



Cinétique de la minéralisation osseuse de truies primipares en fonction de l'apport en phosphore et en calcium alimentaire durant la lactation

Julien HEURTAULT (1,2), Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (2), Patrick SCHLEGEL (1)

(1) Agroscope, Unité de recherche porcine, 1725 Posieux, Suisse

(2) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, Canada, G1V 1A6

patrick.schlegel@agroscope.admin.ch

Cinétique de la minéralisation osseuse de truies primipares en fonction de l'apport en phosphore et en calcium alimentaire durant la lactation

Dans le contexte d'une alimentation minérale visant une efficacité d'utilisation maximale du phosphore (P), l'objectif de cette étude était d'évaluer la capacité des truies primipares à compenser, lors de la gestation suivante, un déficit de minéralisation osseuse durant la lactation, dû à un apport faible en calcium (Ca) et en P. Le contenu minéral osseux (CMO) du corps entier de 24 truies primipares a été mesuré par absorptiométrie aux rayons X (DXA) à 2, 14, 26, 66 et 106 jours après la mise-bas. Quatre aliments de lactation étaient formulés pour couvrir les besoins nutritionnels, excepté en Ca et en P digestible (P dig) : témoin sans phytase (100 ; 3,0 g de P dig, 9,9 g de Ca /kg), carencé à 25 % sans phytase (75 ; 2,3 g de P dig, 8,3 g de Ca /kg), carencé à 50 % sans phytase (50 ; 1,5 g de P dig, 6,0 g de Ca /kg), carencé à 50 % avec phytase (50+Phyt ; 3,0 g de P dig, 7,6 g de Ca /kg). L'aliment de gestation était formulé pour couvrir les besoins nutritionnels en Ca et en P dig (2,6 g de P dig, 8,2 g de Ca /kg). Pendant la lactation, le CMO (en g/kg de poids vif, PV) tendait à être plus faible pour les truies du traitement 50 comparé au traitement 100 (effet linéaire x temps quadratique, $P = 0,05$). Pendant la gestation, le CMO (en g et en g/kg PV) était similaire pour les traitements alimentaires. Ainsi, les truies du traitement 50 ont réussi à rattraper leur déminéralisation osseuse pendant la gestation. Le CMO (en g et en g/kg PV) était similaire pour les traitements 100 et 50+Phyt durant toute la période expérimentale (effet phytase, $P > 0,05$). Ces résultats montrent le potentiel de réduction du P dans l'aliment de lactation sans modifier les performances de portée et met en avant la capacité des truies primipares à mobiliser les réserves minérales osseuses durant la lactation et à les récupérer pendant la gestation qui suit.

Dynamics of bone mineralization in primiparous sows as a function of dietary phosphorus and calcium during lactation

In the context of aiming to maximize efficiency of dietary phosphorus (P) use, the objective of this study was to evaluate the ability of primiparous sows to compensate, during the following gestation, a bone-mineralization deficit during lactation due to low calcium (Ca) and P intake. The bone mineral content (BMC) of 24 primiparous sows was measured by X-ray absorptiometry (DXA) on days 2, 14, 26, 66, and 106 after parturition. Four lactation diets were formulated to cover all nutritional requirements except for Ca and digestible P (P dig): control without phytase (100; 3.0 g P dig, 9.9 g Ca/kg), 25% deficient without phytase (75; 2.3 g P dig, 8.3 g Ca/kg), 50% deficient without phytase (50; 1.5 g P dig, 6.0 g Ca/kg), and 50% deficient with phytase (50+Phyt; 3.0 g P dig, 7.6 g Ca/kg). The gestation diet was formulated to cover nutritional requirements of Ca and P dig (2.6 g P dig, 8.2 g Ca/kg). During lactation, sow BMC (in g/kg of body weight, BW) tended to be lower in treatment 50 than in treatment 100 (linear effect x time quadratic, $P=0.05$). During gestation, the BMC (in g and in g/kg BW) was similar between the treatments. Therefore, sows in treatment 50 were able to recover their bone-mineralization deficit during the next gestation. The BMC (in g and in g/kg BW) was similar between treatments 100 and treatment 50+Phyt (phytase effect, $P>0.05$) for the entire experimental period. These results show the potential to reduce dietary P in lactation without decreasing litter performance and highlight the ability of primiparous sows to use bone mineral reserves during lactation and to rebuild them during gestation.

INTRODUCTION

Le phosphore (P) est indispensable au développement et au maintien de la minéralisation du squelette (Crenshaw, 2001). A ce jour, l'utilisation du P en agriculture est au cœur d'enjeux économiques, considérant les ressources limitées et non renouvelables du phosphate inorganique, et d'enjeux environnementaux, considérant les excès de P comme fertilisant dans certaines régions (Dourmad *et al.*, 2020). Dans ce contexte, la recherche s'oriente vers une alimentation minérale visant une efficacité d'utilisation maximale du P avec un apport minimal en phosphates issus de sources minérales.

Cependant, une fine connaissance du besoin de P est nécessaire pour optimiser l'utilisation du P, ce qui n'est pas le cas chez la truie qui a été largement moins étudiée que le porc en croissance. De récents travaux ont montré que des cochettes (de 100 à 140 kg de poids vif, PV) ayant été préalablement carencées en P digestible (P dig) et calcium (Ca, de 60 à 100 kg PV) ont réussi, en l'espace de 2 à 4 semaines, à accroître leur minéralisation osseuse pour atteindre celle des animaux qui n'ont pas connu de période de carence (Floradin *et al.*, 2022), ceci en lien avec la régulation du métabolisme phosphocalcique de l'animal. Cette capacité de résilience n'est à ce jour pas considérée dans la détermination du besoin alimentaire en P et Ca chez la truie tout au long de son cycle. Or, la truie connaît, durant son cycle de reproduction, une période de fort besoin en P et Ca (lactation) et une période de besoin plus faible en P et Ca (gestation). Une meilleure connaissance des quantités de P et Ca mobilisables à partir des réserves osseuses permettrait de développer de nouvelles stratégies d'alimentation incluant la capacité de récupération de l'animal, et possiblement une baisse substantielle de l'apport en P sous forme de phosphates. Par ailleurs, les conséquences d'une forte mobilisation osseuse de la truie sont à notre connaissance peu documentées. Une des stratégies pour éviter une forte déminéralisation osseuse serait l'ajout de phytase. En effet, cette enzyme est aujourd'hui couramment ajoutée dans les aliments des truies pour augmenter la digestibilité du P alimentaire, mais les études demeurent limitées notamment en termes de minéralisation osseuse. Les objectifs de l'étude étaient d'évaluer la cinétique de minéralisation osseuse durant la lactation et la gestation suivante en fonction de l'apport en P dig et en Ca durant la lactation, et d'évaluer la capacité de la phytase exogène à compenser une éventuelle déminéralisation durant la lactation.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et régimes expérimentaux

Un total de 24 truies nullipares Grand Porc Blanc Suisse ont été nourries selon un programme en deux phases (lactation et gestation suivante). En phase de lactation, les animaux ont été répartis uniformément entre quatre régimes alimentaires en fonction de la date de mise bas prévue, du poids à 110 jours de gestation ($226 \pm 11,9$ kg) et de l'âge à la saillie ($268 \pm 26,6$ jours). Les régimes expérimentaux distribués *ad libitum* (Tableau 1) étaient formulés pour couvrir les besoins nutritionnels, excepté ceux en Ca et en P dig : témoin sans phytase (100 ; 3,0 g de P dig, 9,9 g de Ca /kg), carencé à 25 % sans phytase (75 ; 2,3 g de P dig, 8,3 g de Ca /kg), carencé à 50 % sans phytase (50 ; 1,5 g de P dig, 6,0 g de Ca /kg), carencé à 50 % avec phytase (50+Phyt ; 3,0 g de P dig, 7,6 g de Ca /kg ; 500 FTU/kg de 6-phytase (Quantum Blue 5G, AB Vista)). En phase de gestation, un seul aliment était distribué. Pendant la première semaine après le

sevrage, toutes les truies recevaient la même quantité d'aliment qui variait de 1 à 4,5 kg/j. Puis jusqu'au 80^{ème} jour de gestation, la quantité distribuée était fixe mais dépendait du PV, de la note d'état corporel et du nombre de porcelets souhaité à la mise bas. L'aliment était formulé pour couvrir les besoins nutritionnels selon les apports recommandés (Agroscope, 2004 ; Bikker et Blok, 2017 pour le Ca et le P dig), et était dépourvu de phytase exogène. Deux jours après la mise bas, les portées ont été égalisées à 13 porcelets.

1.2. Mesures

Un total de 19 échantillons d'aliment en phase de lactation et 63 échantillons en phase de gestation ont été prélevés et homogénéisés en pools d'échantillons par traitement. La consommation moyenne journalière (CMJ) individuelle a été enregistrée à chaque visite au distributeur d'aliment pour toute la durée de l'essai (Schauer Spotmix (lactation), Schauer Compident VI (gestation), Agrotonic GmbH, Prambachkirchen, Autriche). Le contenu minéral osseux (CMO) a été mesuré sur chaque truie 2, 14, 26 (sevrage), 66 (40^{ème} jour de gestation) et 106 (80^{ème} jour de gestation) jours après la mise bas par absorptiométrie aux rayons X (DXA, i-DXA, GE Medical Systems, Glattsburg, Switzerland). Afin d'éviter tout mouvement lors des acquisitions d'image, les animaux ont eu une injection sous-cutanée d'azapérone (40,0 mg de sedanol, Streuli pharma, Suisse) puis étaient soumis à une sédation de courte durée par inhalation au masque d'isoflurane (max. 5 % seul dans de l'oxygène, Isoflo, Abbott Laboratories, North Chicago, USA). Les animaux étaient placés sur le DXA en position ventrale, les pattes avant et arrière étendues. Le mode d'acquisition utilisé dans le logiciel Encore (version 18) était le mode « thick ». Les images ont été traitées afin d'éliminer les artéfacts (masque et tube de l'appareil de sédation) et les délimitations des régions d'intérêt ont été placées comme décrit par Kasper *et al.* (2021). Des échantillons de sang ont été prélevés à l'oreille 2, 14, 26, 66 et 106 jours après la mise bas. Le propeptide C-terminal du collagène de type I (CICP), marqueur de formation osseuse, et le telopeptide C-terminal du collagène de type I (CTX), marqueur de résorption osseuse, ont été analysés à chaque stade. La vitamine 1-25(OH)₂D₃ a été analysée au 2^{ème} et au 26^{ème} jour après la mise bas. A ce stade, les truies ont eu une injection sous-cutanée d'ocytocine (2 ml, Intertocine-S, MSD Animal Health) pour faciliter le prélèvement d'un échantillon de lait. Les porcelets ont été pesés aux 1 et 14 jours après la mise bas et au sevrage, et le gain moyen quotidien (GMQ) par porcelet a été calculé.

1.3. Analyses chimiques des échantillons

La teneur en matière sèche des échantillons d'aliments a été déterminée par chauffage à 105°C pendant 3 h (AOAC International, 2005 ; méthode no : 930.15). La teneur en matière azotée est calculée en multipliant par 6,25 la teneur en N déterminée par la méthode Dumas (ISO 16634-1) à l'aide d'un analyseur automatique (TruMac CNS, Leco, Mönchengladbach, Allemagne). Les teneurs en P et Ca alimentaires ont été déterminées après digestion et solubilisation des cendres à l'aide d'un spectromètre d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES, Optima 7300 DV, Perkin-Elmer, Schwerzenbach, Suisse). Les teneurs en P phytique et l'activité phytasique alimentaires ont été déterminées telles que décrites par Schlegel et Gutwiller (2017). Dans le sérum sanguin, le marqueur de la formation osseuse (CICP) a été mesuré à l'aide d'un kit ELISA (MicroVue PICP EIA, Quidel) et le marqueur de

Tableau 1 –Aliments expérimentaux

| Stade Traitements | Lactation | | | | Gestation |
|--|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
| | 100 | 75 | 50 | 50+Phyt | |
| Ingrédient, % | | | | | |
| Orge | 45 | 45 | 45 | 45 | 31 |
| Avoine | | | | | 10 |
| Blé | | | | | 10 |
| Maïs | 22 | 22 | 22 | 22 | |
| Amidon de blé | 0,50 | 1,95 | 3,41 | 3,40 | |
| Graisse | 3,35 | 2,78 | 2,20 | 2,20 | 1,58 |
| Protéine de pomme de terre | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | |
| Tourteau de soja | 10,9 | 10,8 | 10,7 | 10,7 | 5,8 |
| Tourteau de colza | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Tourteau de lin/son de blé/marc de pomme | | | | | 2/10/7,5 |
| Pulpe de betteraves déshydratée | 3 | 3 | 3 | 3 | 14 |
| L-Lysine-HCl | 0,272 | 0,274 | 0,276 | 0,276 | 0,117 |
| L-Thréonine | 0,058 | 0,059 | 0,060 | 0,060 | 0,071 |
| L-Tryptophane | 0,023 | 0,024 | 0,024 | 0,024 | |
| Phosphate monocalcique | 1,095 | 0,683 | 0,271 | 0,271 | 0,591 |
| Carbonate de calcium | 1,318 | 0,925 | 0,532 | 0,532 | 1,124 |
| Chlorure de sodium | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 0,361 |
| Liant (Pellan) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Marqueur indigestible (célite) | 2 | 2 | 2 | 2 | |
| Prémix minéral et vitaminique ¹ | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Phytase ² | | | | 0,01 | |
| Composition chimique analysée | | | | | |
| Matière sèche, g/kg | 898 | 899 | 900 | 898 | 896 |
| Matière azotée, g/kg | 174 | 175 | 177 | 176 | 142 |
| Calcium (Ca), g/kg | 9,9 | 8,3 | 6,0 | 7,6 ² | 8,2 |
| Phosphore (P), g/kg | 5,9 | 5,3 | 4,3 | 4,2 | 5,7 |
| P phytique, g/kg | 2,6 | 2,6 | 2,2 | 2,4 | 3,0 |
| P digestible, g/kg ³ | 3,0 | 2,3 | 1,5 | 3,0 ² | 2,6 |
| Ca : P digestible | 3,3 | 3,6 | 4,0 | 2,5 | 3,2 |
| Activité phytasique, FTU | 218 | 208 | 198 | 849 | 378 |
| Energie digestible, MJ/kg³ | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 12,1 |

¹Apport par kg d'aliment : 7 mg Cu, 40 mg Fe, 20 mg Mn, 55 mg Zn, 0,55 mg I, 0,20 mg Se, 8000 IU vitamine A, 800 IU vitamine D₃, 300 mg choline, 2 mg vitamine B₁, 5 mg vitamine B₂, 4 mg vitamine B₆, 20 mg niacine, 0,02 mg vitamine B₁₂, 21 mg acide pantothénique, 0,10 mg biotine, 1,5 mg acide folique, 40 mg vitamine E, 2,0 mg vitamine K₃.

²0,01 % de Quantum Blue 5G (100 g/t) correspondant à 500 FTU/kg avec une équivalence de 1,5 g P dig et 1,65 g Ca par kg d'aliment. ³Valeurs de granulés calculées selon Agroscope (2004).

résorption osseuse (CTX) a été analysé avec un kit ELISA (Novus Biologicals, Centennial, USA). La limite de détection la plus basse était de 0,2 ng/ml pour le CICP et de 0,19 ng/ml pour le CTX. La concentration sérique de 1,25(OH)₂D₃ a été mesurée à l'aide de kits ELISA (kit 2112, Immundiagnostik, Bensheim, Allemagne). Les teneurs en P et en Ca du lait ont été analysées comme précédemment décrites pour la teneur en P et en Ca alimentaires.

1.4. Statistiques

Les unités expérimentales étaient la truie et la portée. Les données ont été analysées avec le logiciel SAS (v9.4., Inst.Inc., Cary, NC). Les données de performances des porcelets en maternité ont été analysées à l'aide d'un modèle mixte comportant le traitement en effet fixe et la truie en effet aléatoire. La CMJ des truies a été analysée par un modèle linéaire incluant le traitement en effet fixe. Le CMO, les marqueurs sanguins (CICP et CTX), les teneurs en P et Ca du lait, et la concentration en vitamine 1-25(OH)₂D₃ ont été analysés par contraste. L'effet phytase a été étudié par contraste linéaire entre le traitement 100 et 50+phyt. Les traitements 100, 75, et 50 ont été étudiés par un effet linéaire (100, 50) et un effet

quadratique (100, 75, 50). Le temps a été étudié par un contraste linéaire (Temps linéaire) et quadratique (Temps quadratique). Les différences ont été considérées comme significatives lorsque *P*-value < 0,05 et une tendance était notée lorsque *P*-value était comprise entre 0,05 et 0,10.

2. RESULTATS

L'expérience s'est déroulée comme prévu. Néanmoins, au 2^{ème} jour de lactation, deux truies appartenant aux traitements 50 et 75 et au 14^{ème} jour de lactation deux truies appartenant aux traitements 50 et 50+Phyt n'ont pas été scannées en raison d'un DXA non fonctionnel. De plus, comme le prélèvement sanguin était réalisé lors des mesures DXA, les deux échantillons des truies non scannées n'ont pas été collectés au 14^{ème} jour de lactation. Le prélèvement sanguin des truies des traitements 50 et 75 au 2^{ème} jour de lactation a été réalisé dans la veine jugulaire. Aucun porcelet n'est mort sous la mère.

2.1. Ingestion et production laitière de la truie

La CMJ des truies durant la phase de lactation (6,2 ± 0,59 kg) et gestation (3,0 ± 0,79 kg) était similaire entre les régimes

alimentaires. La teneur en Ca du lait des truies du traitement 50 tendait à être supérieure comparée au traitement témoin (effet linéaire, $P = 0,06$; Tableau 2). Par contre, la teneur en P du lait des truies du traitement 50 était supérieure comparée au témoin (effet linéaire, $P < 0,05$; Tableau 2).

2.2. Performances des porcelets

La taille de la portée à la mise bas ($12,8 \pm 0,5$ porcelets nés totaux), le poids des porcelets au 1^{er} ($1,44 \pm 0,16$ kg), 14^{ème} ($4,80 \pm 0,72$ kg) et 26^{ème} jour d'âge ($6,97 \pm 0,84$ kg) et le GMQ des porcelets au cours de la lactation (209 ± 31 g/j) étaient similaires entre les traitements alimentaires ($P > 0,05$).

2.3. Analyses sanguines

Les traitements alimentaires n'ont pas eu d'effet sur les concentrations de CTX (Figure 3) et de $1-25(\text{OH})_2\text{D}_3$ (Figure 4). Toutefois, numériquement, la concentration de $1-25(\text{OH})_2\text{D}_3$ a augmenté durant la lactation indépendamment des traitements. La concentration en CICP évoluait quadratiquement en fonction du temps (temps quadratique, $P < 0,05$; Figure 5). La concentration de CICP tendait à augmenter à la fin de la lactation.

2.4. Contenu minéral osseux

Le PV de la truie était similaire entre les traitements à chaque stade (effet linéaire, $P > 0,05$; effet quadratique, $P > 0,05$; effet phytase, $P > 0,05$). Le PV diminuait pendant la lactation et augmentait pendant la gestation suivante (temps quadratique, $P < 0,05$). Indépendamment des traitements, le CMO (en g) diminuait pendant la lactation et augmentait pendant la gestation suivante (temps quadratique, $P < 0,05$). Le CMO (en g

et g/kg PV) des truies du traitement 75 n'était pas différent du CMO des truies recevant le traitement 100 et 50 (effet quadratique, $P > 0,05$). Cependant, le CMO (en g/kg PV) des truies du traitement 50 tendait à plus fortement diminuer que le CMO des truies du traitement 100 (effet linéaire, $P < 0,05$; effet linéaire x temps quadratique, $P = 0,05$). En revanche, la déminéralisation des truies du traitement 50 au sevrage a été comblée pendant la gestation suivante (effet linéaire x temps linéaire, $P > 0,05$). Le CMO (en g et g/kg PV) des truies du traitement 50+Phyt n'était pas différent de celui des truies du traitement 100 (effet phytase, $P > 0,05$) en fin de gestation.

3. DISCUSSION

3.1. Lactation : phase de déminéralisation

En lactation, le maintien de la production laitière est indispensable à une croissance rapide de la portée (Tokach *et al.*, 2019). Cependant, les besoins nutritifs pour la production laitière ne sont pas uniquement couverts par l'apport alimentaire. En effet, le maintien de la teneur en acides gras et en protéines du lait est permis par une mobilisation des réserves de graisses et de protéines corporelles (Tokach *et al.*, 2019). Les résultats de cette expérience ont montré que le CMO des truies primipares du traitement 50 diminue durant la lactation. Ceci est en accord avec de précédentes études (Mahan et Fetter, 1982 ; Giesmann *et al.*, 1998), et peut s'expliquer par la mise en place d'une régulation homéostatique en réponse à une augmentation du besoin physiologique de P et Ca durant la lactation. La régulation phosphocalcique est contrôlée par plusieurs hormones. Une diminution du Ca au niveau extracellulaire entraîne une augmentation de la sécrétion de parathormone (PTH), alors qu'une diminution du P

Tableau 2 - Effet du traitement alimentaire sur le poids vif, le contenu minéral osseux, et les teneurs en P et Ca du lait

| Variables | Traitements | | | | ECT | Effets et contrastes |
|---|-------------|-------|-------|---------|-------|---|
| | 100 | 75 | 50 | 50+Phyt | | |
| PV, kg | | | | | | |
| 2 ^{ème} jour (après la mise bas) | 201,9 | 200,9 | 198,9 | 203,7 | 12,22 | Temps : a*, b* |
| 14 ^{ème} jour | 187,8 | 195,1 | 190,3 | 192,1 | 13,36 | Phyt : c ^{NS} , d ^{NS} , e ^{NS} |
| 26 ^{ème} jour | 179,8 | 180,1 | 175,1 | 181,5 | 13,11 | Lin : f ^{NS} , g ^{NS} , h ^{NS} , |
| 66 ^{ème} jour | 206,1 | 206,5 | 205,5 | 210,8 | 12,91 | Quad : i ^{NS} , j ^{NS} , k ^{NS} |
| 106 ^{ème} jour | 234,2 | 234,2 | 243,3 | 241,2 | 13,66 | |
| CMO, g | | | | | | |
| 2 ^{ème} jour | 4847 | 4728 | 4765 | 4959 | 506 | Temps : a*, b* |
| 14 ^{ème} jour | 4603 | 4481 | 4011 | 4626 | 574 | Phyt : c ^{NS} , d ^{NS} , e ^{NS} |
| 26 ^{ème} jour | 4343 | 4225 | 3694 | 4363 | 570 | Lin : f ^{NS} , g ^{NS} , h† |
| 66 ^{ème} jour | 5300 | 5218 | 4976 | 5453 | 573 | Quad : i ^{NS} , j ^{NS} , k ^{NS} |
| 106 ^{ème} jour | 6443 | 6155 | 6120 | 6440 | 601 | |
| CMO, g/kg PV | | | | | | |
| 2 ^{ème} jour | 24,02 | 23,48 | 23,31 | 23,88 | 1,87 | Temps : a*, b ^{NS} |
| 14 ^{ème} jour | 24,55 | 22,94 | 21,48 | 24,04 | 2,28 | Phyt : c ^{NS} , d ^{NS} , e ^{NS} |
| 26 ^{ème} jour | 24,16 | 23,37 | 21,06 | 23,96 | 2,14 | Lin : f*, g ^{NS} , h† |
| 66 ^{ème} jour | 26,24 | 25,18 | 24,25 | 25,79 | 2,02 | Quad : i ^{NS} , j ^{NS} , k ^{NS} |
| 106 ^{ème} jour | 26,91 | 26,20 | 25,20 | 26,68 | 1,95 | |
| Phosphore, mg/kg lait | | | | | | |
| 26 ^{ème} jour | 1368 | 1441 | 1558 | 1373 | 109 | Phyt : c ^{NS} , Lin : f*, Quad : i ^{NS} |
| Calcium, mg/kg lait | | | | | | |
| 26 ^{ème} jour | 1980 | 2218 | 1955 | 2250 | 260 | Phyt : c ^{NS} , Lin : f†, Quad : i ^{NS} |

¹ECT : écart-type, PV : poids vif, CMO : contenu minéral osseux, Phyt : contraste phytase, Lin : contraste linéaire, Quad : contraste quadratique ; effets a : temps linéaire, b : temps quadratique, c : phytase, d : phytase x temps linéaire, e : phytase x temps quadratique, f : linéaire, g : linéaire x temps linéaire, h : linéaire x temps quadratique, i : quadratique, j : quadratique x temps linéaire, k : quadratique x temps quadratique ; $P \leq 0,10^*$; $P \leq 0,05^*$; $P > 0,10^{NS}$ (non significatif).

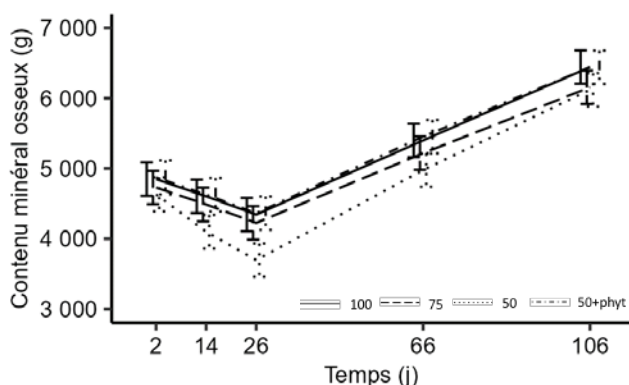


Figure 1 – Evolution du contenu minéral osseux (g) par traitement alimentaire en fonction du temps¹

¹100 : 100 % des besoins en Ca et en P, 75 : 75 % des besoins en Ca et en P, 50 : 50 % des besoins en Ca et en P, 50+Phyt : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase, données ajustées.

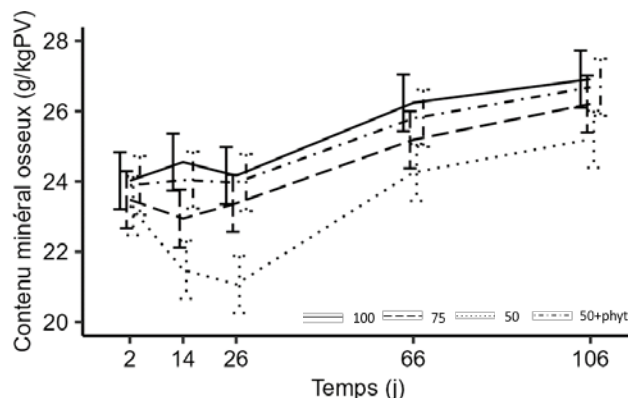


Figure 2 – Evolution du contenu minéral osseux (g/kg PV) par traitement alimentaire en fonction du temps¹

¹100 : 100 % des besoins en Ca et en P, 75 : 75 % des besoins en Ca et en P, 50 : 50 % des besoins en Ca et en P, 50+Phyt : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase, données ajustées.

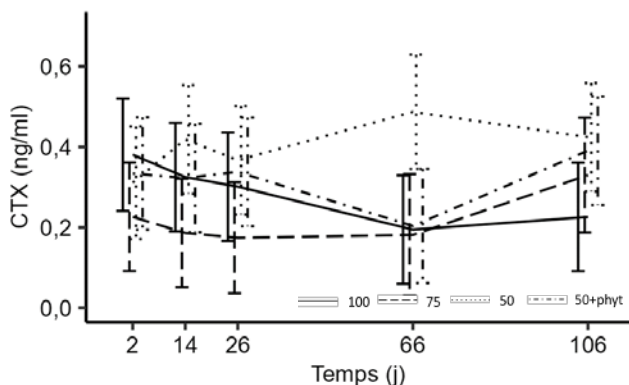


Figure 3 – Evolution de la teneur en CTX circulant (ng/ml) par traitement alimentaire en fonction du temps¹

¹100 : 100 % des besoins en Ca et en P, 75 : 75 % des besoins en Ca et en P, 50 : 50 % des besoins en Ca et en P, 50+Phyt : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase; aucun contraste significatif, données ajustées.

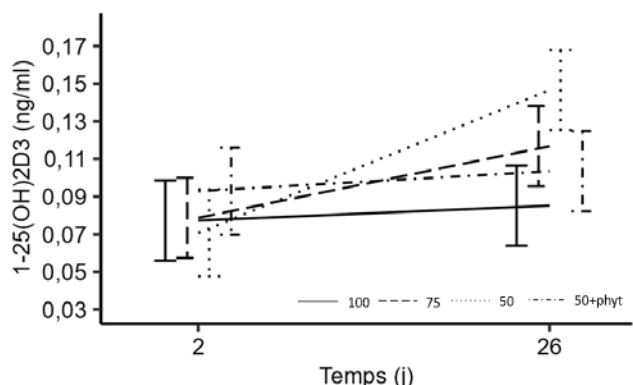


Figure 4 – Evolution de la teneur en 1-25(OH)₂D₃ circulant (ng/ml) par traitement alimentaire en fonction du temps¹

¹100 : 100 % des besoins en Ca et en P, 75 : 75 % des besoins en Ca et en P, 50 : 50 % des besoins en Ca et en P, 50+Phyt : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase ; aucun contraste significatif, données ajustées.

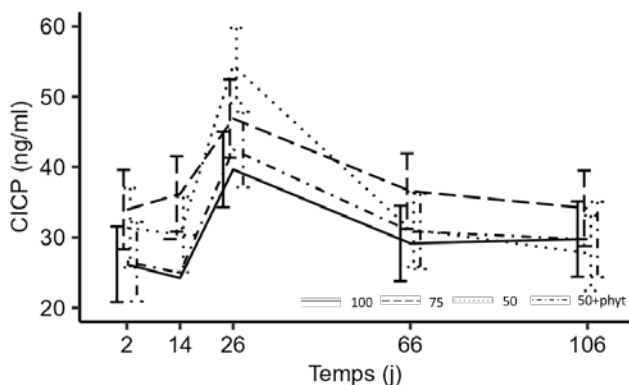


Figure 5 – Evolution de la teneur en CIGP circulant (ng/ml) par traitement alimentaire en fonction du temps¹

¹100 : 100 % des besoins en Ca et en P, 75 : 75 % des besoins en Ca et en P, 50 : 50 % des besoins en Ca et en P, 50+Phyt : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase; temps quadratique : P-value < 0,05 ; autres contrastes non significatif, données ajustées.

entraînera une augmentation de la formation de la 1-25(OH)₂D₃ (Crenshaw *et al.*, 2011 ; Wubuli *et al.*, 2020). Ainsi, au regard de notre étude, l'augmentation numérique de la concentration de la 1-25(OH)₂D₃ sérique durant la lactation est en accord avec la diminution du CMO quel que soit le traitement et induirait le maintien de la teneur en P et Ca du lait. En effet, les concentrations en Ca et en P dans le lait ne semblent pas être diminuées par l'ingestion d'une quantité insuffisante de Ca et P. Ce résultat est partagé par de précédentes études (Maxson et

Mahan, 1986 ; Mahan et Vallet, 1997). De plus, l'expérience a montré que les performances zootechniques de la portée étaient similaires entre les différents traitements alimentaires.

3.2. Gestation suivante : phase de reminéralisation

Le CMO des truies primipares augmente durant la gestation indépendamment des niveaux de P alimentaires appliqués pendant la lactation, ce qui est en accord avec les résultats d'une étude de Giesemann *et al.* (1988). Ce résultat est appuyé par l'augmentation numérique de la concentration de CIGP à la fin de la lactation. D'après une étude de Grez-Capdeville et Crenshaw (2021), ce pic de CIGP en fin de lactation pourrait s'expliquer par une reprise de l'activité ostéoblastique pour compenser la résorption osseuse durant la lactation. Ce pic est néanmoins plus important chez les truies carencées en P (50 et 75). Les résultats obtenus par Rodehutsord *et al.* (1999) permettent d'expliquer la compensation du déficit osseux au 40^{ème} de gestation chez les truies du lot 50. En effet, ces auteurs ont montré que la relation entre l'apport en P et l'absorption de P n'est pas linéaire et que des ajustements de l'absorption de P se produisent en fonction des besoins des tissus post-absorbants. Ainsi, une explication probable est que la réponse de l'absorption du P serait liée au besoin de remobilisation minérale des os. La truie serait alors en mesure d'utiliser ses réserves osseuses pour couvrir les besoins en P et Ca élevés durant la lactation, puis de reconstruire ses réserves osseuses durant la gestation suivante, lorsque le besoin en P et Ca est

plus faible, mais néanmoins important pour la reminéralisation. Ce résultat est appuyé par une étude récente de Floradin *et al.* (2022) menée sur des cochettes de remplacement. En effet, ils montrent qu'une réduction de l'apport de P digestible dans l'aliment pour des animaux de 60 à 100 kg de PV permet de s'affranchir de l'utilisation de phosphates inorganiques sans affecter les performances de croissance, malgré une forte déminéralisation osseuse. Lorsque les cochettes atteignaient le poids de saillie (140 kg), toutes alimentées depuis 100 kg PV avec un même aliment, celles ayant été déminéralisées présentaient un même CMO que les animaux n'ayant pas connu de période de déplétion. Enfin, il est intéressant de noter que l'aliment formulé à 50 % des besoins en P dig et en Ca ne contient que 0,27 g de phosphate inorganique par kg d'aliment. Ainsi, il faut souligner la possibilité de réduire drastiquement l'apport de phosphates dans l'aliment de lactation sans pour autant impacter les performances zootechniques de la portée et la capacité de la truie à refaire ses réserves osseuses lors de la gestation suivante. Néanmoins, le suivi sur plusieurs gestations serait important avant de recommander une telle pratique.

3.3. La phytase exogène

Pendant la lactation et la gestation, le CMO (en g/kg PV) n'est pas différent entre les truies recevant l'aliment formulé à 50 % des besoins en P dig et en Ca et disposant de 500 FTU de phytase et l'aliment formulé à 100 % des besoins en P dig et en Ca. Ceci est observé en utilisant la matrice phytase développée chez le porc en croissance, soit 1,5 g/kg de P digestible et 1,65 g/kg de Ca. Ce résultat est en accord avec une récente étude de Zhai *et al.* (2021) sur les truies qui montre que l'utilisation de la phytase augmente la digestibilité du Ca et du P.

Il est intéressant de noter que l'apport de phytase pourrait être une alternative durable pour optimiser l'utilisation du P des matières premières.

CONCLUSION

Les résultats de l'étude confirment la possibilité de limiter l'utilisation de phosphate inorganique dans l'aliment de lactation sans induire d'effets néfastes sur les performances de la portée. En effet, la capacité de puiser dans ses réserves minérales osseuses dont fait montre la truie permet de satisfaire son besoin élevé de P et Ca durant la lactation et d'éviter une baisse de la concentration en P et Ca du lait. Ce résultat est également vérifié pour une réduction de moitié des apports en P dig et Ca. De plus, le déficit de minéralisation osseuse durant la lactation est compensé lors de la gestation suivante lorsque les animaux reçoivent un aliment dont la teneur en P dig et Ca couvre 100% des besoins. Ainsi, il serait possible de limiter, voire d'exclure l'utilisation de phosphate inorganique dans l'aliment de lactation. Un suivi sur plusieurs parités est cependant nécessaire pour confirmer cette stratégie et la promouvoir en élevage de porc commercial. Les résultats ont montré qu'une supplémentation de 500 FTU/kg de phytase augmente la digestibilité du P alimentaire et éviterait à la truie de puiser drastiquement dans ses réserves. Cette étude met en évidence la nécessité de prendre en compte la phytase exogène et la régulation homéostatique et homéorhèse du P et du Ca dans le calcul du besoin et la formulation des aliments pour la truie et constitue une première étape dans l'actualisation des recommandations en P et Ca chez la truie en lactation et en gestation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agroscope., 2004. Apports alimentaires recommandés pour les porcs. Disponible en ligne sur : https://www.agroscope.admin.ch/dam/agroscope/fr/dokumente/themen/nutztiere/futtermittel/futtermitteldatenbank/referenzwerte-schweine-2016-10_25.xlsx.download.xlsx/Referenzwerte%20Einzelfutter%20Stand%2020180124_v1.xlsx
- Bikker P., Blok M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows. CVB documentation report n°59., Wageningen Livestock Research, 72 p.
- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: A.J. Lewis and L.L. Southern (eds), Swine nutrition (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, Floride, USA, 187-212.
- Crenshaw T.D., Rortvedt L.A., Hassen Z., 2011. Triennial Growth Symposium: a novel pathway for vitamin D-mediated phosphate homeostasis: implications for skeleton growth and mineralization. J Anim. Sci., 89(7), 1957-1964.
- Dourmad J.Y., Boudon A., Narcy A., 2020. Le phosphore dans les systèmes d'élevage. INRAE Prod. Anim., 33(1), 31-40.
- Floradin P., Létourneau-Montminy M.P., Pomar C., Schlegel P., 2022. Development of bone mineralization and body composition of replacement gilts fed a calcium and phosphorus depletion and repletion strategy. Animal, 16(5), 100512.
- Giesemann M.A., Lewis A.J., Miller P.S., Akhter M.P., 1998. Effects of the reproductive cycle and age on calcium and phosphorus metabolism and bone integrity of sows. J. Anim. Sci., 76(3), 796-807.
- Grez-Capdeville M., Crenshaw T.D., 2022. Estimation of phosphorus requirements of sows based on 24-h urinary phosphorus excretion during gestation and lactation. Br. J. Nutr., 128(3), 377-388.
- Kasper C., Schlegel P., Ruiz-Ascacibar I., Stoll P., Bee G., 2021. Accuracy of predicting chemical body composition of growing pigs using dual-energy X-ray absorptiometry. Animal, 15(8), 100307.
- Mahan D.C., Fetter A.W., 1982. Dietary calcium and phosphorus levels for reproducing sows. J. Anim. Sci., 54(2), 285-291.
- Mahan D.C., Vallet J.L., 1997. Vitamin and mineral transfer during fetal development and the early postnatal period in pigs. J. Anim. Sci., 75(10), 2731-2738.
- Maxson P.F., Mahan D.C., 1986. Dietary calcium and phosphorus for lactating swine at high and average production levels. J. Anim. Sci., 63(4), 1163-1172.
- Rodehutsord M., Faust M., Pfeiffer E., 1999. The course of phosphorus excretion in growing pigs fed continuously increasing phosphorus concentrations after a phosphorus depletion. Arch. Anim. Nutr., 52(4), 323-334.
- Schlegel P., Gutzwiller A., 2017. Effect of dietary calcium level and source on mineral utilisation by piglets fed diets containing exogenous phytase. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 101(5), e165-e174.
- Tokach M.D., Menegat M.B., Gourley K.M., Goodband R.D., 2019. Nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements. Animal, 13(12), 2967-2977.
- Wubuli A., Gerlinger C., Reyer H., Oster M., Muráni E., Trakooljul N., Wimmers K., 2020. Reduced phosphorus intake throughout gestation and lactation of sows is mitigated by transcriptional adaptations in kidney and intestine. BMC genomics, 21(1), 1-11.
- Zhai H., Cowieson A.J., Pappenberger G., Zhang J., Wu J., 2021. The effect of short-term phytase supplementation on the apparent total tract digestibility of calcium and phosphorus and the reproductive performance of late gestation and lactating sows fed diets without mineral phosphorus. J. Anim. Sci., 99(8), 1-9.