

Impact du déoxynivalénol et de l'ajout de phytase dans un protocole de déplétion et réplétion en calcium chez le porcelet

Béatrice SAUVÉ, Frédéric GUAY, Marie-Pierre LÉTOURNEAU MONTMINY

Département des sciences animales, Université Laval, 2425 rue de l'Agriculture, Québec (QC), Canada, G1V 0A6

marie-pierre.letourneau-montminy@fsaa.ulaval.ca

Impact du déoxynivalénol et de l'ajout de phytase dans un protocole de déplétion et réplétion en calcium chez le porcelet

La présente étude visait à étudier différents facteurs de modulation de l'utilisation du phosphore (P) que sont les apports de calcium (Ca) et de phytase et la contamination au déoxynivalénol (DON). Quatre-vingts porcelets répartis en 8 blocs ont reçu l'un des 5 traitements suivants durant une première phase de 13 jours : les traitements témoin (DON-) et contaminé au DON (DON+, 2,72 mg/kg d'aliment) apportant des niveaux bas (Ca-, 0,39%) ou non (Ca+, 0,65%) de Ca avec un niveau de phosphore (P) digestible constant (0,40%) et un 5^{ème} traitement (Phyt) qui était iso P et Ca avec le Ca+ avec 750 FTU/kg de phytase. Durant la seconde phase de 14 jours, les porcelets recevant les 4 premiers traitements (Ca+, Ca-, DON- et DON+) ont tous reçu un aliment avec les mêmes niveaux de Ca (0,65%) et P digestible (0,35%) sans contamination au DON. Les porcs recevant de la phytase en phase 1 ont continué d'en recevoir (Phyt). Les traitements Phyt ont été analysés séparément des traitements DON. En plus des performances de croissance et du coefficient d'utilisation digestive (CUD) du Ca et du P, le contenu minéral osseux (CMO) d'un porcelet par case a été mesuré au début de l'essai et après chaque phase. Après la phase 1, l'indice de conversion était inférieur pour Ca- ($P < 0,01$) et Phyt ($P = 0,02$) comparativement au Ca+. Le CUD du P était supérieur pour le traitement DON+ recevant Ca- (Interaction DON x Ca, $P < 0,01$) et le CUD du Ca était supérieur pour DON+ ($P < 0,001$). Le CUD du P et du Ca était supérieur pour Phyt ($P < 0,001$ et $0,01$). Le CMO était plus faible chez les Ca- et supérieur chez les Ca+ avec DON+ (Interaction DON x Ca, $P < 0,001$). Le ratio Ca/P plasmatique était augmenté pour Phyt ($P = 0,02$). Après la phase 2, le gain moyen quotidien ($P = 0,08$) des porcelets Ca- tendait à être inférieur au Ca+. Contrairement aux porcs du lot Ca- avec DON+ (Interaction DON x Ca, $P = 0,06$), les Ca-DON- ont rattrapé leur déficit en CMO. Le ratio Ca/P plasmatique était encore supérieur pour Phyt ($P = 0,03$). Les résultats montrent que les porcelets peuvent rattraper le déficit de minéralisation osseuse induit par la déplétion s'ils ne recevaient pas un aliment contaminé au DON. Les porcelets Phyt présentaient des résultats de performance et de minéralisation osseuse similaires au Ca+ sans toutefois être différents des Ca-.

Impact of DON and phytase inclusion in a protocol of calcium depletion and repletion in piglets

This study aimed to evaluate factors that modulate phosphorus (P) use, such as calcium (Ca) intake, deoxynivalenol (DON) contamination and phytase supplementation. A total of 80 piglets received one of 5 treatments distributed into 8 blocks during an initial 13-day phase; 4 of the treatments were the control (DON-) or DON-contaminated treatment (DON+, 2.72 mg/kg) with either a low Ca (Ca-, 0.39%) or normal Ca (Ca+, 0.65%) level with a constant digestible P level (0.40%). The fifth treatment (Phyt) was iso P and Ca with Ca+ with 750 FTU/kg of phytase. During a second 14-day phase, the piglets that received Ca+ and Ca- were fed a similar diet containing 0.65% Ca and 0.35% P without DON contamination. Piglets that received phytase in phase 1 continued to receive it (Phyt). Growth performance and total tract digestibility (TTD) of Ca and P for all piglets and bone mineral content (BMC) of one pig per pen were evaluated at the start of the trial and after each phase. After phase 1, the feed conversion ratio was lower for Ca- ($P < 0.01$) and Phyt ($P = 0.02$) than for Ca+. The TTD of P was higher for Ca- with DON+ (DON x Ca interaction, $P < 0.01$) and Phyt ($P < 0.001$). The TTD of Ca was higher for DON+ ($P < 0.001$) and Phyt ($P < 0,01$). The BMC was lower for Ca- and even lower for Ca- with DON+ (DON x Ca interaction, $P < 0,001$). The Ca:P plasma ratio was higher for Phyt ($P = 0.02$). After phase 2, the average daily gain ($P = 0.08$) tended to be lower for Ca- than for Ca+. Ca- piglets regained their BMC deficit, although those that received Ca- with DON+ remained lower (DON x Ca interaction, $P = 0.06$). The Ca:P plasma ratio remained higher for Phyt ($P = 0.03$). The results show that piglets can regain the bone mineralization deficit caused by Ca depletion if they did not receive DON contaminated feed. The Phyt piglets showed similar growth performances and BMC to those of Ca+, although they were not different from Ca- piglets.

1. INTRODUCTION

Dans le contexte d'un prix variable de vente des porcs et d'une hausse du coût des aliments, la réduction du coût de production et principalement des aliments est un défi constant pour les producteurs (Centre de Développement du Porc du Québec, 2019). Afin de diminuer ces coûts, les ingrédients des aliments peuvent être diversifiés avec des grains et des coproduits parfois de moindre qualité. Ces aliments peuvent ainsi être contaminés avec des mycotoxines. Une des mycotoxines les plus répandues dans les aliments est le déoxyvalénol (DON) qui est produite par un champignon du genre *Fusarium*. Le DON est un métabolite secondaire qui contamine le blé, le maïs, l'orge et l'avoine (Döll *et al.*, 2009). Chez le porc, il est connu que le DON à concentration supérieure à 1,0 mg/kg (Accensi *et al.*, 2006) entraîne une anorexie, une diminution de la croissance (Etienne, 2007 ; Bonnet *et al.*, 2012) et peut également modifier le métabolisme phosphocalcique à concentration de 4,0 mg/kg (Sauvé *et al.*, 2021 ; Le Thanh *et al.*, 2015).

Un autre enjeu économique et environnemental de la production porcine est la gestion du phosphore (P) un élément essentiel tant pour les animaux que pour les plantes qu'il est primordial d'utiliser judicieusement. En effet, les phosphates minéraux sont une ressource non renouvelable (Cordell et White, 2013 ; Dourmad *et al.*, 2020). Le protocole de déplétion et réplétion permet de déclencher des régulations durant la phase de déplétion afin d'entraîner des régulations chez le porc par les principales hormones régulatrices et ainsi améliorer l'efficacité d'utilisation de ces deux éléments (Létourneau-Montminy *et al.*, 2011). En effet, le métabolisme phosphocalcique est finement régulé par la parathormone (PTH), la calcitonine et la vitamine D (Courbebaisse et Souberbielle, 2011 ; Karsdal *et al.*, 2008). Une seconde solution pour améliorer l'utilisation du P provenant des ingrédients est de compléter l'aliment en phytase qui permet l'hydrolyse du phytate en P disponible (Lautrou *et al.*, 2021).

L'objectif de ce travail était donc d'évaluer l'impact d'une stratégie de déplétion-réplétion en présence du DON sur les performances de croissance, le métabolisme phosphocalcique et les capacités de rattraper la minéralisation osseuse. Un second objectif consistait à évaluer l'impact de l'ajout de phytase sur les performances de croissance, le dépôt osseux et le métabolisme phosphocalcique.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Animaux et plan expérimental

Le projet a été autorisé par le comité de protection des animaux de l'Université Laval (CPAUL). Quatre-vingts porcelets mâles castrés et sevrés à 42 jours d'âge ($15,9 \pm 1,99$ kg) ont été divisés en 40 cases selon leur poids (2 porcelets/case) en 8 blocs et alimentés en 2 phases avec des aliments maïs tourteau de soja comprenant 30% de blé. Dans la première phase de déplétion de 13 jours, les 4 premiers aliments étaient un factoriel 2 x 2 pour les traitements témoin (DON-, 0,31 mg/kg) et contaminé au DON (DON+, 2,72 mg/kg) provenant de blé naturellement contaminé, Aflatoxines <1,0 µg/kg, Zearalénone <0,03 mg/kg, Fumonisine <0,1 mg/kg, ochratoxine <0,003 mg/kg, toxine T-2 <0,06 mg/kg) croisés avec les traitements carencés (Ca-, 0,39%) ou non (Ca+, 0,65%) en calcium avec un niveau de phosphore digestible constant (0,40%). Le 5^{ème} traitement (Phyt) apportait

750 FTU/kg de phytase en considérant les équivalences P digestible et Ca total recommandées (Ca 1,39 kg/g ; P digestible 1,26 kg/g). Chaque traitement était répété dans 8 cases. Durant la seconde phase d'une durée de 14 jours, les porcelets recevant les traitements Ca+ et Ca- avec ou sans DON ont tous reçu un aliment avec les mêmes niveaux de Ca (0,65%) et P digestible (0,35%) sans contamination au DON dit de "réplétion". Les porcs recevant de la phytase en phase 1 ont continué d'en recevoir en phase 2 (Phyt). Tous les porcelets ont été pesés au début de l'essai et ensuite au jour 8, 13, 21 et 27 et la consommation mesurée sur les mêmes périodes par l'évaluation des refus quotidiens. Le contenu minéral osseux (CMO) d'un porcelet entier par case choisi aléatoirement a été évalué au début de l'essai, après la première phase (J13) et après la seconde phase (J27) par ostéodensitométrie à doubles rayons-X (DXA, Hologic Discovery W, Hologic Inc., Waltham, MA). Le gain osseux a été calculé à partir du CMO, soit le gain de CMO quotidien (CMO/j) divisé par le gain moyen quotidien (GMQ) en pourcentage.

2.2. Analyse de la digestibilité

Un marqueur indigestible (célite, cendre insoluble 3%) dont le taux de récupération se situe entre 87 et 105% chez le porc (Huang *et al.*, 2018) a été ajouté au régime expérimental et des fèces ont été collectées aux J12 et J26 par collecte partielle des 40 parcs. Les fèces ont été lyophilisées sur une période de 7 jours. Les cendres insolubles (0,50 g) ont été évaluées selon la méthode de McCarthy *et al.* (1974).

2.3. Analyse des échantillons sanguins

Des prises de sang (plasma) ont été réalisées sur un porcelet par parc (40) au début de l'essai, après la première phase et après la deuxième phase. Ces échantillons sanguins ont été analysés pour les concentrations de phosphate, de Ca et de magnésium (Mg) par spectrométrie à plasma à couplage inductif.

2.4. Statistiques

Les données ont été analysées selon une ANOVA de modèle mixed sur le logiciel Minitab (Minitab 2021, LLC, State College, PA, USA) avec le bloc comme le facteur aléatoire. Le test LSD de Fisher a permis la comparaison des moyennes. L'unité expérimentale était la case de deux porcelets et les variables fixes étaient l'apport en Ca et la contamination au DON. Une expérience factorielle de 2 x 2 (Ca x DON) sans la phytase pour les paramètres à l'étude a permis d'évaluer les effets de la déplétion-réplétion en Ca et du DON ainsi que leurs interactions. Une autre ANOVA de modèle mixed a aussi servi à analyser les effets de la déplétion-réplétion en Ca et de l'ajout de phytase en utilisant les données Ca+ et Ca- sans le DON. L'unité expérimentale était la case de deux porcelets avec le bloc comme facteur aléatoire et les différents apports en Ca comme variables fixes. Les différences ont été considérées comme significatives avec $P < 0,05$ et les tendances avec $P < 0,10$.

3. RESULTATS

3.1. Phase de déplétion en calcium

3.1.1. Effet de la déplétion en calcium et de la contamination en DON

La consommation moyenne journalière (CMJ) tendait à être diminuée chez les porcelets recevant le Ca- (Tableau 1, $P = 0,06$).

Leur indice de conversion (IC) était inférieur comparativement au Ca+ et les DON- tendaient à avoir un IC plus élevé (interaction DON x Ca, $P = 0,07$; Tableau 1). De plus, la contamination au DON n'a pas affecté pas les performances de croissance (GMQ, CMJ, IC et poids final). Le CUD du Ca était plus élevé chez les porcelets du lot DON+ ($P < 0,001$). Le CUD du P était plus élevé chez les porcelets du lot DON+ recevant Ca- (interaction Ca x DON, $P < 0,01$). Le gain osseux ((CMO/j)/GMQ) des porcelets Ca- était inférieur au Ca+ ($P < 0,001$). Le CMO des porcelets Ca+DON+ avait le CMO le plus élevé (interaction Ca x DON, $P < 0,001$). Les porcelets Ca- avaient une concentration de P plasmatique plus élevée par rapport au Ca+ ($P = 0,05$). Les autres paramètres sanguins ne présentaient pas de différences significatives et aucune interaction n'a été notée.

3.1.2. Effet de la phytase

L'IC était réduit chez les Phyt et Ca- (Tableau 2, $P = 0,02$). Les porcelets Phyt avaient un CUD plus élevé pour le Ca ($P < 0,01$) et le P ($P < 0,001$). Le gain osseux et le CMO ($P = 0,10$) des Ca- tendaient à être diminués par rapport au Ca+ avec une valeur

intermédiaire pour Phyt. Le ratio Ca/P plasmatique était augmenté pour Phyt comparativement aux Ca+ et Ca- ($P = 0,02$). La concentration en P plasmatique tendait à être augmentée pour les porcs du lot Ca- comparativement au lot Phyt. La valeur pour le groupe Ca+ était intermédiaire ($P = 0,06$).

3.2. Phase de réplétion

3.2.1. Effet de la déplétion en calcium et de DON

Le GMQ, le poids final et la CMJ tendaient à être inférieurs pour les porcelets Ca- (Tableau 1, $P = 0,08$ et $0,09$). Le GMQ tendait à être plus élevé pour DON+ ($P = 0,06$). Le CUD du Ca et du P était inférieur chez les Ca+ que s'ils recevaient DON- (Interaction DON x Ca, $P = 0,06$, $0,04$). Le gain osseux était inférieur pour les porcelets DON+ comparativement au DON- ($P < 0,01$). Les porcelets Ca- ont rattrapé leur déficit en CMO alors que ceux recevant DON+ tendaient à demeurer inférieurs (Interaction DON x Ca, $P = 0,06$). La concentration de P et de Mg plasmatique était plus élevée pour les porcelets Ca- ($P = 0,05$) alors que leur ratio Ca/P ($P = 0,02$) était plus faible.

Tableau 1 – Effet de la carence en Ca et de la contamination au DON et de leur interaction sur les performances de croissance, la digestibilité, le dépôt osseux ainsi que la concentration plasmatique de calcium, phosphore et magnésium.¹

Paramètres	Ca+		Ca-		SEM	Valeur de P		
	DON-	DON+	DON-	DON+		Ca	DON	DON x Ca
Nb de cases	8	8	8	8				
Phase 1								
<i>Performances</i>								
GMQ, kg/j	1,41	1,44	1,45	1,31	0,04	0,42	0,27	0,13
CMJ, kg/j	2,37	2,31	2,25	2,06	0,09	0,06	0,18	0,59
IC	1,71 ^A	1,60 ^{AB}	1,57 ^B	1,55 ^B	0,04	0,007	0,26	0,07
Poids vif initial, kg	16,3	16,2	15,8	16,2	0,65	0,35	0,67	0,50
Poids vif final, kg	26,1	26,3	26,0	25,4	0,83	0,29	0,63	0,39
CUD Ca, %	54,9 ^B	66,1 ^A	54,9 ^B	75,1 ^A	3,49	0,34	0,001	0,10
CUD P, %	58,2 ^c	63,1 ^b	57,7 ^c	68,9 ^a	1,19	0,02	0,001	0,009
CMO, g	356,8 ^b	382,0 ^a	334,5 ^c	304,8 ^d	7,90	0,001	0,75	0,001
Gain osseux, %	0,73 ^a	0,74 ^a	0,58 ^b	0,47 ^b	0,04	0,001	0,21	0,17
<i>Plasma</i>								
Ca, mg/mL	128,8	126,6	129,5	130,1	1,42	0,28	0,67	0,49
P, mg/mL	115,2 ^b	116,5 ^b	120,3 ^a	122,9 ^a	3,77	0,05	0,49	0,82
Mg, mg/mL	17,9	17,6	17,9	18,3	0,30	0,49	0,97	0,41
Ca/P	1,11	1,09	1,08	1,63	0,02	0,24	0,60	0,95
Phase 2								
<i>Performances</i>								
GMQ, kg/j	1,91	1,98	1,79	1,92	0,03	0,08	0,06	0,55
CMJ, kg/j	3,26	3,35	3,13	3,15	0,06	0,09	0,58	0,73
IC	1,71	1,69	1,75	1,65	0,03	0,90	0,19	0,42
Poids final, kg	39,4	40,2	38,5	38,8	1,06	0,09	0,43	0,70
CUD Ca, %	57,8 ^B	67,7 ^A	68,5 ^A	66,9 ^A	2,76	0,10	0,18	0,06
CUD P, %	45,6 ^b	60,6 ^a	54,0 ^{ab}	51,7 ^{ab}	4,01	0,96	0,12	0,04
CMO, g	459,0 ^A	463,0 ^A	450,0 ^A	396,3 ^B	11,39	0,02	0,11	0,06
Gain osseux, %	0,47 ^a	0,42 ^b	0,46 ^a	0,34 ^b	0,03	0,16	0,005	0,31
<i>Plasma</i>								
Ca, mg/mL	124,9	127,1	128,6	125,3	1,58	0,33	0,45	0,20
P, mg/mL	109,0 ^b	106,9 ^b	116,9 ^a	115,1 ^a	3,07	0,05	0,63	0,97
Mg, mg/mL	15,3 ^b	15,9 ^b	16,5 ^a	16,4 ^a	0,32	0,05	0,60	0,44
Ca/P	1,16 ^a	1,19 ^a	1,14 ^b	1,08 ^b	0,02	0,02	0,64	0,15

Ca+ : calcium normal, Ca- : carence en calcium, DON- : Témoin, DON+ : déoxyynivalénol, GMQ : gain moyen quotidien, IC : indice de conversion, CMJ : consommation moyenne journalière, CUD : coefficient d'utilisation digestive, CMO : contenu minéral osseux, Ca : calcium, P : phosphore, Mg : magnésium

¹Les valeurs correspondent aux moyennes ajustées

Les lettres majuscules indiquent une tendance ($P < 0,10$) pour les interactions Ca x DON

Tableau 2 – Effet de la carence en Ca et de l'ajout du phytase sur les performances de croissance, la digestibilité, le dépôt osseux ainsi que la concentration plasmatique de calcium et phosphore.¹

Paramètres	Ca+	Phyt	Ca-	SEM	Valeur de P
Nbre de cases	8	8	8		
Phase 1					
<i>Performances</i>					
GMQ, kg/j	1,42	1,37	1,45	0,05	0,54
CMJ, kg/j	2,35	2,14	2,25	0,10	0,28
IC	1,67 ^a	1,54 ^b	1,55 ^b	0,04	0,02
Poids vif final, kg	15,4	15,7	15,5	0,69	0,75
Poids final, kg	26,0	25,4	26,0	0,87	0,50
CUD Ca, %	55,3 ^b	72,6 ^a	52,3 ^b	4,94	0,01
CUD P, %	58,3 ^b	70,1 ^a	57,7 ^b	1,77	0,001
CMO, g	356,8	346,3	334,5	11,12	0,10
Gain osseux, %	0,73	0,63	0,58	0,05	0,10
<i>Plasma</i>					
Ca, mg/L	131,5	132,8	129,5	2,64	0,68
P, mg/L	115,2	113,4	120,3	2,08	0,06
Ca/P	1,11 ^b	1,17 ^a	1,08 ^b	0,02	0,02
Phase 2					
<i>Performances</i>					
GMQ, kg/j	1,90	1,87	1,79	0,06	0,32
CMJ, kg/j	3,22	3,16	3,13	0,14	0,80
IC	1,71	1,67	1,75	0,04	0,30
Poids final, kg	39,2	38,6	38,5	1,21	0,73
CUD Ca, %	57,5	52,9	68,5	5,34	0,09
CUD P, %	42,0	51,7	54,0	5,94	0,42
CMO, g	459,0	480,1	449,9	18,15	0,28
Gain osseux, %	0,47	0,49	0,46	0,03	0,71
<i>Plasma</i>					
Ca, mg/L	124,49	131,23	131,82	3,45	0,10
P, mg/L	112,64	106,49	116,79	4,36	0,24
Ca/P	1,13 ^b	1,24 ^a	1,13 ^b	0,04	0,03

Ca+ : calcium normal, Phyt : Phytase, Ca- : carence en calcium, GMQ : gain moyen quotidien, IC : indice de conversion, CMJ : consommation moyenne journalière, CUD : coefficient d'utilisation digestive, CMO : contenu minéral osseux, Ca : calcium, P : phosphore

¹Les valeurs correspondent aux moyennes ajustées

3.2.2. Effet de la phytase

Les performances de croissance et la minéralisation osseuse n'ont pas été affectées par les traitements alimentaires. Le CUD du Ca tendait à être augmenté pour Ca- en comparaison à Phyt alors qu'il était intermédiaire pour Ca+ (Tableau 2, $P = 0,09$). Le ratio Ca/P plasmatique était plus élevé pour Phyt ($P = 0,03$) et le Ca plasmatique tendait à être augmentée pour Ca- et Phyt comparativement à Ca+ ($P = 0,10$).

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer différentes stratégies pour optimiser l'utilisation de P chez les porcelets en termes de performances de croissance, de dépôt osseux et de métabolisme phosphocalcique. Plus précisément, compte tenu d'essais précédents montrant qu'il était possible d'activer les régulations phosphocalciques d'une part par une stratégie de déplétion-réplétion (Létourneau-Montminy *et al.*, 2014 ; Gonzalo *et al.*, 2017) et d'autre part par l'ajout de DON (Sauvé *et al.*, 2021) ces deux stratégies ont été testées. Enfin, à titre de stratégie reconnue, mais peu documenter chez le porcelet, l'ajout de phytase a été testé sur les mêmes paramètres.

4.1. Phase de déplétion en Ca

Durant la phase de déplétion, la carence en Ca a diminué la consommation alimentaire tout en diminuant l'indice de conversion des jeunes porcs. Des études ont observé qu'une période de carence en Ca diminuait la croissance (Lagos *et al.*, 2019) et le poids vif (Gonzalo, 2017) sur des porcs en pouponnière et en début de phase de croissance alors que d'autres études n'ont observé aucun effet (Bai *et al.*, 2017 ; Merriman *et al.*, 2017) sur des porcs en finition. Généralement, la contamination au DON entraîne une diminution de la croissance et de la consommation alimentaire à un seuil de 2,0 mg/kg jusqu'à 1,0 mg/kg (Etienne, 2007; Lessard *et al.*, 2015). Le DON n'a toutefois pas changé les performances de croissance dans cette étude comme cela a déjà été observé auparavant (Accensi *et al.*, 2006; Le Thanh *et al.*, 2016) ce qui peut être expliqué par la courte période d'exposition.

La minéralisation osseuse a été diminuée par la carence en Ca tel qu'attendu (Aiyangar *et al.*, 2010; Bai *et al.*, 2017; Gonzalo, 2017). La carence en Ca aurait provoqué un déséquilibre phosphocalcique qui aurait mené à la hausse du P

plasmatique sous l'action de la PTH (Létourneau-Montminy *et al.*, 2011). De plus, l'ajout de DON à l'alimentation a accentué ce déséquilibre en réduisant la déposition osseuse. Chez la souris, le DON induit l'apoptose des ostéoblastes ce qui inhiberait le dépôt osseux (Wu *et al.*, 2018). Au contraire, avec un niveau de Ca normal, le DON a augmenté la minéralisation osseuse. En fait, la contamination au DON a aussi augmenté la digestibilité du Ca et du P ce qui a pu rendre plus de Ca et de P disponibles pour la déposition. Cet effet pourrait être lié au récepteur sensible au Ca qui induit des changements dans la sécrétion de calcitonine, de PTH et de vitamine D (Karsdal *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2016). La production de vitamine D active augmente sous l'effet de la PTH et de la carence en Ca ce qui augmente l'absorption intestinale du Ca et du P (Courbebaïsse et Souberbielle, 2011). Le DON pourrait ainsi modifier le métabolisme de la vitamine D. Le DON affecte aussi la perméabilité membranaire de la barrière intestinale entre autres par la diminution de la fonction des protéines des jonctions serrées claudines (Pinton *et al.*, 2010), mais aucune étude n'ont porté spécifiquement sur la modification de la digestibilité du Ca et du P par le DON.

4.2. Phase de réplétion

Durant la phase de réplétion, les porcelets ayant été carencés en Ca tendaient à avoir des performances de croissances inférieures. Gonzalo (2017) a également observé qu'une carence en Ca chez des porcs en croissance diminuait la croissance dès la première phase et même après deux phases de réplétion. Néanmoins, l'absorption intestinale du Ca et du P était supérieure pour les porcelets Ca- comparativement aux porcelets recevant Ca+ sans DON. Certaines études ont observé une augmentation de l'efficacité d'utilisation du Ca et du P après une période de carence (Sommerville *et al.*, 1985; Saddoris *et al.*, 2010). La concentration de P et de Mg plasmatique était également plus élevée après la carence en Ca ce qui pourrait indiquer une résorption osseuse accrue, ces deux minéraux étant déposés dans l'os avec le Ca. Le DON a aussi augmenté la croissance et l'absorption intestinale du Ca et du P durant la phase de réplétion. L'augmentation de la rétention et de la digestibilité du Ca par le DON a été observé précédemment, mais pas pour le P (Le Thanh *et al.*, 2015). Dans cette étude, les porcelets recevant un aliment davantage contaminé au DON (4 mg/kg) avaient une consommation et une croissance inférieures ce qui pourrait expliquer des différences le P étant moins régulé que le Ca.

Les porcelets Ca- avaient un gain osseux semblable au Ca+ et ceux recevant DON- ont rattrapé leur déficit en minéralisation osseuse en 2 semaines (Figure 1). La minéralisation osseuse est un processus lent dépendant de la durée de la carence et de l'âge des animaux. Malgré un gain osseux semblable au témoin, des porcelets n'ont pas pu rattraper leur déficit en minéralisation osseuse après une carence en Ca sur une période de 4 semaines dans l'étude d'Aiyangar *et al.* (2010) alors que des porcs en finition ont rattrapé ce déficit après 30 jours dans l'étude de Bai *et al.* (2017). Au contraire, l'exposition préalable au DON a diminué le gain osseux et les porcelets carencés n'ont pas rattrapé leur déficit en minéralisation osseuse (Figure 1) dans la seconde phase. Peu d'études portent sur l'impact du DON sur le métabolisme osseux et aucune n'a été évaluée lors d'une carence en Ca. D'autres analyses sont en cours pour l'expression de gènes liés au métabolisme phosphocalcique dans le rein, le jéjunum et le fémur.

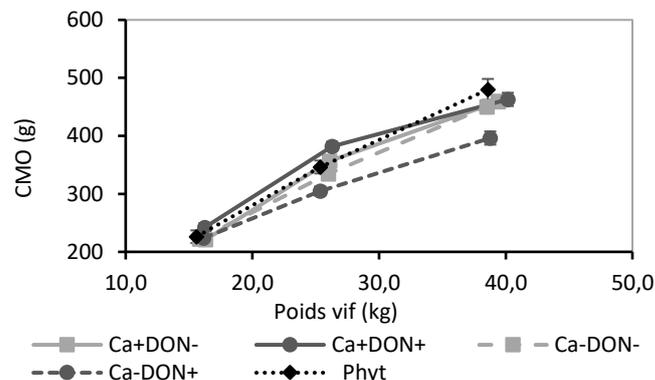


Figure 1– Évolution du contenu minéral osseux (CMO, g) en fonction du poids vif (kg) pour les deux phases combinées.

4.3. Effet de la phytase chez le porcelet

La phytase a été ajoutée en considérant les matrices recommandées de remplacement de P digestible et Ca total. Les aliments étaient ainsi iso Ca et P. Les analyses d'activité phytasique ont montrées que le blé ajouté apportait environ 500 FTU/kg alors que la phytase apportait 1400 FTU/kg plutôt que 750 FTU/kg dans les deux phases. L'ajout de phytase a amélioré l'indice de conversion et augmenté la digestibilité du Ca et du P, alors que le gain de CMO et le CMO étaient similaires au Ca+ durant la première phase. En effet, la phytase libère le P et le Ca lié au phytate en hydrolysant ce dernier en phosphate ce qui augmente son absorption intestinale (Arredondo *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2020). Les porcs recevant la phytase avaient des performances de croissance et une minéralisation similaire au Ca+ dans la seconde phase. Dans les deux phases, l'ajout de phytase a diminué le P plasmatique et augmenté le ratio Ca/P plasmatique ce qui indique qu'elle a probablement apporté un surplus de Ca par rapport au P. Le Ca plasmatique n'était pas différent en première phase, étant généralement régulé plus étroitement que le P. Un niveau de Ca trop élevé peut former des complexes avec le phytate et les phosphates (Selle *et al.*, 2009) et conduire à une carence en P (Lagos *et al.*, 2021). Il sera intéressant de mieux comprendre le déséquilibre phosphocalcique induit par l'ajout de phytase.

CONCLUSION

La déplétion en Ca a entraîné des régulations du métabolisme phosphocalcique afin de libérer le Ca contenu dans l'os vers la circulation sanguine simultanément avec le P, bien que seul le P plasmatique était plus élevé. La contamination au DON a induit un déséquilibre de la déposition osseuse dépendamment du niveau de Ca des aliments en plus d'augmenter l'absorption intestinale du Ca et du P ce qui suggère que DON agit sur les régulateurs phosphocalciques et de la vitamine D. Durant la réplétion, la déplétion préalable a permis une augmentation de l'efficacité d'utilisation du Ca et du P permettant de rattraper le déficit de minéralisation osseuse sauf chez les porcelets contaminés au DON. En effet, 14 jours après le retrait du DON dans l'alimentation, le dépôt osseux était inférieur chez les Ca-DON+. D'autres analyses en cours permettront de mieux comprendre la régulation des gènes liés au métabolisme phosphocalcique et osseux par le DON. Finalement, l'ajout de phytase a augmenté l'absorption intestinale du Ca et du P après 13 jours. Le ratio Ca/P plasmatique était néanmoins plus élevé ce qui peut supposer que la phytase apportait un surplus de Ca.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Accensi F., Pinton P., Callu P., Abella-Bourges N., Guelfi J.-F., Grosjean F., Oswald I.P., 2006. Ingestion of low doses of deoxynivalenol does not affect hematological, biochemical, or immune responses of piglets. *J. Anim. Sci.*, 84, 1935-1942.
- 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.
- Arredondo M.A., Casas G.A., Stein H.H., 2019. Increasing levels of microbial phytase increases the digestibility of energy and minerals in diets fed to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 248, 27-36.
- Bai L.L., Wu F., Liu H., Zhang L., Zhang S., Liu L., Piao X.S., Liu Y.H., Thacker P.A., Wang F.L., 2017. Effects of dietary calcium levels on growth performance and bone characteristics in pigs in grower-finisher-transitional phase. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 224, 59-65.
- Bonnet M.S., Roux J., Mounien L., Dallaporta M., Troadec J.-D., 2012. Advances in deoxynivalenol toxicity mechanisms: The brain as a target. *Toxins*, 4, 1120-1138.
- Centre de développement du porc du Québec, 2019. Site web: <http://www.cdpq.ca/cdpq.ca/files/df/dfc46284-d3a1-48d1-9339-70ce1e7fe5b4.pdf>. Page consultée en août 2020.
- Cordell D., White S., 2013. Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. *Agronomy*, 3, 86-116.
- Courbebaisse M., Souberbielle J. C., 2011. Équilibre phosphocalcique : régulation et explorations. *Néphrol. Thérapeutique*, 7, 118-138.
- Döll S., Schrickx J.A., Dänicke S., Fink-Gremmels J., 2009. Interactions of deoxynivalenol and lipopolysaccharides on cytokine excretion and mRNA expression in porcine hepatocytes and Kupffer cell enriched hepatocyte cultures. *Toxicol. Lett.*, 190, 96-105.
- Dourmad J.-Y., Boudon A., Narcy A., 2020. Le phosphore dans les systèmes d'élevage. *INRA Prod. Anim.*, 33 (1), 31-40.
- Etienne M., 2007. Synthèse - Effets biologiques et physiologiques d'une mycotoxine, le deoxynivalenol (DON), chez le porc. *Journées Rech. Porcine*, 39, 407-418.
- Gonzalo Martinez E., Létourneau Montminy M.-P., Pomar C., Létourneau Montminy M.-P., Pomar C., 2017. Consequences of a dietary phosphorus and calcium depletion and repletion strategy in growing-finishing pigs. Université Laval, Québec
- Huang C., Li P., Ma X., Jaworski N.W., Stein H.H., Lai C., Zhao J., Zhang S., 2018. Methodology effects on determining the energy concentration and the apparent total tract digestibility of components in diets fed to growing pigs. *Asian-Australas J Anim Sci*, 31, 1315-1324.
- Karsdal M.A.D., Henriksen K., Arnold M., Christiansen C., 2008. Calcitonin — A drug of the past or for the future? : Physiologic inhibition of bone resorption while sustaining osteoclast numbers improves bone quality. *BioDrugs*, 22, 137-144.
- Lagos L.V., Lee S.A., Bedford M.R., Stein H.H., 2021. Formulating diets based on digestible calcium instead of total calcium does not affect growth performance or carcass characteristics, but microbial phytase ameliorates bone resorption caused by low calcium in diets fed to pigs from 11 to 130 kg. *J. Anim. Sci.*, 99 (3).
- Lagos L.V., Murphy M.R., Looor J.J., Stein H.H., Lee S.A., Fondevila G., Walk C.L., 2019. Influence of the concentration of dietary digestible calcium on growth performance, bone mineralization, plasma calcium, and abundance of genes involved in intestinal absorption of calcium in pigs from 11 to 22 kg fed diets with different concentrations of digestible phosphorus. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 10 (47).
- Lautrou M., Pomar C., Schmidely P., Montminy M.-P.L., 2021. Effets d'une déplétion-réplétion en phosphore et calcium sur les performances et la minéralisation osseuse des porcs en croissance *Journées de la Rech. Porcine*, 53, 163-168.
- Le Thanh B.V., Lessard M., Chorfi Y., Guay F., 2015. The efficacy of anti-mycotoxin feed additives in preventing the adverse effects of wheat naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on performance, intestinal barrier function and nutrient digestibility and retention in weanling pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 95, 197-209.
- Le Thanh B.V., Lemay M., Bastien A., Lapointe J., Lessard M., Chorfi Y., Guay F., 2016. The potential effects of antioxidant feed additives in mitigating the adverse effects of corn naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on antioxidant systems in the intestinal mucosa, plasma, and liver in weaned pigs. *Mycotoxin Res.*, 32, 99-116.
- Lessard M., Savard C., Deschene K., Lauzon K., Pinilla V.A., Gagnon C.A., Lapointe J., Guay F., Chorfi Y., 2015. Impact of deoxynivalenol (DON) contaminated feed on intestinal integrity and immune response in swine. *Food Chem Toxicol*, 80, 7-16.
- Létourneau-Montminy M.-P., Lovatto P.-A., Pomar C., 2011. Effets d'un protocole de déplétion-réplétion en phosphore et calcium sur l'utilisation digestive et métabolique de phosphore et de calcium chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 43, 87-94.
- 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.
- Merriman L.A., Walk C.L., Murphy M.R., Parsons C.M., Stein H.H., 2017. Inclusion of excess dietary calcium in diets for 100- to 130-kg growing pigs reduces feed intake and daily gain if dietary phosphorus is at or below the requirement. *J. Anim. Sci.*, 95, 5439-5446.
- Pinton P., Braicu C., Nougayrede J.-P., Laffitte J., Taranu I., Oswald I.P., 2010. Deoxynivalenol Impairs Porcine Intestinal Barrier Function and Decreases the Protein Expression of Claudin-4 through a Mitogen-Activated Protein Kinase-Dependent Mechanism. *The Journal of Nutrition*, 140, 1956-1962.
- Ren P., Blavi L., González-Vega C., Liu Y., Hancock D., Vazquez-Añón M., Almeida F.N., Stein H.H., 2020. Effects of a novel *E. coli* phytase expressed in *Pseudomonas fluorescens* on growth, bone mineralization, and nutrient digestibility in pigs fed corn-soybean meal diets. *Transl. Anim. Sci.*, 4 : txa201.
- Saddoris 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.
- Sauvé B., Chorfi Y., Létourneau-Montminy M.-P., Guay F., 2021. Effet d'une supplémentation en vitamine D sur la réponse du métabolisme phosphocalcique de porcelets recevant un aliment contaminé au déoxynivaléno. *Journées de la Rech. Porcine*, 53, 381-386.
- Selle P. H., Cowieson A. J., and Ravindran V., 2009. Consequences of calcium interactions with phytate and phytase for poultry and pigs. *Livest. Sci.* 124, 126-141.
- Sommerville B.A., Maunder 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 Metab Res*, 17, 78-81.
- Wu H., Sun X., Zhang Z., Zhuang D., Wang Y., Li X., Yu G., Lv G., Wang N., Li Q., Wang C.H., Yu A., Zhao Y., 2018. Deoxynivalenol impairs proliferation and induces apoptosis in primary murine osteoblasts. *Toxicol Environ Chem.*, 100, 214-227.
- Wu W., Zhou H.-R., Bursian S.J., Link J.E., Pestka J.J., 2016. Calcium-Sensing Receptor and Transient Receptor Ankyrin-1 mediate emesis induction by deoxynivalenol (vomitoxin). *Toxicol. Sci.*, 155, 32-42.