



# L'efficacité de la phytase ajoutée aux aliments des porcs en croissance et des truies en maternité est améliorée par une source de carbonate de calcium insoluble

David GUILLOU, Gaël GOASDOUE, Noémie LEMOINE

MIXSCIENCE, Campus Avril, 2 avenue Ker Lann, 35172 Bruz, France

david.guillou@mixscience.eu

*Avec la collaboration de l'atelier pilote R&D de Mixscience et du personnel de la station Euronutrition*

## **L'efficacité de la phytase ajoutée aux aliments des porcs en croissance et des truies en maternité est améliorée par une source de carbonate de calcium insoluble**

La digestibilité du phosphore (P) phytique est améliorée par des phytases ajoutées aux aliments, limitant ainsi le recours aux phosphates. Mais, les apports élevés de calcium (Ca) peuvent réduire l'efficacité des phytases dans l'estomac. Une forme de carbonate de Ca digestible (PTZ), rendue insoluble dans l'estomac, était évaluée dans deux essais, avec des porcs en croissance ou des truies en lactation. Dans chaque essai, trois aliments étaient comparés : BASAL (bas P digestible), PHY (ajout d'une phytase à BASAL, porcs : 500 FTU/kg, truies : 750 FTU/kg) et PTZ (remplacement du carbonate de Ca par PTZ sur la base PHY). La digestibilité apparente de P et Ca a été mesurée deux fois sur 18 porcs, âgés de 90 puis 105 jours. En maternité (n=54 truies, rangs 1-7), la digestibilité de P et Ca a été mesurée à 15 jours de lactation dans un essai zootechnique. Dans les deux essais, la digestibilité des minéraux était significativement plus faible pour BASAL que pour les groupes avec phytase (P : croissance, 55 vs. 64 % respectivement ; truies, 56 vs. 65% respectivement). La digestibilité du Ca n'était pas réduite dans le groupe PTZ. Pour les deux stades, PTZ améliorait numériquement la digestibilité apparente et significativement ( $P = 0,044$ ) l'apport de P digestible. Chez le porc, la digestibilité du Ca et du P baissait avec l'âge dans les trois lots. Chez la truie, la digestibilité du P dans BASAL augmentait avec le rang de portée, sauf pour PTZ où elle était constante. L'effet de PHY était intermédiaire pour les truies de rangs 1 et 2, puis équivalente à PTZ. L'apport d'une source de Ca insoluble dans l'estomac avec la phytase améliorait l'apport de P digestible.

## **Efficacy of phytase in growing pig and lactating sow diets is improved by a source of insoluble calcium carbonate**

To minimise phosphate use, the digestibility of phytic phosphorus (P) from pig feed is generally improved by adding phytase. However, high calcium (Ca) intake can reduce phytase efficacy in the stomach. A source of digestible Ca carbonate made insoluble in the stomach (PTZ) was evaluated in two trials, with growing pigs or lactating sows. In each trial, three diets were compared: BASAL (low digestible P), PHY (phytase added to BASAL, 500 or 750 FTU/kg for pigs and sows, respectively), and PTZ (replacing some Ca carbonate with PTZ in PHY). Total apparent digestibility of P and Ca was measured twice in 18 growing pigs (90 and 105 days of age). In the farrowing room (n=54 sows, parities 1-7), P and Ca digestibility was assessed at 15 days of lactation in a performance trial. In both trials, mineral digestibility was significantly lower with BASAL than with diets that included phytase (P: pigs, 55 % vs. 64 %, respectively; sows, 56 % vs. 65 %, respectively). Ca digestibility did not decrease with the PTZ diet. In both animal types, PTZ improved apparent P digestibility numerically and digestible P intake significantly ( $P = 0.044$ ). In growing pigs, Ca and P digestibility decreased as age increased for all three groups. P digestibility with the BASAL diet increased as sow parity increased ( $P < 0.05$ ), whereas with PTZ, P digestibility was always higher than that of the BASAL diet and did not change with sow parity. With PHY, P digestibility was intermediate for sow parities 1 and 2 and then matched PTZ. In conclusion, including stomach-insoluble Ca carbonate with phytase increased the amount of digestible P supplied to pigs and sows.

## INTRODUCTION

L'utilisation des phosphates minéraux en agriculture et en alimentation animale pose à la fois le problème d'une ressource limitée (épuisement des gisements connus non contaminés prévu vers 2040 dans les scénarios pessimistes, Blackwell *et al.*, 2019) et d'un usage excessif à l'origine d'une pollution environnementale par le phosphore. L'optimisation du recours aux phosphates minéraux en agriculture est donc une voie nécessaire à suivre. Grâce aux phytases ajoutées aux aliments, qui améliorent la digestibilité du phosphore (P) phytique contenu dans les végétaux, il est possible de limiter le recours aux phosphates dans les aliments des porcs. L'analyse mécanistique et quantitative des données de la littérature montre l'importance de la nature du P alimentaire et de sa concentration, ainsi que du temps de résidence gastrique, du pH de l'estomac et de la teneur de l'aliment en calcium (Ca), pour prédire l'effet des phytases sur la digestibilité du P phytique (Létourneau-Montminy *et al.*, 2007). Par ailleurs, Kim *et al.* (2019) ont proposé une méthode afin de caractériser *in vitro* la solubilité du carbonate de Ca pour prédire la digestibilité du calcium chez l'oiseau et pour minimiser les interactions avec les phytases. Dans ce cas, les sources de Ca favorisant une digestion élevée du P phytique sont digestibles par les animaux. Le calcium digestible étant important pour le développement osseux du porc en croissance (Samson *et al.*, 2013) et pour la minéralisation du squelette des truies à forte production laitière (Mahan et Newton, 1995), l'effet d'une forme de carbonate de Ca rendue insoluble dans l'estomac (PTZ) sur la digestibilité du P et du Ca en présence d'une phytase (PHY), a été évaluée dans deux essais, avec des porcs en croissance ou des truies en lactation.

## 1. MATERIEL ET METHODES

### 1.1. Source de carbonate de calcium (PTZ)

Une source de carbonate de Ca rapidement soluble dans les conditions de l'estomac a été sélectionnée à partir des résultats d'une enquête nationale réalisée en 2019 (Altis nutrition animale, non publié). La matière première subit ensuite une encapsulation matricielle spécifique avec une matière grasse végétale sélectionnée par Mixscience, qui a permis de réduire sa solubilité *in vitro* en conditions acides ou neutres. Le produit fini contient 75% de carbonate de calcium.

### 1.2. Animaux et logement

#### 1.2.1. Porcs en croissance

L'essai s'est déroulé au printemps 2020. Dix-huit porcs mâles castrés (génétique : Libra\* × Maxter, Hypor France), âgés de 69

jours et pesant initialement 29,6 ( $\pm 1,6$ ) kg, étaient logés dans une salle spécialisée pour les essais de digestibilité de la station Euronutrition (Saint-Symphorien, 72) pendant 35 jours.

Les cases sont conçues pour loger deux porcs charcutiers, disposant chacun d'un nourrisseur et d'un abreuvoir individuels. Ces cases peuvent être individualisées pendant la durée nécessaire à la collecte des fèces. Sous le caillebotis, une grille amovible permet de récolter les fèces sous chaque animal, sans les urines. Les porcs étaient affectés aux traitements en fonction de leur poids vif et de leur date de naissance, en distribuant les frères dans les trois groupes expérimentaux.

#### 1.2.2. Truies en maternité

L'essai était conduit dans la salle de maternité de la station Euronutrition pendant l'été 2022, avec 54 truies Libra\*. Dans une même bande de conduite, les truies étaient sélectionnées pour l'essai et allotées 3 jours avant le transfert en maternité, sur la base de leur rang de portée (1, 2, 3-4, 5-7), de leur poids vif (à partir des mesures quotidiennes de la station d'alimentation de gestation, DAC), de leur état corporel mesuré la veille du transfert en maternité (épaisseur de lard dorsal, ELD, et épaisseur de muscle dorsal, EMD), et du nombre de mort-nés à la mise-bas précédente (0, 1, 2 et plus). Elles entraient en maternité le vendredi précédant la semaine des mises-bas, sans déclenchement programmé. Des adoptions de porcelets pouvaient être réalisées jusqu'au lundi suivant les naissances (âge < 5 jours), pour que les portées soient constituées d'au moins 12 porcelets. Après 3 semaines de lactation, les porcelets et leurs mères étaient sevrés.

## 1.3. Schémas expérimentaux et alimentation

Le Tableau 1 présente le schéma expérimental de chaque essai avec les valeurs nutritionnelles calculées des aliments, sans aucune valorisation de la phytase ajoutée. Dans les deux essais, trois aliments étaient comparés : BASAL (bas P digestible), PHY (ajout d'une phytase à BASAL) et PTZ (dans PHY, remplacement partiel du carbonate de Ca par PTZ). Les aliments des porcs ont été décrits par Bournazel *et al.* (2022). Les aliments des truies étaient formulés à base de blé (43%), orge (20%), drêches de maïs (10%), son (10%), tourteaux de tournesol (6%), de colza (2%), de soja (1%), complétés par des acides aminés, des minéraux et des prémix. Comme pour les porcs en croissance, le carbonate de Ca dans le prémix était substitué sur une base isocalcique et iso-huile ajoutée par du PTZ pour le régime du même nom. Tous les aliments (porcs et truies) contenaient 1% d'un antifongique sur support de sépiolite, pour assurer un apport mesurable de minéraux indigestibles au laboratoire. L'aliment PHY de l'essai Porcs en croissance incluait une phytase commerciale, à la dose de 500 FTU/kg.

**Tableau 1** – Description des aliments expérimentaux des essais sur porcs et truies (valeurs calculées)

	Porcs (n=18)			Truies (n=54)		
	BASAL	PHY	PTZ	BASAL	PHY	PTZ
Carbonate de calcium	+	+	- <sup>1</sup>	+	+	- <sup>2</sup>
Phytase	-	+ <sup>3</sup>	+ <sup>3</sup>	-	+ <sup>4</sup>	+ <sup>4</sup>
PTZ	-	-	+	-	-	+
Energie nette <sup>5</sup> (MJ/kg)	9,700	9,700	9,700	9,675	9,675	9,675
Protéine brute (%)	15,00	15,00	15,00	15,50	15,53	15,53
Calcium (%)	0,800	0,800	0,800	0,650	0,650	0,649
Phosphore (%)	0,630	0,630	0,630	0,590	0,592	0,593
Phosphore phytique (%)	0,300	0,300	0,300	0,300	0,303	0,303
Phosphore digestible (%)	0,240	0,240	0,240	0,255	0,256	0,257

<sup>1</sup>PTZ=40% du total carbonate de Ca ; <sup>2</sup>PTZ=81% du total carbonate de Ca ; <sup>3</sup>500 FTU/kg ; <sup>4</sup>750 FTU/kg ; <sup>5</sup>valeurs croissance ou adulte

Dans l'essai Truies en maternité, l'aliment PHY correspondant incluait la même source de phytase, mais à 750 FTU/kg, pour refléter les pratiques courantes. Dans l'essai porcs en croissance, l'incorporation de 10 kg/T de PTZ se traduisait par une baisse d'apport de carbonate de Ca de 7,5 kg, soit 40% du total de la formule basale. Dans l'essai Truies en maternité, les mêmes 10 kg/T de PTZ correspondaient à 81% du carbonate de Ca de la formule BASAL respective. Les porcs étaient rationnés selon un plan démarré à 3,5% de leur poids d'entrée, atteignant un plafond de 2,8 kg/j. Toutes les truies recevaient 2,0 kg d'aliment le jour de la mise-bas, et leur ration augmentait en 9 jours jusqu'à 7,5 kg pour les cochettes et 8,5 kg pour les multipares.

#### 1.4. Mesures, prélèvements et analyses

##### 1.4.1. Porcs en croissance

Les porcs étaient pesés individuellement à l'entrée et à la sortie de l'essai (69 et 106 j d'âge, respectivement). Ils recevaient un même aliment du début à la fin de l'essai. Les refus étaient récoltés tous les 2 jours, pesés et écartés. En cours d'essai, 3 périodes de 3 jours de collecte partielle de fèces étaient réalisées, à partir des jours 75, 90 et 105 (âges). Seuls les deuxième et troisième prélèvements ont été retenus pour les analyses en raison d'un délai d'adaptation trop court après le post-sevrage pour la première période de collecte (Bournazel *et al.*, 2022).

##### 1.4.2. Truies en maternité

Les truies étaient pesées au sevrage, et leur état corporel (ELD, EMD) était mesuré par échographie la veille. Les distributions et les refus d'aliment étaient relevés quotidiennement. Les performances de « naissance » étaient enregistrées à chaque mise-bas, et les mortalités suivies quotidiennement. Les porcelets étaient pesés individuellement le jour de leur naissance, le jour de fin des adoptions, puis au sevrage. Les soins et les interventions réalisés aux truies comme aux porcelets étaient enregistrés individuellement et quotidiennement, et les symptômes mentionnés. Au moins 500 g de fèces de truies étaient collectés à l'excrétion, à 15 jours de lactation.

##### 1.4.3. Analyses d'aliments et de fèces

Les aliments étaient prélevés à la fabrication pour l'analyse de la MS, de l'insoluble chlorhydrique (iHCl, marqueur indigestible), des matières minérales (MM), du Ca et du P, pour les calculs de digestibilité, de l'azote et du sodium pour la conformité des fabrications. Les fèces étaient pesées fraîches à la collecte, puis après 24h en étuve et après broyage. Un aliquote du pool broyé était expédié au laboratoire pour mesurer MS, iHCl, MM, Ca et P. Les analyses d'aliments et de fèces étaient réalisées par le même laboratoire (Artemis, Janzé, 35).

#### 1.5. Calculs de digestibilité

La digestibilité était décrite par le coefficient d'utilisation digestive apparent (CUD<sub>a</sub>) des nutriments, qui était calculé pour chaque sujet et chaque collecte selon la formule :

$$CUD_a X = (1 - (X_{fèces} \div X_{aliment}) \times (iHCl_{aliment} \div iHCl_{fèces})) \times 100$$

où : X : teneur en nutriment sur sec dans l'aliment ou les fèces et iHCl<sub>xxx</sub> : teneur en iHCl dans l'aliment ou les fèces

Les ingérés de P et de Ca digestibles étaient également calculés à partir des digestibilités et des consommations d'aliment individuelles.

#### 1.6. Statistiques

Les données étaient analysées avec la console R studio version 4.0.2. (©The R Foundation for Statistical Computing 2017). Pour les porcs en croissance, les données individuelles étaient analysées dans un modèle mixte d'analyse de la variance en données répétées avec un effet du lot, un effet de la période de collecte, leur interaction et un effet aléatoire de l'individu. Un animal soigné contre une diarrhée en début d'essai, puis affecté d'un prolapsus rectal, a été exclu de l'essai. Pour les truies, le modèle incluait un effet du lot et un effet de la classe de rang de portée. Une seule donnée a été exclue de l'analyse, correspondant à une truie du lot PHY n'ayant que 10 porcelets à élever, quand toutes les autres en élevaient entre 12 et 15.

## 2. RESULTATS

### 2.1.1. Porcs en croissance

Sur la durée complète de l'essai, la croissance des porcs du régime BASAL tendait ( $P = 0,07$ ) à être réduite par rapport aux deux régimes incluant de la phytase (Tableau 2). Malgré la différence apparente de consommation entre les porcs du lot BASAL et les autres, il n'y avait pas de différence significative de consommation entre les lots. Ces observations valident le choix du niveau bas de P digestible dans BASAL, qui s'est révélé sublimitant pour les performances.

**Tableau 2** – Effets de la phytase (PHY) et du carbonate de calcium insoluble (PTZ) sur les performances des porcs en croissance et la digestibilité (CUD<sub>a</sub> %) de la matière sèche (MS) et de la matière organique (MO)

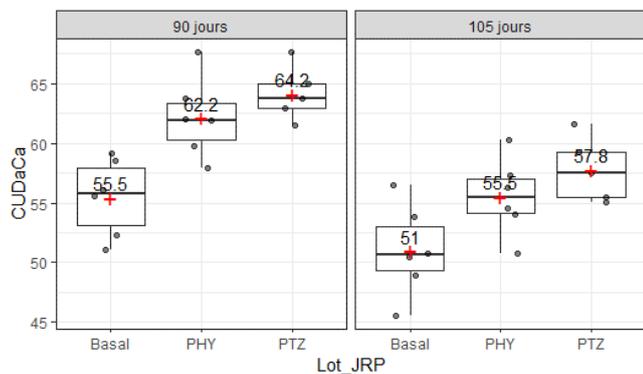
	BASAL	PHY	PTZ	E.T.R.	Effet lot
n	6	6	5		
PV <sub>0</sub> , kg	29,6	29,6	28,9	1,87	$P > 0,20$
PV <sub>35</sub> , kg <sup>1</sup>	59,2	63,0	62,0	3,32	0,073
GMQ, g <sup>1</sup>	844	956	945	79,9	0,070
CMJ, g	1876	2042	2061	228,4	$P > 0,20$
CUD <sub>a</sub> MS	85,2	84,9	85,0	0,85	$P > 0,20$
CUD <sub>a</sub> MO	88,5	88,0	88,0	0,76	$P > 0,20$

<sup>1</sup>PV<sub>0</sub> en covariable, PV<sub>35</sub> :  $P = 0,040$  ; GMQ,  $P = 0,940$

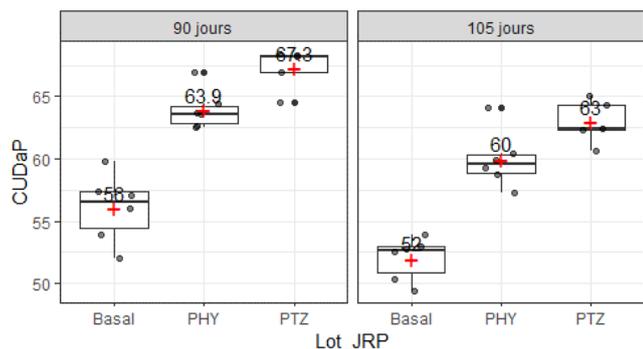
Les CUD<sub>a</sub> de la MS et de la matière organique (MO) n'étaient pas affectés significativement par les aliments testés. L'absence d'écart observable confirme la conformité des fabrications d'aliments.

Aux deux âges de prélèvement, la digestibilité des minéraux était plus faible pour BASAL que pour les groupes avec phytase ( $P < 0,001$ , Figure 1 et Figure 2).

La digestibilité du Ca et du P baissait au cours du temps dans les trois lots ( $P = 0,012$ ). La substitution partielle du carbonate de Ca par PTZ n'affectait pas significativement la digestibilité du Ca, ni celle du P, mais l'apport de P digestible était supérieur (PHY : 0,329 vs. PTZ : 0,346 %,  $P = 0,044$ ).



**Figure 1** – Influence de l'âge, de la phytase (PHY) et du carbonate insoluble dans l'estomac (PTZ) sur la digestibilité totale apparente (CUD<sub>a</sub>, %) du calcium chez le porc en croissance



**Figure 2** – Influence de l'âge, de la phytase (PHY) et du carbonate insoluble dans l'estomac (PTZ) sur la digestibilité totale apparente (CUD<sub>a</sub>, %) du phosphore chez le porc en croissance

### 2.1.2. Truies en maternité

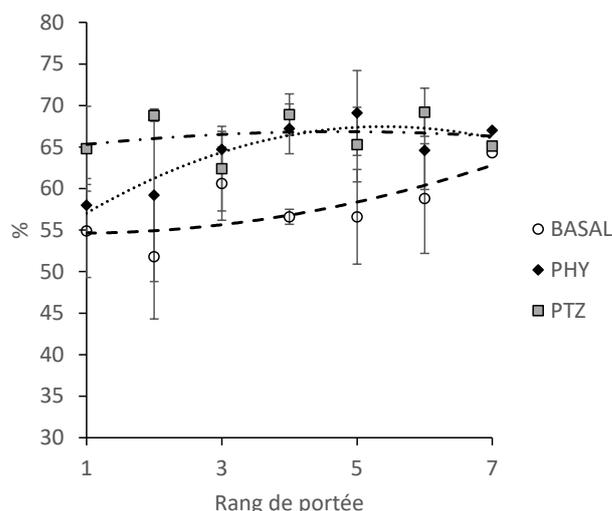
Les principales performances des truies et la digestibilité du Ca et du P sont présentées au Tableau 3.

Les performances des truies n'étaient pas significativement affectées par les aliments. La consommation d'aliments était assez faible, probablement en lien avec la chaleur estivale. En effet, 66% des truies présentaient plus de 3 périodes de refus d'ingestion. Malgré ces conditions, les pertes au sevrage étaient faibles et les poids de portées proches de 80 kg.

Les pertes de poids et d'état corporel (données non présentées) ne dépendaient pas des lots, elles étaient conformes aux valeurs habituelles de l'élevage.

La digestibilité du P dans BASAL augmentait avec le rang de portée ( $P=0,023$ ), sauf pour PTZ où elle était toujours élevée (Figure 3). L'effet de PHY était intermédiaire pour les truies de rangs 1 et 2 seulement. En revanche, le rang de portée n'affectait pas la digestibilité du Ca (résultats non présentés). Le nombre d'individus par rang et par régime étant limité (4 maximum), il serait prudent de valider ces effets avant de les généraliser.

En moyenne, l'ajout de phytase améliorait significativement la digestibilité du P de 2,5 à 10 points ( $P < 0,001$ ). L'effet du PTZ, numériquement intéressant mais non significatif, était de magnitude équivalente à celui mesuré chez le porc en croissance (+2,4 points par rapport à PHY en moyennes).



**Figure 3** – Effets du rang de portée et de l'ajout de phytase en combinaison (PTZ) ou non (PHY) avec l'utilisation d'une source du carbonate de calcium insoluble dans l'estomac, sur la digestibilité totale apparente (CUD<sub>a</sub>) du phosphore chez la truie en lactation

### 3. DISCUSSION

L'amélioration de la digestibilité des minéraux par les porcs en croissance avec la phytase ajoutée dans notre dispositif avait déjà été rapportée (Bournazel *et al.*, 2022). En travaillant avec une activité phytasique ajoutée supérieure de 50% à celle utilisée chez le porc en croissance, un effet similaire a été observé sur les truies pendant la lactation. De plus, dans les deux cas, le remplacement d'une partie du carbonate de Ca par le produit PTZ améliorait, mais seulement numériquement, la digestibilité du P (+2,4 à +4,0 points). En proportion de la contribution de la phytase à l'apport de P digestible, calculée à partir des valeurs obtenues sur les régimes, le remplacement de 7,5 kg/T de carbonate de Ca par 10 kg de PTZ correspondraient à une augmentation du même ordre de grandeur pour les deux stades étudiés, de 40 à 46% de l'activité phytasique. Toutefois, les doses de phytase ajoutées et la part du carbonate de Ca apportée sous forme de PTZ variaient dans les deux essais. De plus, à chaque stade, une seule dose de PTZ était testée. L'équivalence calculée ici devrait donc être précisée par des mesures complémentaires.

Le mécanisme généralement retenu pour expliquer l'effet du Ca sur la digestibilité du P et sur l'efficacité de la phytase, considère que le Ca en solution peut se lier aux phytates partiellement hydrolysés. En précipitant dans l'estomac, ces complexes ne seraient alors plus accessibles à l'hydrolyse sous l'action des phytases (Létourneau-Montminy *et al.*, 2007 ; Hu *et al.*, 2023 ; Klein *et al.*, 2023). Les effets observés dans nos essais par la substitution de 40 à 80% du carbonate de Ca par le PTZ sont compatibles avec ce mode d'action. Avec sa solubilité gastrique ralentie, une grande partie du Ca alimentaire ne pourrait plus réagir avec les phytates en solution, donc la phytase ajoutée pourrait catalyser la digestion complète (ou presque) du phosphore phytique. Ainsi, l'activité apparente de la phytase ajoutée pourrait être améliorée, ce qui serait peut-être mesurable en substituant tout le carbonate de calcium.

**Tableau 3** – Effets de la phytase (PHY) et du carbonate de calcium insoluble (PTZ) sur les performances et la digestibilité des minéraux chez la truie en lactation

	BASAL	PHY	PTZ	E.T.R.	Effet Lot	Effet rang
Nombre de truies	18	17	18			
Porcelets après adoption (n)	13,6	13,5	13,6	0,35	<i>P</i> >0,20	<i>P</i> >0,20
Porcelets sevrés (n)	13,1	13,4	13,2	0,79	<i>P</i> >0,20	0,033
Poids de portée sevrée, kg	78,3	78,4	79,8	5,20	<i>P</i> >0,20	0,047
Cumul aliment adoption-sevrage, kg	114,5	115,7	115,8	11,75	<i>P</i> >0,20	0,050
CUD <sub>a</sub> Ca, J15, %	50,1 <sup>b</sup>	55,3 <sup>a</sup>	55,5 <sup>a</sup>	6,09	0,020	<i>P</i> >0,20
CUD <sub>a</sub> P, J15, %	56,5 <sup>b</sup>	64,1 <sup>a</sup>	66,5 <sup>a</sup>	4,87	<i>P</i> <0,001	0,023

<sup>a, b</sup> les exposants différents indiquent des différences significatives entre les moyennes (*P*<0,05 ou moins)

Parce que la méthode de dosage de Kim *et al.* (2019) consiste à mesurer le résidu de carbonate et non le Ca libéré, la question se pose également d'un effet du carbonate en solution sur le pH de l'estomac. En effet, en solution l'ion bicarbonate possède un effet tampon important et il pourrait ainsi réduire l'efficacité de la phytase, qui est maximale en milieu acide. L'hypothèse de la maîtrise du pouvoir tampon des aliments s'appuie d'ailleurs sur ce type de mesure (Gabert *et al.*, 1995 ; Lawlor *et al.*, 2005). Toutefois, ni Narcy *et al.* (2012), ni Lagos *et al.*, (2021) n'ont observé d'augmentation de pH dans l'estomac de porcelets sevrés recevant différentes doses de carbonate de calcium. Dans ces essais, les animaux avaient probablement la capacité d'adapter leur sécrétion gastrique d'HCl, et c'est le cas également sur des animaux plus matures. Si un effet du pouvoir tampon sur le pH gastrique existait, il serait fugace et consisterait en une augmentation du « coût » de la digestion (sécrétion de sucs digestifs plus élevée pour un résultat identique).

Les performances de croissance des porcs ou de lactation des truies, n'étaient pas affectées significativement par l'augmentation de digestibilité du Ca et du P, même si la croissance des porcs du lot BASAL tendait à être réduite. La durée courte des essais participe à l'absence d'effet significatif, car les déficiences en minéraux digestibles affectent à long terme la rétention osseuse (Mahan et Newton, 1995 ; Samson *et al.*, 2013). Dans le cas des truies, 3 cycles reproducteurs consécutifs étaient nécessaires pour mettre en évidence une déficience (Mahan et Newton, 1995). Il faut noter que les apports calciques étaient bien couverts par PTZ, confirmant l'adaptation de cette solution. La sélection d'un carbonate de calcium naturellement insoluble (par exemple, issu d'une carrière de marbre), aurait probablement amélioré l'efficacité de la phytase dans l'estomac, mais sans couvrir les besoins en calcium digestible.

Les valeurs absolues des digestibilités mesurées dans les essais rapportés ici sont nettement supérieures aux valeurs utilisées

pour caractériser les matières premières et les aliments complets, y compris pour les régimes de base. Si ces valeurs étaient justes, cela aurait pour conséquence de modifier radicalement les calculs de rejets des minéraux. La collecte fécale partielle mise en œuvre, modifie probablement les données par rapport à la collecte totale telle que décrite initialement dans les travaux de Jongbloed (1987), dont les méthodes sont à l'origine des principales bases de données. En effet, les différents marqueurs indigestibles influencent les valeurs des digestibilités mesurées (Kim *et al.*, 2020 ; Zhai *et al.*, 2023), il convient alors de se garder des comparaisons directes des valeurs absolues de digestibilités quand les protocoles diffèrent. De plus, les digestibilités calculées ici sont totales et apparentes, donc décalées avec des digestibilités standardisées ou réelles. La détermination d'un endogène de référence pour le phosphore ou le calcium fait encore l'objet de discussions scientifiques (Zhang et Adeola, 2017).

L'influence de l'âge du porc en croissance ou du rang de portée de la truie sur la digestibilité des minéraux ouvre également des perspectives sur la possibilité d'intégrer de la nutrition de précision dans les modèles de performances et de rejets. Ces données mériteraient donc d'être confirmées.

## CONCLUSION

La sélection d'un carbonate de calcium bien digestible, modifié technologiquement pour être insoluble dans l'estomac des porcs, a permis d'améliorer numériquement ou significativement l'utilisation du phosphore alimentaire en présence de phytase, sans affecter négativement les apports nutritionnels de calcium. Des résultats convergents ont été mesurés sur des porcs en croissance et sur des truies en lactation, deux stades physiologiques particulièrement sensibles à la subcarence en phosphore. Ce type d'ingrédient pourrait donc participer à l'amélioration de l'efficacité nutritionnelle et à limiter l'impact de l'élevage sur les pollutions.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Blackwell M., Darch T., Haslam R., 2019. Phosphorus use efficiency and fertilizers: future opportunities for improvement. *Front. Agr. Sci. Eng.*, 6, 332-340.
- Bournazel M., Lemoine N., Tersiguel E., Guillou D., 2022. La digestibilité du phosphore et celle du calcium sont améliorées par l'apport de phytases, et évoluent au cours de la phase de croissance du porc charcutier. *Journées Rech. Porcine*, 54, 195-196.
- Gabert V.M., Sauer W.C., Schmilz M., Ahrens F., Mosenthin R., 1995. The effect of formic acid and buffering capacity on the ileal digestibilities of amino acids and bacterial populations and metabolites in the small intestine of weanling pigs fed semipurified fish meal diets. *Can. J. Anim. Sci.*, 75, 615-623.
- Hu Y., Hendricks W., van Baal J., Resink J.-W., Rodehutschord M., van Krimpen M.M., Bikker P., 2023. The impact of dietary calcium content on phosphorus absorption and retention in growing pigs is enhanced by dietary microbial phytase supplementation. *Br. J. Nutr.*, 12 p, doi:10.1017/S0007114522001039
- Jongbloed A.W., 1987. Phosphorus in the feeding of pigs: effect of diet on the absorption and retention of phosphorus by growing pigs. Ed. I.V.V.O., Lelystad (Pays-Bas), 343 p.
- Kim S.W., Li W., Angel R., Plumstead P.W., 2019. Modification of a limestone solubility method and potential to correlate with in vivo limestone calcium digestibility. *Poultry Sci.*, 98, 6837-6848.
- Kim B.G., Lee S.A., Park K.R., Stein H.H., 2020. At least 3 days of adaptation are required before indigestible markers (chromium, titanium, and

acid insoluble ash) are stabilized in the ileal digesta of 60-kg pigs, but values for amino acid digestibility are affected by the marker. *J. Anim. Sci.*, 98, skaa027.

- Klein N., Sarpong N., Melzer T., Feuerstein D., Heyer C.M.E., Camarinha-Silva A., Rodehutsord M., 2023. Effect of dietary calcium concentration and exogenous phytase on inositol phosphate degradation, mineral digestibility, and gut microbiota in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 101, skad254.
- Lagos L.V., Lee S.A., Bedford M.R., Stein H.H., 2021. Reduced concentrations of limestone and monocalcium phosphate in diets without or with microbial phytase did not influence gastric pH, fecal score, or growth performance, but reduced bone ash and serum albumin in weanling pigs. *Transl. Anim. Sci.*, 5, 1-10.
- Lawlor P.G., Lynch B., Caffrey P.I., O'Reilly J.J., O'Connell K., 2005. Measurements of the acid-binding capacity of ingredients used in pig diets. *Irish Vet. Journal*, 58, 447-452.
- Létourneau-Montminy M.P., Jondreville C., Lescoat P., Meschy F., Pomar C., Bernier J.F., Sauvant D., 2007. First step of a model of calcium and phosphorus metabolism in growing pigs: Fate of ingested phosphorus in the stomach. *Livestock Science*, 109, 63–65.
- Mahan D.C., Newton E.A., 1995. Effect of initial breeding weight on macro- and micromineral composition over a three-parity period using a high-producing sow genotype. *J. Anim. Sci.*, 73, 151-158.
- Nancy A., Létourneau-Montminy M.P., Bouzouagh E., Mème N., Magnin M., Dourmad J.Y., 2012. Modulation de l'utilisation digestive du phosphore chez le porcelet sevré : influence de l'apport de calcium et de phytase sur le pH et la solubilité des minéraux au niveau gastro-intestinal. *Journée Rech. Porcine*, 44, 159-164.
- Samson A., van Meyel J.P., Launay C., 2013. Influence de l'origine et de la granulométrie du carbonate de calcium sur sa valeur alimentaire pour le porc charcutier. *Journée Rech. Porcine*, 45, 201-202.
- Zhai H., Stamatopoulos K., Walk C., 2023. Sampling time influences the apparent total tract digestible Ca and P equivalence of 5 phytase in weaner pigs during a 21-day study. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4539273> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4539273>
- Zhang F., Adeola O., 2017. Techniques for evaluating digestibility of energy, amino acids, phosphorus, and calcium in feed ingredients for pigs. *Animal Nutrition*, 3, 344-352.