. Ainsi, 28 jours de réplétion n'ont pas été suffisants pour revenir au niveau des performances de croissance et de la minéralisation osseuse des témoins. Par contre, une réplétion dans la troisième phase (CLC) a permis d'obtenir des performances de croissance et un CMOv similaires aux CCC, alors que le CMO corporel demeurait plus faible. Cette différence de rattrapage de minéralisation entre les deux régions osseuses provient d'un gain CMO et d'une efficacité de dépôt plus marqués au niveau des vertèbres. Notons que cet effet était déjà présent durant la déplétion en raison d'une plus forte résorption qui s'est probablement accompagnée d'une augmentation du nombre d'ostéoblastes permettant un dépôt accru en période de réplétion (Parfitt, 1984). A l'issue de la phase 4, le CMO des vertèbres était similaire entre les CCCC, CCLC, CLCC et LCLC. Ce rattrapage est dû à un gain de CMOv et un gain CMOv:Pdig ingéré accrus, et ce, de façon plus marquée chez les porcs CCLC et LCLC. Le rattrapage n'était pas présent pour le corps entier. Avec des pourcentages de déplétion de P et Ca similaires aux alentours de 40% de 10 à 50 kg, Varley *et al.* (2011) ont montré un rattrapage de minéralisation osseuse à l'issue de 72 jours de réplétion (50 à 100 kg). Ceci laisse croire qu'une période de réplétion plus longue aurait peut-être permis un rattrapage au niveau du corps entier. Notons qu'un doute persiste quant à la possibilité de rattrapage si l'apport phosphocalcique de l'aliment C avait été en excès.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats de la présente étude montrent qu'une déplétion en P et Ca peut entraîner des diminutions de performances de croissance, notamment de CMJ, qui par contre, ne se traduisent pas toujours en termes de GMQ. Davantage d'études sont nécessaires pour mieux comprendre les phénomènes sous-jacents expliquant les effets sur les performances de croissance compte tenu des résultats divergents et des divers rôles métaboliques de ces deux minéraux. Bien que la déplétion ait engendré des déminéralisations plus marquées pour la vertèbre que pour le corps entier, la vertèbre se caractérisait durant la réplétion par une efficacité de dépôt accrue permettant une minéralisation compensatrice qui n'était que partielle pour le corps entier. La vertèbre est ainsi une zone très sensible aux minéraux et qui n'est pas le meilleur indicateur de la minéralisation du corps entier.

Il est à noter que dans les différentes combinaisons déplétion-réplétion étudiées, la séquence CCLC semble la plus intéressante d'un point de vue pratique étant donné qu'elle a permis une diminution de 17% de Pdig ingéré et que le CMO corporel n'était diminué que de 4% par rapport aux témoins à la fin de l'expérimentation.

Des études complémentaires sont en cours pour mieux comprendre les phénomènes sous-jacents, pré requis pour le développement de stratégies d'alimentation permettant de diminuer les apports phosphocalciques et ainsi diminuer le coût d'alimentation et l'impact environnemental, sans modifier les performances de croissance et avec un impact minimal sur la minéralisation osseuse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aiyangar A.K., Au A.G., Crenshaw T.D., Ploeg H.L., 2011. Recovery of bone strength in young pigs from an induced short-term dietary calcium deficit followed by a calcium replete diet. *Med. Eng. Phys.*, 32, 1116-1123.
- Alexander L.S., Qu A., Cutler S.A., Mahajan A., Lonergan S.M., Rothschild M.F., Weber T.E., Kerr B.J., Stahl C.H., 2008. Response to dietary phosphorus deficiency is affected by genetic background in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 86, 2585-2595.
- AOAC, 1990. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 15th edition. Arlington, VA, USA.
- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, Phosphorus, Vitamin D, and Vitamin K in Swine Nutrition. *Swine Nutrition*, Second Edition, 187.
- Cromwell G.L., Stahly T.S., Coffey R.D., Monegue H.J., Randolph J.H., 1993. Efficacy of phytase in improving the bioavailability of phosphorus in soybean meal and corn-soybean meal diets for pigs. *J. Anim. Sci.*, 71, 1831-1840.
- Eklou-Kalonji E., Zerath E., Colin C., Lacroix C., Holy X., Denis I., Pointillart A., 1999. Calcium-regulating hormones, bone mineral content, breaking load and trabecular remodeling are altered in growing pigs fed calcium-deficient diets. *J. Nutr.*, 129, 188-193.
- Ekpe E.D., Zijlstra R.T., Patience J.F., 2002. Digestible phosphorus requirement of grower pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 82:541-9.
- Hastad C.W., Drits S.S., Tokach M.D., Goodband R.D., Nelssen J.L., DeRouchey J.M., Boyd R.D., Johnston M.E., 2004. Phosphorus requirements of growing-finishing pigs reared in a commercial environment. *J. Anim. Sci.*, 82, 2945-52.
- Jondreville C., Dourmad J.-Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Production Animal*, 18, 183-192.
- Létourneau-Montminy M.-P., Lovatto P., Pomar C., 2013. The intestinal absorption of dietary calcium and phosphorus and their efficiency for bone mineral retention are affected by body mineral status, *J. Nutr.*, soumis.
- Parfitt A.M., 1984. The cellular basis of bone remodeling: the quantum concept reexamined in light of recent advances in the cell biology of bone. *Calcif. Tissue Int.*, 36 (Suppl. 1), S37-45.
- Pomar C., Jondreville C., Dourmad J.-Y., Bernier J., 2006. 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. *Journées Rech. Porcine*, 38, 209-16.
- Ryan W.F., Lynch P.B., O'Doherty J.V., 2011. Compensatory effect of dietary phosphorus on performance of growing pigs and development of bone mineral density assessed using dual energy X-ray absorptiometry. *Livest. Sci.*, 138, 89-95.
- Soddoris K.L., Fleet J.C., Radcliffe J.S., 2010. Sodium-dependent phosphate uptake in the jejunum is post-transcriptionally regulated in pigs fed a low-phosphorus diet and is independent of dietary calcium concentration. *J. Nutr.*, 140, 731-736.
- Sommerville B.A., Mauder E., Ross R., Care A.D., Brown R.C., 1985. Effect of dietary calcium and phosphorus depletion on vitamin D metabolism and calcium binding protein in the growing pig. *Horm. Metabol. Res.*, 17, 78-81.
- Varley P.F., Sweeney T., Ryan M.T., O'Doherty J.V., 2011. The effect of phosphorus restriction during the weaner-grower phase on compensatory growth, serum osteocalcin and bone mineralization in gilts. *Livest. Sci.*, 135, 282-288.