

Effets d'une déplétion-réplétion en phosphore et calcium sur les performances et la minéralisation osseuse des porcs en croissance

Marion LAUTROU (1,2), Candido POMAR (3), Philippe SCHMIDELY (2),

Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY (1)

(1) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, J1V 0A6, Canada

(2) UMR MOSAR, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 75005 Paris, France

(3) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, QC, J1M 1Z3 Canada

marion.lautrou@agroparistech.fr

Effets d'une déplétion-réplétion en phosphore et calcium sur les performances et la minéralisation osseuse des porcs en croissance

Afin d'optimiser l'utilisation du phosphore alimentaire par les porcs, cinq stratégies d'alimentation phosphocalcique ont été étudiées, sur trois phases: 1) C-C-C apportant 100% du besoin en phosphore digestible (Pdig) et calcium (Ca), 2) B-B-B 60% des besoins en Pdig et Ca, 3) Phyt-Phyt-Phyt (sans phosphate, avec phytase), apportant 60% des besoins en Pdig et Ca en phase 1, puis 100%, 4) et 5) recevaient C en phases 1 et 3, et 60% du besoin en Pdig en phase 2, associé à 65% du besoin en Ca (N) ou 80% (H). Le contenu minéral osseux (CMO) et le poids vif (PV) ont été mesurés en début et fin de phase. Le gain de CMO (gCMO) et le gain moyen quotidien (GMQ) ont été calculés par phase. En phase 1, le GMQ était plus faible chez les porcs Phyt que C ($P < 0,01$) et les CMO et gCMO du groupe C étaient supérieurs à ceux des groupes Phyt et B ($P < 0,05$). En phase 2, les groupes C-C et Phyt-Phyt présentaient des CMO similaires en raison d'un gCMO plus élevé dans le groupe Phyt-Phyt (27,1 vs 18,4 g/j, $P < 0,01$). Les groupes C-C-C, C-N-C et C-H-C présentaient un CMO identique en phases 2 et 3. La déplétion en première phase dans les groupes Phyt et B a entraîné une augmentation d'efficacité d'utilisation du phosphore. La rétention du phosphore était aussi meilleure dans les groupes C-N-C et C-H-C. Ces résultats montrent l'intérêt d'une stratégie de déplétion-réplétion pour réduire l'apport et l'excrétion de phosphore sans affecter les performances finales et la minéralisation osseuse en raison d'efficacités d'utilisation des minéraux accrues.

Effects of phosphorus and calcium depletion-repletion on performance and bone mineralization in growing pigs

To optimize the use of dietary phosphorus by pigs, five phosphocalcic feeding strategies were studied: 1) C-C-C, providing 100% of digestible phosphorus (Pdig) and calcium (Ca) requirements, 2) B-B-B, 60% of Pdig and Ca requirements, 3) Phyt-Phyt-Phyt (without phosphate, with phytase), providing 60% of Pdig and Ca requirements in phase 1, then 100%, 4) and 5) C in phases 1 and 3, and 60% of the need for Pdig in phase 2, associated with 65% of the requirements for Ca (N) or 80% (H). Bone mineral content (BMC) and body weight (BW) were measured at the start and end of each phase. BMC gain (gBMC) and average daily gain (ADG) were calculated per phase. In phase 1, ADG was lower in the Phyt group than the C group (1.05 vs 1.10 kg/d, $P < 0.01$) and group C CMO and gCMO were higher than those of the Phyt and B groups ($P < 0.05$). In phase 2, the C-C and Phyt-Phyt groups had similar CMOs due to higher gCMO in the Phyt-Phyt group (27.1 vs 18.4 g/d, $P < 0.01$). The C-C-C, C-N-C and C-H-C groups had identical CMO, in phases 2 and 3. The phase 1 depletion in the Phyt and B groups resulted in increased phosphorus-use efficiency. Phosphorus retention was also better in the C-N-C and C-H-C groups. These results show the value of a depletion-repletion strategy to reduce phosphorus intake and excretion without decreasing final performance and the bone mineralization because of increased minerals utilization efficiencies.

INTRODUCTION

L'utilisation efficace du phosphore (P) demeure un enjeu de durabilité pour la filière porcine avec les risques environnementaux qui lui sont associés et la ressource limitée que constitue le P sous forme minérale. Des premiers essais ont montré qu'il était possible d'obtenir un même niveau final de minéralisation osseuse chez des porcs nourris au besoin et des porcs nourris selon une stratégie de déplétion-réplétion en P, tout en maintenant des performances de croissance à un niveau similaires (Létourneau-Montminy *et al.*, 2014 ; Gonzalo *et al.*, 2018 ; Varley *et al.*, 2011). Cependant, cette stratégie ne permet pas toujours d'atteindre un même niveau de contenu minéral osseux (CMO) que le témoin, sécurisant la qualité du squelette (Gonzalo, 2017 ; Aiyangar *et al.*, 2010). De plus, elle n'a jamais été testée avec l'ajout de phytase microbienne.

L'objectif de cette étude était de déterminer la meilleure stratégie de déplétion-réplétion qui permettrait de diminuer les rejets en P, grâce à une meilleure utilisation de ce minéral par les porcs, sans porter atteinte aux performances de croissance et au niveau de minéralisation osseuse.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et aliments expérimentaux

Deux cent quarante porcs mâles, répartis dans 40 parcs, au poids initial de $30,9 \pm 3,9$ kg ont été utilisés afin d'étudier cinq stratégies alimentaires en trois phases de 39, 27 et 28 jours. Lors de cet essai, les animaux avaient un accès illimité à l'eau et à l'aliment qui satisfaisait l'ensemble des besoins nutritionnels du porc (NRC, 2012) à l'exception du P et du calcium (Ca).

Un premier groupe (témoin, C) recevait un aliment couvrant 100% du besoin en Ca et phosphore digestible (Pdig) pour une minéralisation osseuse maximale pendant les trois phases d'alimentation (C-C-C) (Lautrou *et al.*, 2020) (Tableaux 1 et 2). Une stratégie de déplétion-réplétion était appliquée dans les groupes C-N-C et C-H-C avec 100% des besoins couverts en phases 1 et 3, et en phase 2 60% du besoin en Pdig et 65% ou 80% du besoin en Ca pour une minéralisation osseuse maximale. En phase 2 le ratio Ca/Pdig était donc normal dans l'aliment N (2,6) et haut dans l'aliment H (3,2). Le quatrième groupe (Phyt) ne recevait pas de phosphate mais 750, 686 et 390 FTU de phytase en phase 1, 2 et 3, respectivement, permettant d'atteindre 60% du besoin en Ca et Pdig en phase 1 puis 100% en phases 2 et 3. Finalement, les aliments du groupe Bas (B-B-B), témoin négatif, couvraient 60% du besoin en Ca et Pdig. Les animaux ont été assignés aléatoirement aux traitements et logés en parc de six porcs.

1.2. Mesures et calculs

Les porcs étaient pesés individuellement au début et à la fin de chaque phase. La consommation moyenne journalière (CMJ) était estimée par parc et par phase, avec l'ingestion par parc divisée par le nombre de jours de la phase et le nombre de porcs présents sur la phase. A chaque début et fin de phase, un porc par parc (huit porcs par traitement) était anesthésié et scanné (corps entier, DXA, Hologic Discovery W, Hologic Inc., Waltham, MA) afin de déterminer le contenu minéral osseux (CMO). Le contenu corporel en maigre et en gras ont servi à déterminer les teneurs en protéines et en lipides du corps entier (Pomar et Rivest, 1996). Les teneurs en Ca et P du corps entier ont été calculées comme étant la somme du Ca et P contenus dans l'os,

Tableau 1 – Description des aliments expérimentaux¹

Traitement	Phase 1			Phase 2					Phase 3		
	C	Phyt	B	C	Phyt	B	N	H	C	Phyt	B
Ingrédients, g/kg											
Mais	713,1	755,3	740,7	575,0	575,0	575,0	575,0	575,0	575,0	575,0	575,0
Blé				245,1	259,2	264,1	260,6	257,4	233,4	243,1	248,7
Tourteau de soja 47%	222,6	217,3	219,2	144,5	141,6	141,0	141,8	142,0	158,5	157,7	156,8
Huile de soja	15,8	2,8	7,3	4,9	1,0		1,0	1,6	6,7	3,7	2,1
Pierre à chaux	14,1	8,6	8,1	9,4	9,7	4,8	6,5	8,9	9,6	9,9	5,7
Phosphate monocalcique	18,7		9,0	8,5		2,5	2,6	2,6	6,3		1,2
Sel	5,4	5,5	5,5	4,9	5,5	4,9	4,9	4,9	7,1	7,1	7,1
L-Lysine HCl	4,40	4,48	4,46	3,73	3,78	3,80	3,79	3,78	1,57	1,57	1,58
DL-Méthionine	1,29	1,22	1,24	0,54	0,52	0,51	0,52	0,52			
L-Thréonine	1,47	1,45	1,46	1,13	1,14	1,14	1,14	1,13	0,22	0,21	0,21
L-Tryptophane	0,56	0,58	0,57	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29			
L-Valine	0,51	0,48	0,49								
Prémix vitamines/minéraux	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,6	1,6	1,6
Phytase		0,30			0,32					0,18	
Composition théorique, g/kg											
Calcium total (Ca)	9,7	4,6	5,8	6,1	4,9	3,4	4,0	4,9	5,8	4,9	3,5
Phosphore total	7,2	3,4	5,2	5,0	3,2	3,8	3,8	3,8	4,6	3,3	3,5
Phosphore digestible (Pdig)	4,3	2,6	2,6	2,6	2,6	1,5	1,5	1,5	2,2	2,2	1,3
Ratio Ca/Pdig	2,3	2,3	2,3	2,4	1,9	2,2	2,6	3,2	2,7	2,2	2,7
Activité phytasique, FTU ²	0	750	0	0	686	0	0	0	0	390	0

¹ C : aliment à 100% du besoin en P digestible et Ca pour une minéralisation osseuse maximale ; Phyt : aliment à 60% du besoin en P digestible et Ca en phase 1 puis 100% en phases 2 et 3 ; Bas : aliment à 60% du besoin en P digestible et Ca ; N : aliment à 60% du besoin en P digestible et 65% du besoin en Ca ; H : aliment à 60% du besoin en P digestible et 80% du besoin en Ca.

² Phytase analysée dans les régimes Phyt de chaque phase : 1485 FTU/kg, 1260 FTU/kg et 466 FTU/kg, respectivement en phases 1, 2 et 3.

les protéines et les lipides. Le pourcentage de Ca et de P dans l'os représentent environ 39 % et 18 %, respectivement, du CMO dans le corps entier (Crenshaw, 2001). Les concentrations en P et Ca dans les protéines et les lipides ont été estimées comme celles associées aux tissus maigres et adipeux, respectivement, comme dans Lautrou *et al.* (2020). En fin de phase 3, les animaux étaient trop lourds pour être scannés, et seules leurs têtes récupérées à l'abattoir l'ont été. Le CMO du corps entier a été estimé selon Létourneau-Montminy *et al.* (2017) à partir de la densité minérale osseuse de la tête. La quantité de tissus maigres et gras n'était cependant pas disponible.

Des échantillons d'aliments étaient prélevés en début de phase, afin d'analyser la concentration en Ca, P et le niveau d'activité phytasique. Le gain moyen quotidien (GMQ) par porc était considéré comme la différence entre le poids de fin et de début de phase divisée par le nombre de jours de la phase. Le gain de CMO était calculé de la même façon mais avec le CMO. L'efficacité alimentaire (EA) représente le GMQ moyen du porc par kg d'aliment ingéré (GMQ/CMJ), par phase et par porc. Les coefficients de rétention (CR) du Ca total et du P digestible en considérant les matrices phytase ont été calculés en divisant les gains corporels journaliers en P et Ca par les quantités ingérées journalières estimées par phase, lors des phases 1 et 2. La quantité de tissus maigres et gras n'étant pas disponible lors du dernier scan, les CR osseux ont été calculés en phase 3 en divisant les gains de P et Ca osseux journaliers par les quantités ingérées journalières estimées en phase 3.

Tableau 2 – Dispositif expérimental

Traitements alimentaires	Phase 1	Phase 2	Phase 3
C-C-C	C	C	C
Phyt-Phyt-Phyt	Phyt	Phyt	Phyt
B-B-B	B	B	B
C-N-C	C	N	C
C-H-C	C	H	C

1.3. Analyses statistiques

Pour des raisons pragmatiques, compte tenu du nombre important d'animaux, les mesures (scans, pesées et refus d'aliment) ne pouvaient pas toutes être réalisées le même jour. Des corrections ont été appliquées par régression linéaire pour ramener les données sur une même durée de phase. Les résultats ont été analysés selon la procédure OLS du package Statsmodels sous Python 3. L'unité expérimentale était le porc pour le PV, le GMQ, la CMJ et l'EA et était le porc pour le CMO. En phases 2 et 3 le contraste C-C vs Phyt-Phyt et l'effet de la déplétion (C-C-C vs C-N-C vs C-H-C, effets linéaire et quadratique) ont été testés. L'effet du niveau de Ca a été étudié en phase 2 avec le contraste Bas vs CNC vs CHC (linéaire et quadratique). En phase 3, le contraste orthogonal Contrôle vs Bas a également été étudié. Les différences sont considérées significatives lorsque $P < 0,05$, et une valeur de $P \leq 0,10$ dénote une tendance statistique.

2. RESULTATS

2.1. Phase 1

En fin de phase 1, le PV et le GMQ étaient plus faibles dans le groupe Phyt que dans le groupe C (71,0 vs 73,1 kg ; $P < 0,05$; 1,05 vs 1,10 kg/j ; $P < 0,01$, Tableau 3). Le CMO, le Ca et le P corporels

et les gains associés étaient plus faibles dans les groupes Phyt et B que dans le groupe C ($P < 0,01$). Le coefficient de rétention (CR) du P digestible était plus élevé dans les groupes Phyt et B ($P < 0,001$). Le CR du Ca total était plus élevé dans le groupe Phyt, puis dans le groupe B et le plus faible dans le groupe C (respectivement 59,4, 42,9 et 35,1 % ; $P < 0,001$). La distribution d'aliments moins riches en P et Ca n'a pas eu d'effet sur l'ingestion ou l'efficacité alimentaire.

Tableau 3 – Performances de croissance et de minéralisation osseuse des porcs en phase 1, selon les traitements¹

	Traitements			ETM ²	Valeurs de P
	C	Phyt	B		
Composition corporelle initiale					
PV, kg	30,3	30,1	30,8	0,2	0,37
CMO, g	524	491	476	9	< 0,10
P, g	141	137	130	3	0,30
Ca, g	206	193	187	4	0,10
Composition corporelle finale					
PV, kg	73,1 ^a	71,0 ^b	72,6 ^{ab}	0,3	< 0,05
CMO, g	1374 ^a	1143 ^b	1120 ^b	28	< 0,001
P corporel, g	362 ^a	321 ^b	316 ^b	6	< 0,001
Ca corporel, g	539 ^a	449 ^b	440 ^b	11	< 0,001
Performances					
GMQ, kg/j	1,10 ^a	1,05 ^b	1,07 ^{ab}	0,01	< 0,01
CMJ, kg/j	2,51	2,44	2,55	0,02	0,22
EA, g/kg	438	431	423	4	0,23
Gain CMO, g/j	21,8 ^a	16,7 ^b	16,2 ^b	0,6	< 0,001
Gain P, g/j	5,7 ^a	4,7 ^b	4,6 ^b	0,1	< 0,001
Gain Ca, g/j	8,6 ^a	6,6 ^b	6,4 ^b	0,2	< 0,001
CR Pdig, %	53,2 ^a	75,0 ^b	71,5 ^b	1,9	< 0,001
CR CaTot, %	35,1 ^a	59,4 ^b	42,9 ^c	1,8	< 0,001

PV : poids vif ; CMJ : consommation moyenne journalière ; GMQ : gain moyen quotidien ; EA : efficacité alimentaire ; CMO : contenu minéral osseux corporel ; CR : coefficient de rétention ; Pdig : phosphore digestible ; CaTot : Ca total.

²ETM : erreur-type à la moyenne, Analyse de variance avec le traitement en effet principal et le porc comme unité expérimentale (PV, GMQ, CMJ, EA) ou le porc (CMO, P, Ca, Gain CMO, Gain P, Gain Ca, CR Pdig, CR CaTot) ; comparaisons multiples, des lettres différentes sur une même ligne indiquent une différence significative ($P < 0,05$).

2.2. Phase 2

Aucune différence n'a été mise en évidence entre les groupes Phyt-Phyt et C-C sur le PV, le CMO, les masses de Ca et P corporels, le GMQ, la CMJ et l'EA. Le gain de CMO, de P et Ca corporels étaient plus importants dans le groupe Phyt-Phyt que dans le groupe C-C ($P < 0,05$; Tableau 4). Le CR de Ca total était plus élevé dans le groupe Phyt-Phyt (57,5 vs 33,9 % dans le groupe C-C ; $P < 0,01$; Tableau 4). Le CR de Pdig tendait à être plus élevé dans le groupe Phyt-Phyt que dans le groupe C-C ($P < 0,10$).

La déplétion en phase 2 n'a pas eu d'effet sur les performances de croissance et la minéralisation osseuse (Tableau 4). Le CR du Pdig était plus élevé dans les groupes C-N et C-H que dans le groupe C-C ($P < 0,05$), contrairement au CR du Ca qui était le même dans les trois groupes.

Les performances de croissance et le PV n'étaient pas différents en fin de phase 2 entre les groupes B-B, C-N et C-H. Le gain de CMO était aussi le même dans ces trois groupes. En revanche,

Tableau 4 – Performances de croissance et de minéralisation osseuse des porcs en phase 2, selon les traitements¹

	Traitement					ETM ²	Valeurs de P				
	C-C	Phyt-		C-N	C-H		Réplétion C-C vs Phyt-Phyt	Déplétion C-C vs C-N vs C-H		Calcium B-B vs C-N vs C-H	
		Phyt	B-B					Linéaire	Quadratique	Linéaire	Quadratique
Composition corporelle initiale											
PV, kg	72,7	71,0	72,6	73,1	73,6	0,3	0,11	0,42	0,93	0,36	0,98
CMO, g	1319	1143	1120	1394	1410	28	< 0,05	0,32	0,71	< 0,001	0,12
P, g	351	321	316	365	371	6	0,12	0,29	0,83	< 0,01	0,24
Ca, g	518	449	440	547	553	11	< 0,05	0,31	0,71	< 0,001	0,12
Composition corporelle finale											
PV, kg	108,9	108,2	108,1	110,3	109,6	0,5	0,71	0,65	0,50	0,36	0,35
CMO, g	1835	1883	1611	1817	1850	35	0,62	0,85	0,80	< 0,05	0,44
P, g	483	499	446	483	488	7	0,44	0,80	0,92	< 0,10	0,48
Ca, g	720	739	633	713	726	14	0,61	0,85	0,80	< 0,05	0,44
Performances											
GMQ, kg/j	1,32	1,36	1,29	1,35	1,32	0,02	0,37	0,88	0,39	0,53	0,25
CMJ, kg/j	3,51	3,66	3,53	3,65	3,64	0,03	0,20	0,25	0,42	0,30	0,46
EA, g/kg	375	383	367	370	363	3	0,56	0,20	0,85	0,68	0,50
Gain CMO, g/j	18,4	27,1	18,1	15,9	16,3	1,1	< 0,05	0,50	0,62	0,51	0,63
Gain P, g/j	4,7	6,5	4,8	4,5	4,3	0,2	< 0,01	0,48	0,94	0,35	0,85
Gain Ca, g/j	7,2	10,6	7,1	6,3	6,4	0,4	< 0,05	0,51	0,62	0,51	0,63
CR Pdig, %	52,6	67,0	86,9	77,9	76,3	3,2	< 0,10	< 0,05	0,12	0,45	0,84
CR CaTot, %	33,9	57,5	58,4	41,9	35,7	2,6	< 0,01	0,96	0,33	< 0,01	0,64

¹ PV : poids vif ; CMJ : consommation moyenne journalière ; GMQ : gain moyen quotidien ; EA : efficacité alimentaire ; CMO : contenu minéral osseux corporel ; CR : coefficient de rétention ; Pdig : phosphore digestible ; CaTot : Ca total.

² ETM, erreur-type à la moyenne, Analyse de variance avec le traitement en effet principal et le parc comme unité expérimentale (PV, GMQ, CMJ, EA) ou le porc (CMO, P, Ca, Gain CMO, Gain P, Gain Ca, CR Pdig, CR CaTot), et le test par contraste des effets linéaire et quadratique d'une réplétion (C-C vs Phyt-Phyt), d'une déplétion (C-C vs C-N vs C-H) et de différents niveau d'apports de Ca (B-B vs C-N vs C-H).

le CMO était plus faible dans le groupe B-B (1611 vs 1817 et 1850 g, respectivement dans les groupes C-N et C-H, $P < 0,05$) ainsi que le Ca corporel ($P < 0,05$). Le P corporel tendait à être plus faible dans le groupe B-B que dans les groupes C-N et C-H ($P < 0,10$). Le CR du Pdig était identique dans ces trois groupes, tandis que celui du Ca était plus élevé dans le groupe B-B que dans les autres ($P < 0,01$).

2.3. Phase 3

En phase 3, aucune différence n'a été mise en évidence sur le PV, le GMQ, la minéralisation osseuse, l'ingestion et l'efficacité alimentaire entre les groupes C-C-C et Phyt-Phyt-Phyt (Tableau 5). Les CR osseuse du Ca total et P digestible étaient les mêmes dans deux groupes.

La réplétion (C-C-C vs C-N-C vs C-H-C) n'a pas eu d'effet sur le PV, le GMQ, le CMO, la CMJ et l'EA. Le gain de CMO et les coefficients de rétention osseuse du Ca et Pdig n'étaient pas différents dans les groupes C-C-C, C-N-C et C-H-C.

Le CMO et le gain de CMO étaient plus faibles dans le groupe B-B-B que dans le groupe C-C-C (1966 g et 13,0 g/j vs 2342 g et 21,2 g/j, $P < 0,05$). En revanche, la distribution d'un aliment carencé en phosphore et calcium n'a pas eu d'influence sur les performances de croissance. Les coefficients de rétention osseuse du Ca et P digestible étaient les mêmes dans les groupes C-C-C et B-B-B.

3. DISCUSSION

3.1. Effets d'une déplétion

Trois phases de déplétion ont été étudiées : les groupes Phyt et B en phase 1, les groupes B-B, C-N et C-H en phase 2 et le groupe B-B-B en phase 3. La déplétion a eu peu d'effet sur les performances de croissance en accord avec les travaux de

Pomar *et al.* (2006) et Létourneau-Montminy *et al.* (2014), qui malgré des carences en P n'ont pas vu les performances des porcs diminuer. En revanche, Castaing *et al.* (2003) ont remarqué un effet du Pdig sur les performances de croissance de 25 à 60 kg de PV mais à un niveau d'apport inférieur à ceux de la phase 1 du présent essai. De 60 à 110 kg, le GMQ diminuait à partir de 1,86 g/kg de Pdig mais le niveau de Ca n'était pas connu. Néanmoins, le GMQ était diminué en phase 1 lorsque la stratégie de déplétion était réalisée avec phytase. En phase 1, les porcs Phyt étaient carencés en Pdig et Ca au même niveau que le groupe B. Or, le GMQ du groupe B était le même que dans le groupe C. Il semble donc que l'apport de phytase se soit accompagné d'une diminution du GMQ, mais a en revanche permis d'atteindre un niveau de minéralisation osseuse similaire entre les lots Phyt et B en phase 1. Ce résultat est surprenant compte tenu que les besoins en P sont plus importants pour la minéralisation osseuse que pour les performances de croissance (NRC, 2012). En dégradant les phytates dans l'estomac, ces derniers ne sont plus susceptibles de former des complexes insolubles avec le Ca dans l'intestin, le rendant davantage disponible à l'absorption (Létourneau-Montminy *et al.*, 2010). Il est possible qu'un déséquilibre phosphocalcique ait pu se produire, avec par exemple un excès de Ca rendu disponible par la phytase dans l'intestin qui aurait conduit à la formation de complexes Ca-P insolubles (Heaney et Nordin, 2002 ; Selle *et al.*, 2009 ; Létourneau-Montminy *et al.*, 2010, 2012). Ces complexes auraient accentué la carence en P malgré l'amélioration de la digestibilité du P par la phytase.

À l'issue de la phase 1, les groupes Phyt et B présentaient une minéralisation osseuse plus faible que le groupe C en raison de la diminution de Ca et P dig ingérés. Le gain de CMO était également plus faible que celui du groupe C. Le CR du Pdig était quant à lui similaire dans les groupes Phyt et B et plus élevé que dans le groupe C, montrant une utilisation accrue du Pdig avec et sans phytase. Il en va de même pour le CR du Ca total.

Tableau 5 – Performances de croissance et de minéralisation osseuse des porcs en phase 3, selon les traitements

	Traitement					ETM ²	Valeurs de P			
							Réplétion		C-C-C vs C-N-C vs C-H-C Linéaire	C-C-C vs C-H-C Quadratique
	C-C-C	Phyt-Phyt	B-B-B	C-N-C	C-H-C					
Composition corporelle initiale										
PV ¹ , kg	108,9	108,2	108,1	110,3	109,6	0,5	0,71	0,65	0,50	0,66
CMO ¹ , g	1835	1883	1611	1817	1850	35	0,61	0,85	0,80	< 0,05
Composition corporelle finale										
PV ¹ , kg	131,6	130,3	130,8	135,2	134,6	0,6	0,51	0,11	0,22	0,68
CMO ¹ , g	2342	2515	1966	2558	2509	54	0,37	0,33	0,30	< 0,05
Performances										
GMQ ¹ , kg/j	1,11	1,08	1,11	1,22	1,20	0,02	0,65	0,22	0,34	0,97
CMJ ¹ , kg/j	3,88	3,69	4,75	4,04	4,06	0,04	0,15	0,18	0,55	0,33
EA ¹ , kg/j	286	292	297	302	297	5	0,74	0,54	0,46	0,53
Gain CMO ¹ , g/j	21,2	22,0	13,0	27,6	21,5	1,6	0,93	0,99	0,10	< 0,05
CR osseuse Pdig ¹ , %	54,0	48,7	45,3	56,1	43,3	3,2	0,66	0,32	0,32	0,43
CR osseuse CaTot ¹ , %	44,1	49,2	36,9	45,9	35,3	2,9	0,54	0,33	0,40	0,44

¹ PV : poids vif ; CMJ : consommation moyenne journalière ; GMQ : gain moyen quotidien ; EA : efficacité alimentaire ; CMO : contenu minéral osseux corporel ; CR : coefficient de rétention osseuse ; Pdig : phosphore digestible ; CaTot : Ca total.

² ETM : erreur-type à la moyenne, Analyse de variance avec le traitement en effet principal et le porc comme unité expérimentale (PV, GMQ, CMJ, EA) ou le porc (CMO, P, Ca, Gain CMO, Gain P, Gain Ca, CR Pdig, CR CaTot), et le test par contraste des effets linéaire et quadratique d'une réplétion (C-C-C vs Phyt-Phyt-Phyt et C-C-C vs C-N-C vs C-H-C) et d'une déplétion (C-C-C vs B-B-B).

En phase 2, le groupe B-B, déplété depuis environ 66 jours, n'a pas présenté de gain de CMO plus faible que le groupe C-C en raison de CR de Ca et de Pdig plus élevés que dans le groupe C-C. Ceci a été observé par Létourneau-Montminy *et al.* (2014) au niveau de la vertèbre à l'issue de 56 jours de déplétion, alors que Gonzalo *et al.* (2018) n'ont pas observé de rétention plus élevée ni dans le corps entier ni dans la vertèbre chez des animaux recevant des apports réduits en Ca et Pdig, durant quatre phases d'alimentation de 28 jours. L'augmentation de l'efficacité d'utilisation des deux minéraux est en accord avec une régulation davantage via le calcitriol, la molécule active de la vitamine D, qui est hyper-calcémiant et -phosphatémiant, contrairement à la PTH qui est hyper-calcémiant et hypophosphatémiant (Penido et Alon, 2012). Les résultats de Eklou-Kalonji *et al.* (1999) et Oster *et al.* (2016) montrent que la PTH peut être augmentée en 7 à 10 jours chez le porc alors que pour l'activation de la vitamine D 21 jours seraient nécessaires. Ceci pourrait expliquer le maintien d'une rétention en P et Ca similaire à celle du groupe C-C avec pourtant un apport en P et Ca environ 40% plus faible dans le groupe B-B. Ces résultats confirment qu'une déplétion peut entraîner une augmentation de l'efficacité de l'utilisation du P et du Ca. Cette augmentation ne persiste cependant pas dans le temps puisqu'en phase 3, le groupe B-B-B présentait un gain de CMO plus faible que les animaux C-C-C possiblement en raison d'une récupération du statut ou d'une carence induite moins importante dans cette phase de croissance.

Un autre type de déplétion était testé qui consistait à abaisser le P avec différents niveaux de Ca pour s'assurer d'induire des régulations permettant d'augmenter l'utilisation de P. Ainsi, le P était abaissé dans les groupes C-N et C-H avec deux niveaux de Ca différents. Les résultats ont montré un gain de CMO similaire entre les groupes C-C, C-N et C-H, ce qui laisse à penser que la déplétion n'a pas fonctionné. Cependant, le CR du Pdig était plus élevé dans les groupes C-N et C-H par rapport au groupe C-C, ce qui n'était pas le cas du CR du Ca. Ce résultat montre que l'utilisation du P a certainement été régulée grâce aux hormones. En effet, la déplétion était, dans les deux cas, plus forte en P qu'en Ca (60% du besoin en P contre 65 ou 80%

en Ca). Le CR du Ca inchangé pourrait indiquer que le Ca était tout simplement en excès du P pour le dépôt dans l'os.

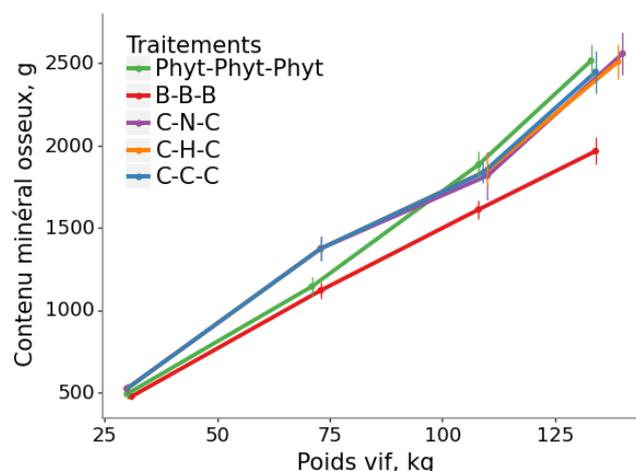


Figure 1 – Contenu minéral osseux selon le poids et le traitement

3.2. Effets d'une réplétion

La réplétion n'a pas eu d'effet sur les performances de croissance en accord avec les travaux de Létourneau-Montminy *et al.* (2014) et Gonzalo *et al.* (2018).

Pour le groupe Phyt, il était possible d'être au besoin sans phosphate dès la phase 2, les animaux étaient donc en situation de réplétion pendant cette phase tout comme ceux des groupes C-N-C et C-H-C qui retournaient sur l'aliment C en phase 3. Le groupe Phyt-Phyt avait un gain de CMO 32% plus élevé que le groupe C-C en phase 2, alors que les deux groupes recevaient des niveaux de Pdig et Ca identiques. Ce gain de CMO plus élevé a permis au groupe Phyt-Phyt de rattraper son retard de minéralisation osseuse pris en phase 1. Lors de la réplétion, les animaux du groupe Phyt-Phyt ont donc utilisé le Ca et P à leur disposition de façon plus efficace que le groupe C-C. Ceci est certainement à mettre en lien avec des régulations du métabolisme phosphocalcique.

L'efficacité d'utilisation du Pdig était plus importante dans les groupes Phyt-Phyt, C-N et C-H que dans le groupe C-C. Elle était aussi numériquement plus élevée dans le groupe C-N-C que le groupe C-C-C. Cette augmentation de l'efficacité d'utilisation du Pdig conduit à un CMO numériquement plus élevé en fin d'essai dans les trois groupes recevant une alimentation de déplétion-réplétion (Phyt-Phyt-Phyt, C-N-C et C-H-C) que dans le groupe témoin (C-C-C). Pour les groupes C-N-C et C-H-C, cette différence est due à un effet poids (Figure 1).

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le présent travail avait pour objectif l'étude de différentes stratégies de déplétion et réplétion visant à augmenter l'utilisation du phosphore. Les résultats montrent qu'il est possible d'atteindre le même niveau de minéralisation osseuse

et des performances de croissance assez comparables par différentes stratégies.

Une diminution du niveau de P total dans l'aliment d'environ 30% avec l'apport de phytase (Phyt-Phyt-Phyt) et de 8% avec la déplétion-réplétion (C-N-C et C-H-C) a été observée en conservant un même niveau de minéralisation osseuse. D'un point de vue environnemental, en considérant les CR du P, l'excrétion aurait été réduite de 56% avec la phytase et de 20% dans les groupes de déplétion-réplétion (C-N-C et C-H-C).

Les analyses plasmatiques des teneurs en Ca et P ainsi que des marqueurs osseux sont en cours et permettront de préciser la compréhension des stratégies qui ont été mises en place par les animaux et notamment de mieux ajuster les apports en Ca et P lors d'un apport de phytase pour s'assurer de maximiser les performances.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aiyangar A.K., Au A.G., Crenshaw T.D., Ploeg H.L., 2010. 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.
- Castaing J., Paboeuf F., Skiba F., Chauvel J., Cazaux J.G., van Milgen J., Jondreville C., 2003. Estimation du besoin en phosphore digestible apparent du porc charcutier : synthèse d'essais zootechniques effectués au cours des 10 dernières années. *Journées Rech. Porcine*, 35, 47-54.
- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. *Swine Nutrition*, Second Edition. Ed. A.J. Lewis and L.L. Southern. 187 p.
- 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.
- Gonzalo E., Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Bernier J.F., Pomar C., 2018. Consequences of dietary calcium and phosphorus depletion and repletion feeding sequences on growth performance and body composition of growing pigs. *Animal*, 12, 1165-1173.
- Gonzalo E., 2017. Consequences of a dietary phosphorus and calcium depletion and repletion strategy in growing-finishing pigs. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec, Canada, 176 p.
- Heaney R.P., Nordin B.E.C., 2002. Calcium effects on phosphorus absorption: Implications for the prevention and co-therapy of osteoporosis. *J. Am. Coll. Nutr.*, 21, 239-244.
- Langlois J., Pomar C., Létourneau-Montminy M.P., 2016. Estimation des besoins de phosphore et calcium chez le porc en début de croissance. *Journées Rech. Porcine*, 48, 163-164.
- Langlois J., Pomar C., Létourneau-Montminy M.P., 2016. Impact d'un déséquilibre phosphocalcique sur les performances zootechniques et la minéralisation osseuse chez le porc en finition. *Journées Rech. Porcine*, 48, 109-114.
- Lautrou M., Pomar C., Dourmad J.Y., Narcy A., Schmidely P., Létourneau-Montminy M.P., 2020. Phosphorus and calcium requirements for bone mineralisation of growing pigs predicted by mechanistic modelling. *Animal*, 14, s2, s313-s322.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Magnin M., Sauvart D., Bernier J.F., Pomar C., Jondreville C., 2010. Effect of reduced dietary calcium concentration and phytase supplementation on calcium and phosphorus utilization in weanling pigs with modified mineral status. *J. Anim. Sci.*, 88, 1706-1717.
- Létourneau-Montminy M.P., Lovatto P.A., Pomar C., 2014. Apparent total tract digestibility of dietary calcium and phosphorus and their efficiency in bone mineral retention are affected by body mineral status in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 92, 3914-3924.
- Létourneau-Montminy M.P., Couture C., Cloutier L., Marcoux M., Pomar C., 2017. Révision de la méthode du bilan alimentaire simplifié en phosphore chez le porc charcutier dans le contexte canadien de production. *Journées Rech. Porcine*, 49, 263-264.
- NRC (National Research Council), 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Ed. National Academies Press, Washington D.C. 400 pp.
- Oster M., Just F., Büsing K., Wolf P., Polley C., Vollmar B., Muráni E., Ponsuksili S., Wimmers K., 2016. Toward improved phosphorus efficiency in monogastrics—interplay of serum, minerals, bone, and immune system after divergent dietary phosphorus supply in swine. *Am. J. Physiol. Integr. Comp. Physiol.*, 310, R917-R925.
- Penido M.G., Alon U.S., 2012. Phosphate homeostasis and its role in bone health. *Pediatr. Nephrol.*, 27, 2039-2048.
- Pomar C., Jondreville C., Dourmad J.Y., Bernier J.F., 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, 209-216.
- Pomar C., Rivest J., 1996. The effect of body position and data analysis on the estimation of body composition of pigs by dual energy x-ray absorptiometry (DEXA). In: Proceedings of the 46th Annual conference of the Canadian Society of Animal Science, Lethbridge, Alberta, July 7-11, page 26 (Abstr).
- Selle P.H., Cowieson A.J., Ravindran V., 2009. Consequences of calcium interactions with phytate and phytase for poultry and pigs. *Livest. Sci.*, 124, 126-141.
- 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.