

# Estimation de la valeur nutritive de sources de phosphore d'origines minérale et animale pour la supplémentation des porcs en engraissement

Anne BOUDON (1), Agnès NARCY (2), Etienne LABUSSIÈRE (1), Carine A. VAN VUURE (3), Jean-Yves DOURMAD (1)

(1) PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint Gilles, France

(2) INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France

(3) Darling Ingredients, SONAC, Kanaaldijk Noord 20, 5691NM Son, Pays-Bas

Anne.boudon@inrae.fr

Avec la collaboration technique de Fabien GUERIN (UE 3P), Vincent PIEDVACHE (UE 3P), Nathalie MEME (UMR BOA), Maryline LEMARCHAND (UMR PEGASE), Cécile PERRIER (UMR PEGASE), Gwenola LE ROY (UMR PEGASE).

## Estimation de la valeur nutritive de sources de phosphore d'origines minérale et animale pour la supplémentation des porcs et en engraissement

L'utilisation de phosphates d'origine animale pour la complémentation minérale des porcs pourrait être une source de recyclage des os d'animaux abattus en bonne santé et poserait moins de risques d'approvisionnement que les phosphates issus de roches phosphatées. L'objectif de cette étude était de comparer la digestibilité de phosphates issus d'os, selon deux procédés, à celles de deux formes dominantes de phosphates issus de roches. Les digestibilités et les rétentions corporelles du phosphore (P) et du calcium ont été comparées sur 35 porcs en croissance (poids vif de 30,6 kg) répartis entre cinq régimes expérimentaux. Le régime témoin a été formulé avec une faible teneur en P. Les quatre autres régimes étaient supplémentés pour aboutir à des teneurs en P similaires pour les quatre régimes, et sensiblement inférieures aux recommandations afin de maximiser l'absorption du P. Quatre phosphates ont été comparés : phosphate monocalcique (PMC), phosphate bicalcique (PBC), phosphate dérivé d'os de bovins après extraction acide (PBC-Os) et phosphate dérivé d'os de porc après traitement sous pression (PHA-Os). La digestibilité du P des régimes a été plus élevée pour MCP, plus faible pour le témoin, DCP et PHA-Os, et intermédiaire pour PBC-Os ( $P$ -value < 0,001). La digestibilité de P supplémenté n'a pas été différente pour MCP et PBC-Os (78,3 et 63,8%, respectivement) mais elle a été inférieure pour DCP (45,4%) et PHA-Os (47,5%) par rapport à MCP ( $P$ -value < 0,001). Ainsi, les phosphates dérivés d'os peuvent être utilisés pour remplacer les phosphates MCP et DCP pour la supplémentation en P des porcs. Cette étude illustre également que le procédé d'extraction des phosphates des os est sans doute susceptible de moduler leur valeur nutritive.

## Estimating the nutritional value of phosphorus sources of mineral and animal origin for phosphorus supplementation of growing and fattening pigs

Using animal-derived phosphates for mineral supplementation of pigs could be a way to recycle bones from healthy slaughtered animals and provide a more sustainable supply of phosphates than phosphate rock. The objective of this study was to compare the digestibility of phosphates from bone, using two methods, to those of the two main forms of phosphate from rock. The digestibility and body retention of phosphorus (P) and calcium were compared in 35 growing pigs (live weight of 30.6 kg) distributed over 5 experimental diets. The control diet was formulated with a low content of P. The other four diets were supplemented to yield P contents that were similar to each other, but lower than recommended, to maximize the absorption of P. The four phosphates compared were monocalcium phosphate (MCP), dicalcium phosphate (DCP), phosphate derived from bovine bone after acid extraction (PBC-Os) and phosphate derived from pig bone after pressure treatment (PHA-Os). The digestibility of the P of the diets was higher for MCP; lower for the control, DCP and PHA-Os; and intermediate for PBC-Os ( $P$ -value < 0.001). The digestibility of supplemented P did not differ for MCP and PBC-Os (78.3% and 63.8%, respectively) but was lower for DCP (45.4%) and PHA-Os (47.5%) than for MCP ( $P$ -value < 0.001). Thus, bone-derived phosphates can be used to replace MCP and DCP phosphates for P supplementation in pigs. This study also illustrates that the process of extracting phosphates from bones is likely to modify their nutritional value.

## INTRODUCTION

La supplémentation minérale des porcs en engraissement vise à optimiser leurs performances de croissance et leur efficacité alimentaire (Jondreville et Dourmad, 2005 ; Bikker et Blok, 2017). Pour le phosphore (P), cette supplémentation est aussi raisonnée de manière à limiter les rejets de P dans l'environnement, majoritairement d'origine fécale. Ceci est permis en ajustant l'apport de P digestible aux besoins des animaux, ce qui nécessite d'estimer le plus précisément possible la digestibilité du P dans l'aliment. De plus, le choix, pour la supplémentation, de sources de P maximisant la digestibilité est un levier pour réduire les rejets. Aujourd'hui, la supplémentation en P se fait majoritairement à partir de sources minérales issues de roches phosphatées, avec un enjeu spécifique de pérennité de l'approvisionnement. Des phosphates d'origine animale, notamment d'os, pourraient représenter une voie de recyclage des os d'animaux sains abattus. Cependant, leur digestibilité peut varier selon leur mode de préparation, ce qui a été montré chez le poulet (van Harn *et al.*, 2017).

Le but de cette étude était de comparer, chez le porc en croissance, la digestibilité de phosphates d'origine osseuse, à celles des deux formes dominantes de phosphate extraits des roches, c'est-à-dire un phosphate monocalcique et un phosphate bicalcique.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Traitements et schéma expérimental

Cinq régimes expérimentaux ont été comparés (Tableau 1). Le régime témoin consistait en un régime semi-synthétique à très faible teneur en P. Les quatre autres régimes correspondaient au régime témoin supplémenté avec 0,23 % de P sous forme de phosphate monocalcique (PMC), de phosphate bicalcique (PBC) ou de deux phosphates issus d'os. Le premier était un phosphate bicalcique dihydraté (PBC-Os ; Delfos®, Darling Ingredient; Rousselot, Isle-sur-la-Sorgue, France). Il avait été obtenu après broyage, dégraissage et trempage pendant 5 jours dans une solution d'acide chlorhydrique d'os de bovins. Ce traitement avait pour but d'isoler la gélatine des phosphates, qui ont ensuite été précipités par addition d'hydroxyde de calcium (chaux). Le second était un phosphate sous forme d'hydroxyapatite (PHA-Os ; Calfos®, Darling Ingredients, SONAC, Vuren, Pays-Bas). Il avait été obtenu après broyage grossier, dégraissage, cuisson sous forte pression pour retirer toute la gélatine et enfin broyage fin, d'os de porcs. Les phosphates ont été incorporés en substitution d'une partie de l'amidon et des carbonates. Les phosphates bicalciques ou tricalciques d'origine animale sont autorisés pour l'alimentation des non-ruminants par les Règlements UE no 1234/2003 du 10 juillet 2003 et 56/2013 du 16 janvier 2013, à condition qu'ils ne puissent pas, durant leur transport ou leur production, être au contact d'aliments destinés aux ruminants.

**Tableau 1** – Composition des régimes

	Témoin	PMC	PBC	PBC-Os	PHA-Os
<b>Matières premières (%)</b>					
Amidon de maïs	61,73	61,25	61,45	61,16	60,85
Saccharose	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Huile	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Caséinates de sodium	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Concentré de protéines de soja	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50
Pulpes de betterave	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Cellulose purifiée en poudre, Vitacel®	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
DL-méthionine	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
L-thréonine	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
NaCl	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
CaCO <sub>3</sub>	0,82	0,30		0,04	
Prémix oligoéléments et vitamines	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PMC		1,00			
PBC			1,10		
Phosphate bicalcique dihydraté issu d'os, Delfos®				1,35	
Phosphate hydroxyapatite issu d'os, Calfos®					1,70,
<b>Composition nutritionnelle</b>					
Matière sèche, %	89,5	89,9	89,4	89,5	90,0
Matière organique, %	96,9	96,6	96,6	96,6	96,6
Matière azotée totale, %	14,06	14,03	14,19	14,79	13,52
Amidon, %	59,9	59,4	60,5	59,2	59,9
Energie brute, MJ/kg	18,8	18,4	18,5	18,3	18,8
Energie nette, MJ/kg (INRA-AFZ, 2004)	11,0	10,8	10,9	10,8	11,0
Fibres (Neutral Detergent Fiber), %	6,11	7,62	7,12	7,15	7,09
Fibres (Acid Detergent Fiber), %	2,86	3,86	3,54	3,54	4,01
Cellulose brute, %	2,45	2,65	2,90	2,84	2,58
P, g/kg (valeurs cibles attendues)	1,43 (1,31)	3,40 (3,28)	3,00 (3,28)	3,12 (3,28)	3,21 (3,28)
P digestible cible, g/kg	0,52	2,17	1,82	2,18	2,17
Ca, g/kg (valeurs cibles attendues)	7,63 (6,90)	7,67 (6,88)	7,07 (6,88)	7,15 (6,87)	8,10 (8,35)
Ca/P calculé après analyses	5,3	2,3	2,4	2,3	2,5

Les quatre régimes complétés en phosphates ont été formulés pour aboutir à des teneurs en P total similaires et un apport de P digestible sensiblement inférieur aux recommandations compte-tenu du poids des animaux (Jondreville et Dourmad, 2005 ; Bikker et Blok, 2017) de manière à obtenir des digestibilités du P élevées, non plafonnées par des apports de P excédentaires par rapport aux besoins. Les régimes témoin, PMC, PBC et PBC-Os ont été formulés pour obtenir des teneurs en Ca similaires. Le ratio Ca/P de ces régimes a été formulé pour être le plus faible possible compte tenu de celui des sources de phosphates comparés, afin de se rapprocher des recommandations (Pointillart *et al.*, 1987, Létourneau-Montminy *et al.*, 2012, Bikker et Blok, 2017). En raison de la teneur plus élevée en Ca de la source de phosphates PHA-Os, la teneur en Ca et le rapport Ca/P de ce régime étaient légèrement plus élevés. Tous les régimes ont été formulés pour des teneurs en énergie nette et en acides aminés conformes aux besoins des animaux.

L'étude a impliqué 35 porcs mâles entiers (Piétrain × (Large White × Landrace)) à raison de sept porcs par régime et des blocs de cinq demi-frères. Le poids vif des porcs lors de la mise en lot était de 30,6 (± 3,33) kg. L'essai a démarré le 19 août 2019. Après 2 semaines d'adaptation aux régimes expérimentaux et aux cages de digestibilité, la consommation alimentaire a été mesurée. Les fèces et urines ont été collectées pendant 5 jours. Afin de répartir les collectes dans le temps pour adapter le protocole au nombre de cages de digestibilité disponibles dans les salles de digestibilité, l'étude a consisté en deux répétitions successives, la première impliquant 15 porcs (trois porcs par régime) et la seconde 20 porcs (quatre porcs par régime).

## 1.2. Gestion de l'alimentation et logement

Les régimes étaient distribués sous forme de farine mélangée à de l'eau, en deux repas. Pendant la période de collecte, les quantités distribuées à chaque animal ont été fixées à des valeurs équivalentes aux consommations d'aliments observées pendant la période d'adaptation. Elles étaient de 1450 g/j en moyenne pendant la répétition 1 et de 1550 g/j en répétition 2 (en brut). Au début de la période expérimentale, les animaux ont été adaptés aux régimes sur six repas (pendant 3 jours), en augmentant progressivement le taux d'incorporation des régimes expérimentaux dans le mélange avec le régime standard de l'élevage. L'eau était fournie *ad libitum*. Les animaux ont été hébergés en loge individuelle pendant les 10 premiers jours de la période expérimentale et dans des cages de digestibilité au cours de la dernière semaine. Les tailles des cages ont été adaptées à la taille de chaque animal. Les animaux ont été pesés le matin avant la distribution de nourriture, à l'arrivée en loge individuelle, au début et à la fin de la période de collecte des fèces et des urines. Les procédures liées aux soins et à l'utilisation des animaux pour l'expérimentation ont été approuvées par le comité de protection des animaux du ministère français de l'Agriculture conformément à la réglementation française (numéro de projet EU0171- #17974-2018120616525961-v2).

## 1.3. Collecte des échantillons

Les matières premières et les régimes complets ont été échantillonnés deux fois au cours de l'étude, pour chaque préparation de régime au cours de chaque période de mesure. Les quantités offertes d'aliment et les refus ont été pesés quotidiennement tout au long de l'étude. La teneur en matière

sèche (MS) des échantillons des matières premières, des régimes et des refus a été mesurée immédiatement après prélèvement (étuve à 103°C pendant 24 heures pour les régimes et 48 heures pour les refus). Les échantillons de chaque régime ont été regroupés à la fin de l'étude pour analyses. Les fèces et les urines ont été collectées individuellement, totalement et séparément, pendant 7 jours consécutifs, le matin. A la fin de chaque période, les fèces ont été pesées et homogénéisées par animal et trois échantillons ont été prélevés : deux ont été séchés à l'étuve pour la détermination de la MS (103°C, 48 heures) et le dernier a été lyophilisé et broyé (grille de 1 mm) pour les analyses. Les fèces ont été stockées après prélèvement à -20°C. L'urine collectée était additionnée de 30 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/L puis une quantité aliquote de 2% du volume par jour a été prélevée et cumulée quotidiennement dans un pot de 500 ml spécifique à chaque porc et maintenue à -20°C. A la fin de chaque période, des échantillons d'urine ont été conservés après homogénéisation pour analyse.

## 1.4. Analyses de laboratoire et calculs

Les teneurs en P et en Ca des matières premières, des régimes, des fèces et des urines ont été analysées par ICP-OES (Inductive Plasma Coupled OES Thermoscientific TM iCAPTM 7200 ; méthode 990.08 ; AOAC International, 2006). Les matières premières, les régimes et les fèces ont été préalablement incinérés à 550°C pendant 8 heures dans un four à moufle, puis solubilisés avec de l'acide nitrique 16N et du peroxyde d'hydrogène à 30% sur un bloc de digestion jusqu'à ce que le résidu soit sec, et enfin dilués dans de l'acide nitrique 0,4N. Tous les échantillons ont été analysés en double. La digestibilité apparente (Dapp) de chaque élément E (soit P ou Ca) et la quantité apparemment absorbée (AE) et retenue (RE) ont été calculées avec les formules suivantes :

$$\text{DappE (\%)} = (\text{E ingéré} - \text{E excrété dans les fèces}) / \text{E ingéré} \times 100 \quad [1]$$

$$\text{AE (g/d)} = \text{E ingéré} - \text{E excrété dans les fèces} \quad [2]$$

$$\text{RE (g/d)} = \text{E ingéré} - \text{E excrété dans les fèces} - \text{E excrété dans l'urine} \quad [3]$$

où E ingéré, E excrété dans les fèces et E excrété dans l'urine sont les quantités de l'élément E ingérées ou excrétées dans les fèces ou les urines (g/j). Les teneurs en P et en Ca du gain corporel ont été calculées comme les rapports entre les rétentions calculées de ces éléments et le gain de poids obtenu entre les deux pesées rapporté à la journée.

La DappP spécifique de chaque phosphate a été calculée à partir de la différence de DappP entre le régime de base et le supplément de phosphate en considérant la proportion de phosphore apportée par le régime de base et les phosphates utilisés en supplément, et en supposant que la DappP du régime de base sur les traitements enrichis en phosphates était similaire à celle du régime témoin pour chaque répétition et que les digestibilités sont strictement additives.

## 1.5. Analyses statistiques

Les données ont été analysées par ANOVA, avec R (R\_Core\_Team, 2020), en utilisant la procédure *lm* du package stats. Le modèle incluait l'effet du régime, la répétition et leur interaction. Le porc était l'unité expérimentale. Les moyennes présentées dans les tableaux sont des moyennes des moindres carrés (moyennes LS) et les comparaisons de moyennes ont été effectuées avec les tests de Tukey.

## 2. RESULTATS

Nous avons observé une faible consommation alimentaire pour un porc affecté au régime témoin dans la seconde répétition. La consommation de cet individu était inférieure à la limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de la consommation moyenne de la répétition mais supérieure à la limite minimale de l'intervalle de confiance à 99%. Après avoir vérifié, par analyse des résidus, que la contribution de cet individu restait faible sur les résultats, et étant donné que ce porc ne présentait aucun signe de pathologie lors de l'expérimentation, la décision a été prise de le conserver dans le jeu de données.

### 2.1. Consommation d'aliment et performances zootechniques

Le poids vif moyen des porcs pendant la période de collecte était de 39,7 kg (Tableau 2). La consommation d'aliments a été en moyenne de 1478 g MS/j mais elle a été plus faible lors de la première répétition que lors de la seconde (1427 contre 1528 g/j,  $P$ -value < 0,01). Ces différences sont à mettre en relation avec des poids vifs inférieurs lors de la première répétition par rapport à la deuxième, même si l'effet de la répétition sur le poids vif n'était pas significatif (38,0 contre 41,4 kg,  $P$ -value > 0,10). Le gain moyen quotidien (GMQ) a été de 789 g/j en moyenne pendant les périodes de collecte et l'indice de consommation (IC) de 1,9 g/g MS (1,7 g/g lorsque l'IC a été estimé sur une base brute). Aucun de ces critères n'a été affecté par les régimes ( $P$ -value > 0,10). Bilans de Phosphore et Calcium

L'effet des régimes sur les quantités de P ingéré a été conforme à ce qui était attendu à partir du protocole expérimental (Tableau 3). L'ingestion de P pour le régime témoin a été deux fois plus faible que pour les régimes complémentés en phosphates (2,07 contre 4,73 g/j,  $P$ -value < 0,001). Cependant, elle a aussi été significativement plus élevée avec le régime PMC qu'avec les trois autres régimes complémentés (5,05 contre 4,62 g/j,  $P$ -value < 0,05) et avec le régime PHA-Os par rapport au régime PBC (4,77 contre 4,45,  $P$ -value < 0,05) ce qui n'était pas attendu. Cependant, les amplitudes de variation des quantités de P ingéré entre régimes complémentés sont restées modérées.

L'excrétion fécale de P a également été nettement plus faible avec le régime témoin qu'avec les régimes complémentés (0,87 contre 1,94 g/j,  $P$ -value < 0,001). Elle a également été inférieure avec le régime PMC par rapport aux régimes PBC et PHA-Os (1,48 contre 2,10 g/j,  $P$ -value < 0,01) et intermédiaire avec le régime PBC-Os. Par conséquent, la digestibilité apparente du P la plus élevée a été observée pour le régime PMC (70,7 %), la

plus faible pour les régimes témoin, PBC et PHA-Os (respectivement 58,3, 50,7 et 51,4 %) et des valeurs intermédiaires ont été obtenues avec le régime PBC-Os (61,8 %,  $P$ -value < 0,001).

La digestibilité apparente des compléments phosphates n'a pas été différente pour les régimes PMC et PBC-Os (respectivement 78,3 et 63,8 %), tandis que la digestibilité apparente de PBC (45,4 %) et PHA-Os (47,5 %) était inférieure à celle de PMC ( $P$ -value < 0,001). Cependant, une interaction entre les régimes alimentaires et la répétition tendait à être observée pour ce critère ( $P$ -value < 0,06). Lors de la première répétition, la digestibilité apparente spécifique du complément PBC-Os (75,8 %, ETR = 10,81) était très proche de celle du complément PMC (80,5 %) et supérieure à celle des compléments PBC (41,3 %) et PHA-Os (49,9 %). Lors de la seconde répétition, la digestibilité apparente spécifique du complément PBC-Os (51,7 %) était similaire à celles des compléments PBC (49,6 %) et PHA-Os (45,1 %).

La quantité de P absorbé avec le régime témoin a été nettement plus faible que celles mesurées avec les régimes complémentés en phosphates ( $P$ -value < 0,001). Parmi les régimes complémentés, la quantité de P absorbé a aussi été plus élevée pour le régime PMC, inférieure avec le régime PBC et intermédiaire pour PHA-Os et PBC-Os, en étant cependant plus élevée pour le régime PBC-Os que pour le régime PHA-Os.

L'excrétion urinaire de P est restée faible (en moyenne 0,020 g/j) et n'a pas été affectée par le régime ( $P$ -value > 0,10). Par contre, l'utilisation post-absorptive du P a été plus élevée avec les régimes complémentés en phosphates par rapport au témoin (98,6 contre 99,2 %,  $P$ -value < 0,001). Vu la forte utilisation post-absorptive du P, la rétention corporelle apparente de P a été du même ordre de grandeur que l'absorption apparente de P et suivait des tendances similaires entre les régimes ( $P$ -value < 0,001).

Comme prévu, les quantités de Ca ingéré étaient plus élevées avec le régime PHA-Os qu'avec les régimes témoin, PBC et PBC-Os ( $P$ -value < 0,001). Cependant, les quantités de Ca ingéré n'étaient pas significativement différentes entre les régimes PHA-Os et PMC. L'excrétion fécale de Ca a été plus élevée avec le régime PHA-Os qu'avec les régimes témoin ou PMC (respectivement 5,50, 4,11 et 4,06 g/j,  $P$ -value < 0,001) alors qu'elle a été intermédiaire pour les autres régimes. La digestibilité apparente de Ca a eu tendance à être plus faible avec le régime PHA-Os, par ailleurs plus riche en Ca, qu'avec les quatre autres régimes (54,3 contre 61,0 %,  $P$ -value < 0,07). La quantité de Ca absorbé a eu tendance à être plus faible avec le régime PBC qu'avec le régime PMC et intermédiaire avec les autres régimes ( $P$ -value < 0,07). L'excrétion urinaire de Ca a été plus élevée avec le régime témoin (2,78 g/j,  $P$ -value < 0,001) et

Tableau 2 – Consommation alimentaire et performances zootechniques

	Témoin	PMC <sup>1</sup>	PBC <sup>1</sup>	PBC-Os <sup>1</sup>	PHA-Os <sup>1</sup>	ETR <sup>2</sup>	$P$ -value Régime	$P$ -value Répét.	$P$ -value Interaction
Poids vif <sup>3</sup> , kg	38,7	40,8	39,8	39,8	39,5	3,3	0,94	0,39	0,94
Consommation alimentaire, g MS/j	1446	1487	1484	1488	1483	37	0,81	0,01	0,96
GMQ <sup>4</sup> , g/j	675	878	778	803	812	75	0,16	0,77	0,15
IC <sup>5</sup> , g/g	2,17	1,71	1,95	1,86	1,84	0,20	0,18	0,52	0,24

<sup>1</sup>PMC : phosphate mono calcique, PBC : phosphate bicalcique, PBC-Os : phosphate bicalcique d'origine osseuse, PHA-Os : hydroxyapatite.

<sup>2</sup>ETR : Ecart-type résiduel.

<sup>3</sup>Moyennes des poids vifs mesurés au début et à la fin des périodes de collecte des urines et des fèces (durée de collecte de 7 jours).

<sup>4</sup>GMQ : gain moyen quotidien, calculé pendant les 7 jours de la période de collecte.

<sup>5</sup>IC : indice de consommation, calculé pendant les 7 jours de la période de collecte.

**Tableau 3** – Flux corporels de phosphore et de calcium à l'échelle de l'individu

	Témoin <sup>1</sup>	PMC <sup>1</sup>	PBC <sup>1</sup>	PBC-Os <sup>1</sup>	PHA-Os <sup>1</sup>	ETR <sup>2</sup>	P-value Régime	P-value Répét.	P-value Interaction
<b>Flux de phosphore, g/j</b>									
Ingéré	2,07 <sup>a</sup>	5,05 <sup>b</sup>	4,45 <sup>c</sup>	4,64 <sup>cd</sup>	4,77 <sup>d</sup>	0,06	< 0,01	0,01	< 0,01
Excrétion fécale	0,87 <sup>a</sup>	1,48 <sup>b</sup>	2,19 <sup>c</sup>	1,78 <sup>bc</sup>	2,32 <sup>c</sup>	0,30	< 0,01	0,81	0,10
Absorption apparente	1,20 <sup>a</sup>	3,57 <sup>b</sup>	2,26 <sup>c</sup>	2,85 <sup>d</sup>	2,45 <sup>cd</sup>	0,28	< 0,01	0,78	0,10
Excrétion urinaire	0,016 <sup>a</sup>	0,024 <sup>b</sup>	0,019 <sup>ab</sup>	0,023 <sup>ab</sup>	0,019 <sup>ab</sup>	0,004	0,15	0,23	0,20
Rétention corporelle	1,19 <sup>a</sup>	3,55 <sup>b</sup>	2,24 <sup>c</sup>	2,83 <sup>d</sup>	2,43 <sup>cd</sup>	0,30	< 0,01	0,77	0,10
<b>DappP<sup>3</sup>, %</b>	58,3 <sup>a</sup>	70,7 <sup>b</sup>	50,7 <sup>a</sup>	61,8 <sup>ab</sup>	51,4 <sup>a</sup>	7,1	< 0,01	0,97	0,14
<b>Dapp P comp<sup>4</sup>, %</b>		78,3 <sup>a</sup>	45,4 <sup>bc</sup>	63,8 <sup>ac</sup>	47,5 <sup>bc</sup>	10,8	< 0,01	0,60	0,08
<b>Teneur en P du gain corporel<sup>5</sup>, g/kg</b>	1,79 <sup>a</sup>	4,08 <sup>b</sup>	2,89 <sup>c</sup>	3,54 <sup>bc</sup>	2,99 <sup>c</sup>	0,34	< 0,01	0,66	0,10
<b>Utilisation post-absorptive du P<sup>6</sup>, %</b>	98,6 <sup>a</sup>	99,3 <sup>b</sup>	99,1 <sup>b</sup>	99,2 <sup>b</sup>	99,2 <sup>b</sup>	0,3	< 0,01	0,10	0,22
<b>Flux de calcium, g/j</b>									
Ingéré	11,02 <sup>ab</sup>	11,40 <sup>ac</sup>	10,48 <sup>b</sup>	10,63 <sup>b</sup>	12,01 <sup>c</sup>	0,28	< 0,01	0,01	0,93
Excrétion fécale	4,11 <sup>a</sup>	4,06 <sup>a</sup>	4,59 <sup>ab</sup>	4,20 <sup>ab</sup>	5,50 <sup>b</sup>	0,77	0,05	0,55	0,09
Absorption apparente	6,92 <sup>ab</sup>	7,34 <sup>a</sup>	5,89 <sup>b</sup>	6,44 <sup>ab</sup>	6,52 <sup>ab</sup>	0,74	0,08	0,09	0,07
Excrétion urinaire	2,78 <sup>a</sup>	0,95 <sup>b</sup>	1,75 <sup>c</sup>	1,49 <sup>c</sup>	2,20 <sup>d</sup>	0,31	< 0,01	0,89	0,45
Rétention corporelle	4,14 <sup>a</sup>	6,39 <sup>b</sup>	4,14 <sup>a</sup>	4,95 <sup>a</sup>	4,31 <sup>a</sup>	0,79	< 0,01	0,10	0,22
<b>DappCa<sup>3</sup>, %</b>	62,8	64,4	56,1	60,8	54,3	6,7	0,07	0,27	0,06
<b>Ca du gain corporel<sup>6</sup>, g/kg</b>	6,28 <sup>ab</sup>	7,34 <sup>a</sup>	5,33 <sup>b</sup>	6,18 <sup>ab</sup>	5,32 <sup>b</sup>	1,09	0,04	0,10	0,17
<b>Utilisation post-absorptive du Ca<sup>6</sup>, %</b>	59,5 <sup>a</sup>	87,1 <sup>b</sup>	69,4 <sup>cd</sup>	76,7 <sup>c</sup>	65,8 <sup>ad</sup>	6,2	< 0,01	0,17	0,67
<b>Ca/dP<sup>5,7</sup></b>	9,2	3,2	4,6	3,7	4,9				
<b>Ca/P du gain corporel, g/g</b>	3,53 <sup>a</sup>	1,80 <sup>b</sup>	1,83 <sup>b</sup>	1,74 <sup>b</sup>	1,77 <sup>b</sup>	0,389	< 0,01	0,03	0,42

<sup>1</sup>PMC = phosphate mono calcique, PBC = phosphate bicalcique, PBC-Os = phosphate bicalcique d'origine osseuse, PHA-Os = hydroxyapatite.

<sup>2</sup>ETR : Ecart-type résiduel.

<sup>3</sup>ADapp P et Ca = digestibilité apparente du phosphore et du calcium.

<sup>4</sup>Dapp P comp = digestibilité apparente du complément phosphates (PMC, PBC, PBC-Os ou PHA-Os)

<sup>5</sup>Teneur en P et en Ca du gain corporel estimé par le rapport entre les quantités de P (et de Ca) retenues et le GMQ (moyennes quotidiennes).

<sup>6</sup>Utilisation post-absorptive du P et du Ca = (1- excrétion urinaire/absorption) × 100

<sup>7</sup>dP = P digestible = P ingéré – P excrété dans les fèces.

plus faible avec le régime PMC (0,95 g/j). Elle a été plus faible avec le régime PHA-Os (2,20 %) qu'avec le témoin, et elle a été plus élevée avec les régimes DCP (1,75 %) et PBC-Os (1,49 %) qu'avec le régime PMC. Ces différences se sont traduites par des variations inversement proportionnelles de l'utilisation post-absorptive du Ca. Par conséquent, la rétention apparente du Ca a été plus élevée avec le régime PMC par rapport aux quatre autres régimes (6,39 contre 4,38 % en moyenne, *P*-value < 0,001).

La teneur en P du gain corporel a été nettement supérieure avec le régime témoin par rapport aux régimes complémentés en phosphates (1,79 contre 3,38 g/kg, *P*-value < 0,01). Elle a aussi été plus élevée avec le régime PMC par rapport aux régimes PBC et PBC-Os. La teneur en Ca du gain corporel a été supérieure avec le régime PMC par rapport au régime PBC et intermédiaire pour les autres régimes (*P*-value < 0,04). Les rapports des teneurs en Ca et en P de la rétention corporelle ont été nettement supérieurs avec le régime témoin par rapport aux quatre régimes complémentés en phosphates (3,53 contre 1,79 g/g, *P*-value < 0,001).

### 3. DISCUSSION

Le GMQ et l'indice de consommation observés pendant cette étude ont été satisfaisants compte tenu du fait que les porcs étaient rationnés. Les performances des porcs ont été similaires pour les cinq régimes, même si l'apport en P du régime témoin était faible, ce qui indique que le niveau de P alimentaire n'était

pas limitant pour la croissance sur la durée de l'étude.

La quantité quotidienne de P absorbé a varié de 1,20 g/j avec le régime témoin à 3,57 g/j avec le régime MCP. Pour les cinq régimes testés dans l'étude, ces quantités étaient inférieures aux besoins en P des porcs en croissance de poids équivalents estimés à 4,71 g/j par Jondreville et Dourmad (2005) et à 4,30 g/j selon Bikker et Blok (2017). La différence entre ces estimations des besoins selon les auteurs est en grande partie liée à la valeur prise en compte pour estimer les pertes endogènes fécales déterminant la majorité des besoins d'entretien. Pour Bikker et Blok (2017), ces pertes endogènes sont estimées à 6 mg P/kg poids vif à partir d'une synthèse d'études où ces pertes ont été estimées sur des porcs nourris avec des régimes semi-synthétiques à faible teneur en P. Les recommandations en cours en France (Jondreville et Dourmad, 2005) reposent sur l'idée que les pertes endogènes fécales issues des études précitées sont minimisées par rapport à celles que l'on serait susceptible de constater dans les élevages où les aliments porcs sont complémentés en P à hauteur de leurs besoins. En conséquence, on peut estimer dans notre étude que les besoins en P ont été couverts à hauteur de 25% des recommandations en cours en France pour le régime témoin et à des proportions de 50 à 75% des recommandations pour les régimes complémentés en P. Ce faible apport alimentaire en P a été raisonné pour maximiser la digestibilité du P car des apports au-delà des besoins diminuent la digestibilité du P en réduisant son absorption. L'utilisation post-absorptive du P, presque complète dans cette étude, indique un fort niveau de réabsorption rénale et une faible excrétion urinaire cohérents

avec les faibles apports de P alimentaires (Bikker et Block, 2017). La relative baisse de l'utilisation avec le traitement témoin est sans doute à mettre en relation avec le ratio Ca : P plus élevé, au-delà des capacités de rétention osseuse des animaux, ayant pu induire, du fait des régulations du métabolisme phosphocalcique, une baisse de la rétention osseuse (Bikker et Block, 2017). Enfin, l'absence d'augmentation de l'excrétion urinaire de P avec les régimes complémentés en P par rapport au régime témoin confirment que le degré de minéralisation maximale des porcs n'était pas atteint car l'excrétion urinaire est une voie majeure d'élimination de l'excès de phosphore par baisse de la réabsorption rénale. Les rapports des teneurs en Ca et en P de la rétention corporelle avec les traitements complémentés en phosphates, bien qu'un peu élevés, sont restés cohérents avec ceux observés sur des porcs en croissance de ce poids (Bikker et Block, 2017). Par contre, celui du régime témoin, particulièrement élevé et bien supérieur à celui de l'hydroxyapatite des os, pourrait illustrer les faibles apports de P par ce régime qui ont été démontrés comme pouvant induire une rétention prioritaire du P dans les tissus mous plutôt que dans les os (Bikker et Block, 2017).

La quantité quotidienne de Ca absorbé a varié de 5,89 g/j (DCP) à 7,34 g/j (MCP). Ces valeurs étaient proches des besoins journaliers moyens en Ca estimés à 6,65 g/j (Bikker et Blok, 2017). Le rapport entre l'apport en Ca et en P digestible, estimé grâce au phosphore absorbé, (Ca/dP) a varié entre 9,2 g/g pour le régime témoin et des valeurs comprises entre 3,7 et 4,9 g/g pour les régimes supplémentés. Ces valeurs sont une conséquence du choix, dans notre étude, de comparer les régimes à des teneurs en Ca comparables. Les rapports Ca/dP qui en résultent sont élevés, voire très élevés pour le régime témoin, si on considère que des valeurs supérieures à 2 sont susceptibles de réduire la digestibilité apparente du P (Bikker et Blok, 2017). En effet, apporté en excès par rapport au P, le Ca alimentaire non absorbé peut interagir avec le P dans le chyme pour former des sels insolubles, entraînant une absorption réduite du P alimentaire (Létourneau-Montminy *et al.*, 2012 ; Bikker et Blok, 2017). De fait, on peut imaginer que les forts apports de Ca par rapport aux apports de P ont pu limiter la digestibilité apparente de P dans notre étude.

Les variations relatives de la digestibilité apparente spécifique des quatre phosphates comparés étaient très similaires à celles

attendues. La digestibilité apparente du phosphate monocalcique (PMC) a bien été clairement supérieure à celle du phosphate bicalcique d'origine rocheuse (PBC) (INRA-AFZ, 2004). La digestibilité apparente spécifique du phosphate bicalcique d'origine osseuse (PBC-Os) n'a pas été différente de celle du phosphate monocalcique ('PMC') comme cela a été observé sur la digestibilité du phosphore pré-caecal chez les poulets de chair (van Harn *et al.*, 2017). Par contre, la digestibilité apparente spécifique du phosphate sous forme d'hydroxyapatite d'origine osseuse ('PHA-Os') a été inférieure à celle du phosphate monocalcique comme cela a aussi été observé sur la digestibilité du phosphore pré-caecal chez les poulets de chair (van Harn *et al.*, 2017). Ces résultats sont cohérents avec le fait que le traitement ayant permis d'obtenir le phosphate bicalcique d'origine osseuse ('PBC-Os') a été conçu pour induire une destruction importante de la matrice osseuse, susceptible d'augmenter la solubilité et l'absorption intestinale du P alors que ce n'est pas le cas pour l'autre phosphate d'origine osseuse, principalement composé d'hydroxyapatite sous sa forme native.

## CONCLUSION

On peut conclure de cette étude que les phosphates dérivés d'os aussi bien sous forme bicalcique que d'hydroxyapatite peuvent être utilisés pour remplacer les phosphates monocalcique ou bicalcique pour la supplémentation en P des porcs en croissance. La digestibilité apparente spécifique d'un phosphate bicalcique issu d'os est comparable à celle d'un phosphate monocalcique alors que celle d'hydroxyapatite issue d'os est inférieure à celle d'un phosphate monocalcique.

Le choix de réaliser les comparaisons à teneurs en Ca comparables entre les régimes alimentaires a conduit à des régimes avec de forte teneur en Ca. Cette conséquence est inhérente au fait que le rapport Ca/P alimentaire est défavorable pour la digestibilité de P avec le phosphate sous forme d'hydroxyapatite d'origine osseuse et dans une moindre mesure avec le phosphate bicalcique. Le fort rapport Ca/P de ces suppléments n'a pas pu être compensé dans cette étude, du fait de la faible teneur en P du régime de base. Ces conditions expérimentales ont sans doute conduit à des digestibilités de P plus faibles par rapport à ce qu'elles auraient pu être avec des régimes plus courants en élevage.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AOAC international (Association of Official Analytical Chemists International), 2006. Official methods of analysis, 18<sup>th</sup> edition. AOAC International, Gaithersburg, Maryland, 2590 p.
- Bikker P., Blok M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows. CVB Documentation Report nr. 59. Wageningen Livestock Research, Dept. Animal Nutrition, Wageningen, The Netherlands, 74 p.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. In : Sauvart D., Pérez J.M., Tran G. (Eds), INRA Editions, Versailles, 301 p.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. La phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- Létourneau-Montminy M. P., Jondreville C., Sauvart D., Narcy A., 2012. Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. Animal, 6, 1590-1600.
- Pointillart A., Fourdin A., Delmas A., 1987. Conséquences néfastes de l'excès de calcium chez des porcs non supplémentés en phosphore minéral. Journées Rech. Porcine, 19, 281-288.
- R\_Core\_Team., 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- van Harn J., Spek J.W., van Vuure C.A., van Krimpen M.M., 2017. Determination of pre-cecal phosphorus digestibility of inorganic phosphates and bone meal products in broilers. Poultry Sci., 96, 1334-1340.