

Effet des apports calciques sur la réponse du porc charcutier à la modification des apports en phosphore digestible

Arnaud SAMSON (1), Eric SCHETELAT (2), Maxime QUENTIN (2), Claire LAUNAY (1)

(1) NEOVIA, Site de Chierry, Rue de l'Eglise, 02402 Château-Thierry Cedex, France

(2) INZO, 1 rue de la Marébaudière, 35766 Montgermont, France

asamson@neovia-group.com

Avec la collaboration technique de Fanny VIARD-PEERS (1) et Christian MINETTE (1).

Effet des apports calciques sur la réponse du porc charcutier à la modification des apports en phosphore digestible

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de la teneur en calcium digestible (Cadig) sur le besoin en phosphore digestible (Pdig) du porc charcutier. Pour cela, 112 porcs (femelles et mâles castrés) âgés de 70 jours, rationnés et alimentés selon une stratégie bi-phase (aliment croissance pendant 35 jours puis aliment finition) ont été mis en essai. Les animaux étaient logés individuellement et étaient répartis dans l'un des huit groupes expérimentaux, comparés dans un dispositif en factoriel 2x4 : deux teneurs en Cadig (0,30 et 0,40%) et quatre niveaux en Pdig (Croissance/Finition : 0,15%/0,12%, 0,20%/0,17%, 0,25%/0,22% et 0,30%/0,27%). Les huit régimes ne contenaient pas de phytase exogène. En croissance, nous n'avons observé aucun effet des apports calciques sur les performances de croissance des porcs. En finition, l'augmentation de la teneur en Cadig se soldait par une dégradation significative (P -value < 0,001) de la vitesse de croissance et de l'indice de consommation, et ce indépendamment de la teneur en Pdig. Le besoin en Pdig pour maximiser la croissance des porcs était de 0,23% en croissance comme en finition, ce besoin ne dépendait pas des apports calciques. Les critères caractérisant la minéralisation des phalanges restaient insensibles aux apports calciques alors que le dépôt en phosphore était significativement affecté par la teneur en Pdig. Le dépôt de phosphore dans la phalange était maximal pour 0,25% de Pdig. L'augmentation de la teneur en Cadig n'affectait pas significativement la digestibilité du phosphore. Ces données confirment donc qu'un excès de calcium peut pénaliser les performances de croissance du porc charcutier. Néanmoins, le mode d'action permettant d'expliquer l'effet négatif du calcium excédentaire reste à identifier. En effet, nos données suggèrent que le métabolisme du phosphore n'est probablement pas le seul à être impacté par un apport excessif en Cadig.

Effect of digestible calcium level on the digestible phosphorus requirement of fattening pigs

This study was conducted to determine whether the digestible phosphorus (digP) requirement of fattening pigs is affected by the digestible calcium level. One-hundred and twelve pigs (females and barrows), 70 days of age, fed restricted and according to a two-phase strategy (grower diet for 35 days and then a finisher diet) were used in this study. Pigs were housed individually and allocated to one of eight treatments, compared in a 2 × 4 factorial design: two digestible calcium levels (digCa: 0.30% and 0.40%) and four digP levels (grower/finisher diet: 0.15%/0.12%, 0.20%/0.17%, 0.25%/0.22% and 0.30%/0.27%). The experimental diets did not contain exogenous phytase. In the growing phase, no effect of digCa level on growth performance was observed. In the finishing phase, independently of the digP level, increasing digCa induced a significant reduction in growth and feed efficiency (P -value < 0.001). Regardless the digCa level, the digP requirement to maximize growth was approximately 0.23% in both growing and finishing phases. Bone mineralization (phalanx weight and quantity of P deposited) was not significantly affected by digCa level, while the quantity of P deposited was significantly affected by digP level. P deposition in the phalanx peaked at 0.25% of digP. Increasing the quantity of dietary digCa did not affect P digestibility. These data thus confirm that excess dietary calcium may be detrimental for the performance of fattening pigs. Nevertheless, the mode of action explaining this negative impact remains unclear. Indeed, our results suggest that P metabolism (absorption and utilization) is probably not the only physiological aspect to be affected by digCa level.

INTRODUCTION

Nutriments essentiels aux performances et à la santé des animaux, le phosphore (P) joue un rôle primordial en alimentation porcine. Parallèlement, le P constitue un enjeu environnemental important en production porcine et représente également une contrainte économique forte en formulation. Il est donc indispensable d'identifier les leviers, alimentaires ou non, permettant l'optimisation des apports en P. Des données récentes ont montré qu'un apport excessif de calcium (Ca) était susceptible d'induire une dégradation des performances chez le porc charcutier (Fan et Archbold, 2012 ; Samson *et al.*, 2017).

Cromwell (1996) suggérait que cet effet négatif du Ca excédentaire passerait par une perturbation du métabolisme du P et ce à travers divers mécanismes visant à contribuer au maintien de l'homéostasie phosphocalcique. Ce constat permettrait donc d'expliquer la plus forte sensibilité des porcs à un excès de Ca lorsque ces derniers sont soumis à des apports sub-limitants en P digestible (P_{dig}) (Gonzalez-Vega, 2016). Il est alors possible de penser que l'optimisation des apports calciques pourrait constituer une piste intéressante pour réduire le besoin en P des porcs.

Dans cette étude, nous nous sommes donc intéressés à l'effet des apports calciques sur la réponse du porc charcutier à la modification des apports en phosphore digestible.

Tableau 1 – Description des aliments expérimentaux (Croissance/Finition)

Apport en Cadig	Cadig 0,30%				Cadig 0,40%			
	0,15/0,12	0,20/0,17	0,25/0,22	0,30/0,27	0,15/0,12	0,20/0,17	0,25/0,22	0,30/0,27
Apport en P _{dig} , % (Cr/Fin) ¹								
	Aliments Croissance							
Ingrédients, % matière brute								
Carbonate de calcium	1,24	1,01	0,78	0,56	1,96	1,73	1,51	1,28
Phosphate monocalcique	0,20	0,48	0,76	1,05	0,21	0,50	0,78	1,06
Caractéristiques nutritionnelles								
Calcium total, %	0,81	0,77	0,73	0,69	1,10	1,05	1,02	0,98
Phosphore total, %	0,43	0,50	0,56	0,62	0,42	0,48	0,54	0,60
Ca : P	1,87	1,56	1,31	1,12	2,61	2,19	1,87	1,61
Ca : P _{dig}	5,4	3,9	2,9	2,3	7,3	5,3	4,7	3,3
Cadig : P _{dig}	2,00	1,50	1,20	1,00	2,67	2,00	1,60	1,33
	Aliments Finition							
Ingrédients, % matière brute								
Carbonate de calcium	1,41	1,19	0,96	0,73	2,07	1,85	1,62	1,39
Phosphate monocalcique	0,07	0,35	0,63	0,91	0,09	0,37	0,65	0,93
Caractéristiques nutritionnelles								
Calcium total, %	0,86	0,82	0,78	0,74	1,11	1,08	1,03	0,99
Phosphore total, %	0,38	0,44	0,51	0,57	0,37	0,43	0,49	0,55
Ca : P	2,23	1,84	1,54	1,30	3,00	2,49	2,10	1,80
Ca : P _{dig}	7,2	4,8	3,5	2,7	9,3	6,4	4,7	3,7
Cadig : P _{dig}	2,50	1,76	1,95	1,11	3,33	2,35	1,82	1,48

¹Teneurs en P_{dig} des aliments Croissance (Cr) et Finition (Fin)

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et logement

L'essai s'est déroulé au Centre de Recherches Zootechniques Appliquées (Montfaucon, Aisne). Cent douze porcs (femelles ou mâles castrés) issus d'une même bande de truies étaient mis en lots à 70 jours d'âge sur la base de leur sexe et de leur poids vif (PV) afin de constituer 14 blocs de huit cases individuelles. Les animaux ont été étudiés dans deux salles d'engraissement identiques et logés dans des cases de 1,6 m² disposant chacune d'un nourrisseur et d'un abreuvoir. Ces cases reposaient sur un caillebotis béton intégral, au-dessus d'une pré-fosse vidangée une fois par semaine. Une consigne de température fixée à 22°C a été appliquée pendant toute la durée de l'essai soit 100 jours. La fin de l'essai correspondait à l'abattage des animaux (Ab), soit en moyenne vers 115,3 kg de PV.

1.2. Alimentation

1.2.1. Description des régimes expérimentaux

Le schéma expérimental a été conduit sur l'intégralité de la période d'engraissement et consistait à comparer huit traitements expérimentaux dans un dispositif en factoriel 2 x 4 : deux teneurs en Ca digestible (Cadig) et quatre teneurs en P_{dig} (Tableau 1). Afin de respecter l'évolution des besoins nutritionnels pendant la période d'engraissement, une stratégie bi-phase était appliquée avec des aliments « croissance » distribués les 5 premières semaines d'essai (j0-j35) puis des aliments « finition » distribués jusqu'à la fin de l'essai (j35-Ab). Les aliments expérimentaux à base de blé, maïs, tourteau de soja et de tourteau de colza ont été formulés pour couvrir les besoins énergétiques (9,7 MJ EN/kg en croissance et 9,9 MJ EN/kg en finition) et protéiques (lysine

digestible : 0,82% en croissance et 0,75% en finition) des porcs charcutiers. Les teneurs en Pdig différaient donc d'une période à l'autre. Les régimes ne contenaient pas de phytase exogène. Les taux d'incorporation du phosphate monocalcique et du carbonate de calcium étaient ajustés afin d'atteindre les teneurs souhaitées en Pdig et en Cadig dans les différents aliments. Les données permettant de décrire la digestibilité fécale apparente du P et du Ca des différentes matières premières étaient issues du croisement de résultats internes et de données provenant de différentes publications, ces dernières variant selon les matières premières considérées.

En croissance, les ratios Ca/Pdig et Cadig/Pdig étaient respectivement compris entre 2,3 et 7,3 et entre 1,00 et 2,67. En finition, ces ratios étaient plus élevés et variaient entre 2,7 et 9,3 pour le ratio Ca/Pdig et entre 1,11 et 3,33 pour le ratio Cadig/Pdig.

Pour chacun des aliments, 1% de sépiolite a été incorporé afin d'augmenter la teneur en cendres insolubles dans l'acide chlorhydrique (Ins HCl) qui ont été utilisées comme marqueur indigestible pour la détermination des digestibilités fécales apparentes du Ca et du P (Yin *et al.*, 2001).

1.2.2. Fabrication des aliments

Tous les aliments ont été fabriqués à l'atelier expérimental de NEOVIA (Chierry, Aisne) et étaient présentés en granulés de 5 mm de diamètre. Les analyses réalisées sur les aliments montraient que les seize régimes présentaient des teneurs en protéine, Ca, P et matière grasse conformes aux valeurs attendues.

1.2.3. Distribution des aliments

Les porcs ont été nourris selon un plan de rationnement commun : 1,35 kg le premier jour, une progression de 35 g par jour jusqu'à un plafond de 2,60 kg qui était maintenu jusqu'au départ à l'abattoir. L'alimentation des animaux a été manuelle, les refus éventuels étant enregistrés hebdomadairement.

1.3. Mesures, calculs et analyse statistique

Les porcs ont été pesés individuellement cinq fois entre la mise en lots et l'abattage à Rethel (Ardennes). Les porcs étant tatoués d'un numéro individuel sur le flanc, les données individuelles de classement de carcasses obtenues à l'aide d'un capteur Gras/Maigre ont été collectées.

La phalange externe du pied antérieur gauche a été prélevée à l'abattoir pour évaluer la minéralisation osseuse. Pour cela, la matière sèche ainsi que les pourcentages de cendres, calcium et phosphore des phalanges ont été déterminés (Samson *et al.*, 2017). Le dépôt en P dans les phalanges était calculé en multipliant le poids des phalanges par la teneur en P de ces dernières. Les cendres insolubles dans l'acide chlorhydrique étaient choisies comme marqueur interne afin de déterminer la digestibilité fécale apparente du Ca et du P par récolte partielle des fèces à 28 jours d'engraissement (Yin *et al.*, 2001). L'intégralité des mesures étant réalisée individuellement, l'unité expérimentale était le porc. Les données (performances, digestibilité et minéralisation osseuse) ont été analysées selon un dispositif complet randomisé en factoriel (modèle linéaire, R, v3.1.2). Le modèle incluait la teneur en Cadig, la teneur en Pdig ainsi que l'interaction comme facteurs principaux. Les effets du bloc, du sexe et de la salle étaient également considérés dans le modèle statistique. Pour les

variables exprimées en pourcentage ne suivant pas une loi normale, la transformation « arcsinus » a été utilisée. Les différentes étaient considérées comme non-significatives (ns) lorsque la *P-Value* dépassait le seuil de 0,10.

La relation entre les apports en Pdig et les performances a été étudiée au travers de régressions intégrant les apports en Cadig et en Pdig et pour lesquelles les modèles linéaires (L) et quadratiques (Q) ont été testés. Lorsque le modèle était de type quadratique, le calcul de la dérivée nous permettait de déterminer la teneur en Pdig permettant d'optimiser les différents critères.

2. RESULTATS

2.1. Performances de croissance calculées sur la globalité de la période d'engraissement

Aucun porc n'a été retiré de l'essai en raison de problème d'aplomb. Un porc est mort en cours d'essai, la cause restant indéterminée. Trois porcs ont été exclus du traitement statistique étant données les performances aberrantes relevées pour ces animaux. A la mise en lots (j0), les porcs pesaient en moyenne 36,0 kg, ce poids ne différait pas significativement entre les groupes expérimentaux (Tableau 2). Les porcs ont été abattus après 93,7 jours d'engraissement à 115,3 kg en moyenne. Pour l'intégralité des performances calculées, aucune interaction entre la teneur en Cadig et la teneur en Pdig n'a été observée.

En période de croissance (j0-j35), la modification des apports calciques n'affectait pas significativement les performances des porcs. En finition (j35-Ab), la vitesse de croissance (GMQ) des porcs du groupe « Cadig 0,40% » était significativement inférieure à celle des animaux alimentés avec les régimes les moins riches en Cadig (- 3,7%, $P_{\text{Cadig}} < 0,001$). Consécutivement à cette différence de GMQ, les porcs du groupe « Cadig 0,40% » tendaient à être abattus plus tardivement que les animaux de l'autre groupe (+ 1,6 jour en moyenne, $P_{\text{Cadig}} = 0,08$). Les indices de consommation (IC) calculés sur la période j35-Ab étaient quant à eux significativement plus élevés pour les porcs recevant les aliments contenant 0,40% de Cadig, comparé aux IC des animaux du groupe « Cadig 0,30% » (respectivement 3,07 et 2,96, $P_{\text{Cadig}} < 0,0001$).

Indépendamment de la teneur en Cadig ($P_{\text{Cadig} \times \text{Pdig}} = \text{NS}$), la modulation des apports en Pdig affectait significativement les performances des porcs (GMQ et IC) sur l'intégralité de la période d'essai (croissance et finition). Les équations décrivant la relation entre les performances et les apports en P figurent dans le tableau 3. En croissance, l'augmentation des apports en Pdig se traduisait par une amélioration linéaire de la vitesse de croissance. Ainsi, seul le niveau le plus élevé de Pdig à savoir 0,30%, permettait de maximiser le GMQ réalisé en période de croissance (Tableau 3). Pour l'IC sur la période j0-j35 ainsi que pour les performances réalisées en finition (GMQ et IC), la relation entre ces critères et les apports en Pdig était de type quadratique. Ainsi, les teneurs en Pdig permettant d'optimiser ces trois critères étaient de 0,23%, 0,23% et 0,22% respectivement pour l'indice de consommation j0-j35, le GMQ et l'indice de consommation calculés en finition.

Les niveaux de consommation moyenne journalière (CMJ) ainsi que la teneur en muscle des pièces obtenue à l'abattoir étaient indépendants des facteurs alimentaires étudiés dans cette étude.

2.2. Caractéristiques des phalanges selon le traitement alimentaire

Comme pour les performances, l'interaction entre la teneur en Cadig et les apports en Pdig ne ressortait pas significative concernant les données relatives à la minéralisation osseuse.

Nous ne relevons aucun effet des apports en calcium digestible sur la composition chimique des phalanges (Tableau 4). La quantité de P déposé dans les phalanges était de 0,62 g quelle que soit la teneur en Cadig du régime ($P_{\text{Cadig}} = \text{NS}$).

Indépendamment des apports calciques, la quantité totale de P dans la phalange était significativement affectée par la modification des teneurs en P.

La distribution des deux aliments les moins riches en Pdig se soldait par une baisse significative de la quantité de P déposé dans la phalange comparativement à la situation où les deux aliments les plus riches en Pdig étaient proposés (respectivement 0,58 vs 0,66 g de P, $P_{\text{Pdig}} < 0,001$).

Le poids des phalanges n'était quant à lui pas affecté par la modification des apports en Pdig ($P_{\text{Pdig}} = \text{NS}$).

2.3. Digestibilités fécales apparentes du calcium et du phosphore

Pour les digestibilités fécales apparentes du Ca et du P mesurées à 28 jours d'engraissement, l'interaction entre les apports en Cadig et en Pdig ressortait significative (Tableau 5). Lorsque le régime contenant 0,20% de Pdig était distribué, l'augmentation des apports en Cadig se soldait par une réduction significative de la digestibilité du calcium (-11,8 points, $P_{\text{Cadig}} < 0,05$) et de celle du P (-10,0 points, $P_{\text{Cadig}} < 0,05$). Cette baisse des digestibilités du calcium et du phosphore suite à l'augmentation des apports calciques n'était pas significative pour les autres teneurs en Pdig. Quelle que soit la teneur en Cadig, la digestibilité du P était maximale lorsque l'aliment le plus riche en P était distribué. Il était par ailleurs intéressant de relever que lorsque les apports en Cadig étaient élevés (0,40%), la digestibilité du P obtenue pour le régime le moins pourvu en P (0,15%) était significativement supérieure à celle relevée pour les régimes titrant 0,20 et 0,25% de Pdig : respectivement 56,1% vs 43,6% vs 52,0% ($P_{\text{Cadig}} < 0,05$). Précisons que contrairement à ce que nous avons relevé, la formulation des aliments prévoyait une augmentation linéaire de la digestibilité du P lorsque la teneur en Pdig des aliments augmentait (Tableau 5).

Tableau 2 – Performances de croissance en fonction des teneurs en calcium digestible (Cadig) et en phosphore digestible (Pdig)

Apport en %	Cadig		Pdig				Statistiques ¹			
	0,30	0,40	0,15/0,12	0,20/0,17	0,25/0,22	0,30/0,27	ETR	Cadig	Pdig	CadigxPdig
Nombre de porc par traitement	55	53	27	27	26	28				
Durée Eng, j ²	92,9	94,5	100 ^c	94,3 ^b	89,8 ^a	90,5 ^{ab}	5,3	0,08	<0,001	ns
Poids vif j0, kg	35,9	36,1	36,0	36,0	36,0	35,9	1,1	ns	ns	ns
Poids vif j35, kg	66,3	66,5	64,9 ^a	65,9 ^b	67,4 ^c	67,4 ^c	1,6	ns	<0,001	ns
Poids vif abattage, kg	115,5	115,2	114,3	115,4	115,6	116,1	3,1	ns	ns	ns
GMQ j0-j35, g/j ²	855	857	811 ^a	841 ^b	884 ^c	886 ^c	45	ns	<0,001	ns
GMQ j35-Ab, g/j ²	863	832	767 ^a	845 ^b	891 ^c	888 ^c	44	<0,001	<0,001	ns
IC j0-j35 ²	2,17	2,18	2,28 ^b	2,19 ^{ab}	2,10 ^a	2,12 ^a	0,10	ns	<0,001	ns
IC j35-Ab ²	2,96	3,07	3,31 ^c	3,00 ^b	2,87 ^a	2,88 ^a	0,17	<0,001	<0,001	ns
TMP, % ²	62,0	61,8	61,5	61,6	62,2	62,1	1,6	ns	ns	ns

¹ETR= écart-type résiduel ; valeurs de P-value des effets Cadig et Pdig ainsi que de l'interaction entre ces deux facteurs simples ; ns = non significatif (P-value > 0,10). Des lettres différentes pour un même critère indiquent que les moyennes sont significativement différentes selon le test de Bonferroni au seuil de 5%. ² Durée Eng : durée de la période d'engraissement ; GMQ : gain moyen quotidien ; IC : indice de consommation ; TMP : taux de muscle des pièces.

Tableau 3 – Equation décrivant la relation entre les apports phosphocalciques et les performances des porcs

Variable	Modèle ¹	Cadig, %	Pdig, %	Pdig ² , %	Ordonnée à l'origine	P _{modèle}	R ² ajusté ¹	RMSE ¹
GMQ j0-j35, g/j ²	L	---	532	---	762	<0,001	0,25	52
IC j0-j35 ²	Q	---	-4,84	10,51	2,67	<0,001	0,28	0,11
GMQ j35-Ab, g/j ²	Q	-332	3661	-8117	597	<0,001	0,56	46
IC j35-Ab ²	Q	1,11	-14,35	32,92	4,03	<0,001	0,52	0,18

¹Modèle testé : Linéaire (L) ou Quadratique (Q) ; R²ajusté= coefficient de détermination ajusté ; RMSE= erreur résiduelle moyenne relative.

² GMQ : gain Moyen Quotidien ; IC : indice de consommation ; « --- » : variable non intégrée dans le modèle étant donnée sa non-significativité (Tableau 2).

3. DISCUSSION

Indépendamment des apports en Pdig, l'augmentation de la teneur en Cadig de 0,30 à 0,40% a induit une dégradation significative des performances de croissance des animaux pendant la période de finition. Ces résultats confirment donc les données de Fan et Archbold (2012) ainsi que celles de

Samson et al. (2017) qui rapportaient une dégradation des performances chez le porc charcutier lorsqu'un aliment titrant 0,41% de Cadig était offert. Il convient de préciser que ce niveau de Cadig peut être retrouvé dans des aliments commerciaux lorsque seul l'apport en calcium total est contrôlé et lorsque peu de matières premières sont disponibles en formulation, le carbonate de calcium étant alors

incorporé comme « diluant » dans l'aliment. Les régimes considérés dans cette étude présentaient des teneurs en Ca et donc des ratios Ca/Pdig plus élevés que ceux habituellement recommandés dans la littérature (Jondreville et Dourmad, 2005 ; Fan et Archbold, 2012; NRC, 2012), l'objectif étant d'évaluer l'effet potentiel d'apport de Ca excessifs sur le besoin en P digestible des porcs charcutiers.

L'absence d'effet de la teneur en Cadig sur les performances des animaux pendant les 35 premiers jours d'engraissement semble mettre en avant un besoin calcique exprimé en % dans l'aliment plus élevé pendant la période de croissance comparativement à la période de finition, ce qui corrobore les recommandations du NRC (2012). En finition, il est intéressant de relever que l'effet négatif du Cadig excédentaire était retrouvé quelle que soit la teneur en Pdig. Ces résultats ne corroborent donc pas les travaux de Gonzalez-Vega (2016) qui rapportent que les effets négatifs associés à des apports calciques excessifs sont moins marqués dans un contexte où le besoin en P est couvert.

Nos résultats soulèvent donc des questions quant au mode d'action expliquant l'effet négatif du calcium excédentaire. En effet, l'effet négatif des fortes teneurs en Ca chez le porc semblait s'expliquer par une moindre efficacité d'absorption et de rétention du P (Cromwell, 1996; Stein *et al.*, 2011). A contrario, nos données ne montrent pas d'effet des apports en Cadig sur le métabolisme du P puisque ni la minéralisation osseuse ni la digestibilité fécale apparente du P n'était clairement impactée par les apports calciques. Nos résultats confirment donc que les apports calciques peuvent affecter les performances des porcs indépendamment du P.

En effet, un effet négatif de l'augmentation des apports en minéraux sur la digestibilité des lipides (Guéguen et Pointillard, 2008) et de celle de l'énergie (Noblet, 1993) a déjà été rapporté. L'absorption du glucose semble également être sensible à un excès de Ca (Selle *et al.*, 2009). Ces interactions entre nutriments et calcium passeraient principalement par l'insolubilisation des phytates, phénomène favorisé par un apport calcique important. Précisons néanmoins que dans notre étude, les aliments ne contenaient pas de phytase exogène. De plus, les travaux de Samson *et al.* (2017) rapportaient que l'effet négatif du calcium apporté en excès ne dépendait pas de l'utilisation de phytase exogène. Autrement dit, l'effet négatif du calcium sur la croissance des porcs ne semble pas uniquement imputable à la formation de complexes entre les phytates et les nutriments. L'augmentation du pH stomacal relevée consécutivement à l'augmentation des apports calciques (Gonzalez-Vega, 2016) pourrait en effet être responsable d'une baisse de la digestibilité des nutriments et ce indépendamment de la présence des phytates. Il est aussi possible d'imaginer que lorsque le Ca est excédentaire, l'activation de l'homéostasie phosphocalcique (Crenshaw, 2001) soit consommatrice de nutriments (énergie, acides aminés...) les rendant ainsi moins disponibles pour la croissance du porc. Enfin, indépendamment des phénomènes d'insolubilisation mentionnés précédemment, les apports calciques seraient également susceptibles d'affecter directement le métabolisme énergétique et les processus inflammatoires chez l'humain, une variation des concentrations en calcium intracellulaire étant en cause (Ferreira *et al.*, 2013).

Tableau 4 – Caractéristiques des phalanges en fonction des teneurs en calcium digestible et en phosphore digestible

Apport en %	Cadig		Pdig				Statistiques ¹			
	0,30	0,40	0,15/0,12	0,20/0,17	0,25/0,22	0,30/0,27	ETR	Cadig	Pdig	CadigxPdig
Poids Phalange, g	14,0	14,1	13,9	13,9	14,2	14,3	1,2	ns	ns	ns
P déposé (g MB)	0,62	0,62	0,57 ^a	0,59 ^a	0,65 ^b	0,66 ^b	0,07	ns	<0,001	ns

¹ETR= écart-type résiduel ; valeurs de P des effets Cadig et Pdig ainsi que de l'interaction entre ces 2 facteurs simples ; ns = non significatif ($P > 0,10$) ; les lettres indiquées en minuscules sur une ligne indiquent que les moyennes ajustées sont différentes au seuil de 5%.

Tableau 5 – Coefficient d'utilisation digestive fécale apparente théorique (CUD_{th}) et mesuré (CUD_m) du calcium et du phosphore

Apport en Cadig	0,30				0,40				Statistiques ¹			
	0,15/0,12	0,20/0,17	0,25/0,22	0,30/0,27	0,15/0,12	0,20/0,17	0,25/0,22	0,30/0,27	ETR	Cadig	Pdig	CadigxPdig
CUD _m Ca, %	62,7 ^f	57,3 ^{de}	51,5 ^{bc}	54,8 ^{cd}	59,8 ^{ef}	45,5 ^a	48,3 ^{ab}	53,7 ^c	4,0	<0,001	<0,001	<0,001
CUD _{th} Ca, %	37,0	39,0	41,1	43,5	36,4	38,1	39,2	40,8				
CUD _m P, %	56,2 ^{cd}	53,6 ^{bc}	50,4 ^b	57,7 ^{de}	56,1 ^{cd}	43,6 ^a	52,0 ^b	60,1 ^e	3,1	ns	<0,001	<0,001
CUD _{th} P, %	34,9	40,0	44,6	48,4	35,7	41,7	46,3	50,0				

¹ETR= écart-type résiduel ; valeurs de P des effets Cadig et Pdig ainsi que de l'interaction entre ces 2 facteurs simples ; ns = non significatif ($P > 0,10$) ; les lettres indiquées en minuscules sur une ligne indiquent que les moyennes ajustées sont différentes au seuil de 5%.

Contrairement à ce qui a été observé sur les performances zootechniques, on note une absence d'effet négatif de l'augmentation des apports en Cadig sur la minéralisation osseuse. Cela semble donc supporter l'idée que les besoins calciques du porc sont supérieurs pour la minéralisation comparativement à ceux pour la croissance des animaux (Gonzalez-Vega, 2016 ; NRC, 2012).

Indépendamment de la teneur en Cadig des régimes, l'augmentation des apports en Pdig induisait une amélioration

des performances en croissance comme en finition, la réponse étant de type linéaire pour le GMQ réalisé en croissance et quadratique pour le GMQ enregistré en finition ainsi que pour l'indice de consommation enregistré sur l'intégralité de l'engraissement. Ainsi, une teneur en Pdig de 0,23% semblerait suffisante pour optimiser l'efficacité alimentaire en croissance (soit 4,3 g/j de Pdig) ainsi que le GMQ et l'IC en finition (soit 5,8 g/j de Pdig). Ces données semblent cohérentes avec les recommandations faites par le NRC (2012) et Jondreville et

Dourmad (2005) selon qui le besoin en P_{dig} apparent serait respectivement de 3,9 et 4,4 g/j pour un porc de 50 kg et de respectivement 5,2 g/j et 5,4 g/j pour un porc pesant 100 kg. Précisons que le besoin en P_{dig} est logiquement affecté par le niveau de croissance réalisée par les animaux (NRC, 2012). Pour la minéralisation des phalanges, le besoin en P_{dig} calculé sur l'intégralité de la période d'engraissement serait légèrement supérieur puisque d'environ 0,25%.

Contrairement à ce que nous imaginions initialement, le besoin en P_{dig} du porc charcutier ne semble donc pas dépendre des apports calciques. En effet, la digestibilité fécale apparente du P n'était que peu impactée par l'augmentation des apports calciques. Cela ne corrobore donc pas les données de Gonzalez-Vega (2016) qui, pour des teneurs en Ca_{dig} comparables à celles considérées dans notre étude, rapportent que la digestibilité du P était réduite lorsque les apports calciques augmentaient. Dans un contexte où l'aliment ne contenait pas de phytase exogène, l'absence d'effet du calcium sur la digestibilité du P a déjà été rapportée dans la littérature (Jolliff et Mahan, 2013; Samson *et al.*, 2017).

Nos données montrent parallèlement une différence importante entre les digestibilités fécales apparentes calculées pour le Ca et le P et celles prévues en formulation (Tableau 5). Les digestibilités obtenues dans cette étude pour le P et le Ca sont cohérentes avec les données de Gonzalez-Vega (2016) selon qui les digestibilités variaient entre 27 et 63% pour le P et entre 47 et 68% pour le Ca dépendamment des apports phosphocalciques, les régimes expérimentaux ne contenant pas de phytase exogène. Les différences observées entre les digestibilités théoriques et celles calculées reflètent probablement la mise en place de l'homéostasie phosphocalcique et du choix des matières premières.

En dessous du besoin en P, la digestibilité de ce nutriment sera améliorée alors qu'au-delà du besoin, sa digestibilité sera réduite (Cromwell, 1996). Parallèlement, un régime bien pourvu en P sera supplémenté en phosphate, matière première présentant une digestibilité du P supérieure à celle des matières premières végétales. Ce décalage observé entre les valeurs mesurées et théoriques, retrouvé dans la plupart des études (Gonzalez-Vega, 2016 ; Fan et Archbold, 2012) peut également mettre en avant un manque de précision dans les connaissances de la digestibilité des minéraux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nos données confirment l'intérêt de piloter précisément les apports calciques chez le porc charcutier. En effet, un excès de Ca est susceptible d'affecter négativement les performances de croissance chez le porc en finition. Les conséquences négatives associées à un apport calcique excessif sont observées quelle que soit la teneur en P_{dig} des régimes dans notre essai où le ratio Ca/P était élevé quel que soit le régime considéré. Ces observations suggèrent donc que l'effet négatif du calcium excédentaire n'est pas uniquement expliqué par son effet sur le métabolisme du phosphore mais également par des mécanismes physiologiques plus complexes.

Par ailleurs, d'après nos résultats, le besoin en P_{dig} pour la croissance des porcs (0,23% sur l'intégralité de l'engraissement) ou encore pour la minéralisation osseuse (0,25%) ne dépend pas des apports en Ca_{dig}. Des travaux complémentaires méritent donc d'être mis en place afin de mieux comprendre l'interaction entre le Ca et le P. Enfin, nos résultats soulignent également l'importance de considérer les phénomènes physiologiques de régulation et d'adaptation dans la détermination de la digestibilité des nutriments.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: A. J. Lewis, and L.L. Southern, editors, Swine nutrition. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL. p. 187-212.
- Cromwell G.L., 1996. Metabolism and Role of phosphorus, Calcium and Vitamin D3 in Swine Nutrition. In: Coelmo M.B. and Kornegay E.T. (eds.), Phytase in animal nutrition and waste management. BASF Corporation, Mount Olive, NJ, USA, pp. 101–110.
- Fan M.Z., Archbold T., 2012. Effects of dietary true digestible calcium to phosphorus ratio on growth performance and efficiency of calcium and phosphorus use in growing pigs fed corn and soybean meal-based diets. *J. Anim. Sci.*, 90, 254–256.
- Ferreira T.D., Torres M.R.S.G., Sanjuliani A.F., 2013. Dietary calcium intake is associated with adiposity, metabolic profile, inflammatory state and blood pressure, but not with erythrocyte intracellular calcium and endothelial function in healthy pre-menopausal women. *Br J. Nutr.*, 110(6), 1079-1088.
- Guéguen L., Pointillart A., 2008. Interactions digestives et métaboliques entre lipides et calcium. *Science des aliments*, 28 (1-2), 117-127.
- Gonzalez-Vega J.C., 2016. Digestibility of calcium and digestible calcium requirement in pigs. Thèse de doctorat. Univ. Illinois, Urbana-Champaign, USA. 210 p.
- Jolliff J.S., Mahan D.C., 2013. Effect of dietary calcium and phosphorus levels on the total tract digestibility of innate and supplemental organic and inorganic microminerals in a corn-soybean meal based diet of grower pigs. *J. Anim. Sci.*, 91, 2775-2783.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. *INRA Prod. Anim.*, 18(3), 183-192.
- Jongbloed A.W., Kemme P.A., De Groote G., Lippens M., Meschy F., 2002. Bioavailability of major and trace minerals. EMFEMA (Eds), Bruxelles, Belgique, 118 p.
- Noblet J., 1993. Les systèmes d'appréciation de la valeur énergétique des aliments pour le porc. *INRA Prod. Anim.*, 6(2), 105-115.
- NRC, 2012. Nutrient requirements of swine: eleventh revised edition. Eds, Natl. Acad. Press, Washington, DC, 210 p.
- Samson A., Quentin M., Schetelat E., Launay C., 2017. Effet des apports calciques sur les performances de croissance, la digestibilité des nutriments et la minéralisation osseuse en interaction avec l'utilisation d'une phytase exogène chez le porc charcutier. *Journées Rech. Porcine*, 49, 87-92.
- Selle P.H., Cowieson A.J., Ravidran V., 2009. Consequences of calcium interactions with phytate and phytase for poultry and pigs. *Livest. Sci.*, 124, 126-141.
- Stein H.H., Adeola O., Cromwell G.L., Kim S.W., Mahan D.C., Miller P.S., 2011. Concentration of dietary calcium supplied by calcium carbonate does not affect the apparent total tract digestibility of calcium, but decreases digestibility of phosphorus by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 2139-2144.
- Yin, Y. L., Mcevoy J. D., Schulze H., McCracken K. J., 2001. Effects of xylanase and antibiotic addition on ileal and faecal apparent digestibilities of dietary nutrients and evaluating HCl-insoluble ash as a dietary marker in growing pigs. *Anim. Sci.*, 72, 95–103.