

Effet des fibres alimentaires sur la digestibilité du phosphore dans des régimes à base de tourteau de colza et supplémentés en phytase microbienne chez le porc en croissance

Marion BOURNAZEL (1,2), Nathalie MEME (1), Michel MAGNIN (2),
Corinne PEYRONNET (3), Alain QUINSAC (4), Michel LESSIRE (1), Etienne LABUSSIÈRE (5), Agnès NARCY (1)

(1) INRA, UR83 Recherches Avicoles, 37380 Nouzilly, France

(2) MiXscience, Centre d'affaires ODYSSEE, 35172 Bruz, France

(3) Terres Univia, 11 rue Monceau, 75008 Paris, France

(4) Terres Inovia, 11 rue Monge, Parc industriel, 33600 Pessac, France

(5) INRA-Agrocampus Ouest, UMR1348 PEGASE, 35590 Saint-Gilles, France

anarcy@tours.inra.fr

Avec la collaboration technique de Maurice ALIX (5), Alain CHAUVIN (5), Didier GAUDRE (IFIP, 35650 LE RHEU), Francis LE GOUEVEC (5), Georges GUILLEMOIS (5), Yolande JAGUELIN (5), Christophe JAEGER (5), Régis JANVIER (5), Jérôme LIGER (5), Vincent PIEDVACHE (5), Agnès STARCK (5).

Effet des fibres alimentaires sur la digestibilité du phosphore dans des régimes à base de tourteau de colza supplémentés en phytase microbienne chez le porc en croissance

L'incorporation du tourteau de colza (TC) dans les aliments destinés aux porcs est limitée du fait de sa teneur relativement élevée en phosphore (P) phytique indigestible et en fibres alimentaires contenues dans les pellicules. L'objectif de l'étude était d'évaluer l'effet combiné de la phytase microbienne (PM, 0 ou 500 FTU/kg) et de la teneur en pellicules, via l'incorporation de TC classique, TC dépelliculé (Cd) ou Cd supplémenté en pellicules de colza (4,5 et 9% respectivement pour CdP1 et CdP2), sur la digestibilité de P de porcs en croissance. Quarante-huit porcs de 36 kg de poids vif initial moyen, logés individuellement, ont reçu l'un des huit régimes expérimentaux durant 29 jours. Les fèces ont été collectées entre J14 et J23. Après abattage, la solubilité de P (solP) dans l'estomac et le cæcum ainsi que les digestibilités iléale et cæcale ont été déterminées après mesure du pH du contenu digestif. L'inclusion de Cd a amélioré la digestibilité fécale de l'énergie, de la matière grasse et de l'azote ($P_{stat} < 0,05$) sans que les performances de croissance ni la digestibilité fécale de P n'aient été modifiées. La solP dans l'estomac était augmentée en présence de PM ($P_{stat} < 0,01$) et négativement corrélée au pH. L'effet positif de la PM était plus marqué sur la digestibilité cæcale de P que sur la digestibilité iléale (+21 vs +3,7 points). Le pH caecal, diminué en présence de pellicules ($P_{stat} < 0,01$), était corrélé négativement avec la solP. La forme d'incorporation du TC ou l'ajout de pellicules de colza n'a pas eu d'effet sur la digestibilité fécale de P. En revanche, le cæcum semble jouer un rôle dans les processus de digestion de P en présence de PM.

Effect of dietary fiber on phosphorus digestibility in growing pigs fed with rapeseed meal-based diets supplemented with microbial phytase

The inclusion of rapeseed meal (RM) in pig diets is limited due to its relatively high content in indigestible phytic phosphorus (P) and dietary fiber contained in hulls. The objective of the study was to evaluate the combined effect of microbial phytase (MP, 0 or 500 FTU/kg) and hull content by the incorporation of regular RM, de-hulled RM (Cd) or Cd supplemented with rapeseed hulls (4.5 and 9% respectively for CdP1 and CdP2) on P digestibility of growing pigs. Forty-eight pigs with 36 kg initial body weight average, individually housed, received one of the eight experimental diets for 29 days. Feces were collected between d14 and d23. After slaughter, the solubility of P (solP) in the stomach and the cecum as well as the ileal and cecal digestibilities were determined after measuring the pH of the digestive content. Inclusion of Cd improved fecal digestibility of energy, fat and nitrogen ($P_{stat} < 0.05$) without affecting growth performance or fecal P digestibility. The solP in the stomach was increased in the presence of MP ($P_{stat} < 0.01$) and negatively correlated with the pH. The effect of the MP was greater on the cecal P digestibility than on the ileal digestibility (+21 vs +3.7 points). The cecal pH decreased in the presence of hulls ($P_{stat} < 0.01$) and was negatively correlated with solP. The form of incorporation of RM or the adding of rapeseed hulls had no effect on P fecal digestibility. However, the cecum seems to play a role in the P digestive processes in the presence of MP.

INTRODUCTION

L'incorporation de tourteau de colza (TC) dans les rations pour porcs en croissance est limitée par sa teneur relativement élevée en phosphore (P) phytique indigestible et en fibres alimentaires (INRA-AFZ, 2004). Le P est en effet majoritairement contenu dans les phytates et donc peu disponible pour les processus de digestion et d'absorption, entraînant d'importants rejets dans l'environnement. La faible valorisation du P phytique conduit à l'incorporation de P minéral, ressource non renouvelable et coûteuse ainsi que l'ajout de phytase microbienne (PM), enzyme hydrolysant les phytates afin de satisfaire les besoins des porcs. Afin d'optimiser l'utilisation de P, de nombreux travaux se sont attachés à redéfinir le besoin en P des animaux, en relation avec l'apport de calcium (Ca) et de PM (Létourneau-Montminy, 2009 ; Rousseau, 2013).

L'utilisation de matières premières riches en fibres pourrait modifier les équilibres entre P, Ca et PM préalablement établis car les fibres modulent la digestion des nutriments majeurs dans l'intestin grêle (Bach Knudsen, 2001). Les fibres étant contenues majoritairement dans les pellicules de colza, le processus de dépelliculage de la graine permettrait de s'affranchir de la partie la plus riche en fibres (Carré *et al.*, 2015). Les fibres présentent néanmoins un intérêt non négligeable puisqu'elles stimulent l'activité fermentaire du cæcum, ce qui permet leur digestion et la baisse du pH, favorable à la mise en solution des nutriments (Démigné *et al.*, 2004). Cependant, très peu d'études rapportent l'effet des fibres sur la digestibilité des minéraux ou sur l'action de la PM. Ainsi, cette expérimentation avait pour objectif de tester spécifiquement l'effet des pellicules et du processus de dépelliculage de la graine de colza (fournie par Terres Inovia, Tableau 1) sur l'efficacité de la PM et la digestibilité du P chez le porc en croissance.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Aliments expérimentaux

Huit régimes expérimentaux à base de maïs (67%) et de tourteau de soja (10%) ont été formulés afin de couvrir les besoins des porcs en croissance, excepté pour le P et le Ca (INRA-AFZ, 2004). La teneur en fibres et la forme du TC ont été modulées par l'ajout de TC standard, de TC dépelliculé, et de pellicules de colza issues du processus de dépelliculage (Tableau 2). La concentration de P et de Ca a été ajustée par l'ajout de carbonate de calcium et de phosphate bicalcique, au détriment de l'amidon de maïs. L'ajout de PM (500 FTU/kg, Natuphos®, de *Aspergillus niger*, BASF SE, Ludwigshafen, Allemagne) a été testé de façon à ce que les régimes supplémentés en PM soient au niveau des recommandations en P digestible (P_{dig}, 0,24%) considérant une équivalence de 0,08 point de P_{dig} pour 500 FTU/kg. Le ratio Ca : P_{dig} était fixé à 2,6 dans tous les régimes. Afin de mesurer les digestibilités iléale et cæcale, du dioxyde de titane (TiO₂) a été ajouté dans tous les régimes expérimentaux (0,30% de matière brute).

1.2. Animaux et conduite expérimentale

Quarante-huit porcs croisés Piétrain x (Landrace x Large White) de 36,1 kg ± 2,7 kg de poids vif (PV) initial ont été utilisés dans cette expérimentation, comprenant deux

Tableau 1 - Caractéristiques analytiques des matières premières (sur frais)

Matières premières	Tourteau de colza	Tourteau de colza dépelliculé	Pellicules
Matière sèche, %	85,10	85,80	85,50
Protéines, %	32,90	39,60	16,80
Matières grasses, %	2,30	1,90	1,70
Cellulose brute, %	13,00	6,50	21,50
ADF, % ¹	17,72	8,16	47,94
NDF, % ¹	27,66	14,59	58,97
ADL, % ¹	8,45	1,99	26,69
Phosphore, %	0,92	1,24	0,20
Calcium, %	0,58	0,40	1,05
Glucosinolates, µmol/g	11,30	21,00	1,90

¹Acid Detergent Fiber, Neutral Detergent Fiber et Acid Detergent Lignin.

répétitions (24 porcs/répétition). Les animaux étaient logés individuellement dans des cages à digestibilité placées dans deux salles. Les porcs ont été répartis par bloc (six blocs de huit animaux) sur la base de leur PV initial et se sont vus attribuer l'un des huit régimes expérimentaux (six animaux/régime). Les porcs ont reçu un aliment standard qui couvrait l'ensemble de leurs besoins pendant les quatre premiers jours de l'essai. De J5 à J7, les porcs ont été nourris avec un mélange de régime standard et de régime expérimental. Enfin, du huitième jour à la fin de l'expérimentation (J29), les porcs ont été nourris exclusivement avec l'un des huit régimes expérimentaux présentés sous forme de granulés. Les animaux ont été maintenus dans les cages à digestibilité jusqu'au jour de l'abattage afin de contrôler la consommation individuelle journalière. La quantité d'aliment allouée était de 1,5 kg/j en moyenne, et était distribuée en deux repas par jour. Les porcs ont été pesés à J0, J8, J14, J23 à jeun. Une collecte totale de fèces a été réalisée entre J14 et J23 afin de déterminer la digestibilité fécale apparente des nutriments. Le jour de l'abattage (J29), pour assurer la synchronisation des prélèvements, la distribution de l'aliment s'est faite individuellement selon le rang d'abattage de chaque animal. Chaque porc a reçu sa première ration quotidienne le matin puis la deuxième 2h30 avant d'être abattu l'après-midi. Les contenus de l'estomac, de l'iléon distal et du cæcum ont été prélevés de même que les fémurs.

1.3. Analyses chimiques

Tous les échantillons ont été analysés en double. L'activité phytasique a été mesurée par colorimétrie après incubation dans une solution de phytate de sodium (Engelen *et al.*, 1994). La teneur en matière sèche (MS) des régimes, fèces, et des contenus de l'iléon et du cæcum a été déterminée après 4 h dans une étuve à 103°C. Les échantillons ont ensuite été incinérés à 550°C pendant 8 h. Les cendres ont été solubilisées dans un mélange d'acide nitrique 16N et de peroxyde d'hydrogène 30% sur un bain à sec jusqu'à évaporation, et finalement diluées dans l'acide nitrique 0,4N. Le Ca a été dosé par spectrométrie d'absorption atomique (SOLAAR M6, Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) et le P par colorimétrie à l'aide d'un kit UV (BioMérieux SA, Lyon, France). Le fémur droit a été dégraissé à l'éther diéthylique

Tableau 2 – Composition¹ et caractéristiques nutritionnelles² des régimes expérimentaux

Régimes ³	C		Cd		CdP1		CdP2	
	0	500	0	500	0	500	0	500
Dose de phytase, FTU/kg								
Ingrédients, %								
Tourteau de colza (TC)	15,0	15,0						
Tourteau de colza dépelliculé			10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Pellicules de colza					4,5	4,5	9,0	9,0
Carbonate de calcium	0,45	0,99	0,56	1,10	0,44	0,98	0,33	0,86
Amidon de maïs	6,08	6,08	10,29	10,29	6,03	6,03	1,73	1,73
Phytase ⁴	0	0,005	0	0,005	0	0,005	0	0,005
Caractéristiques nutritionnelles								
Matière sèche, % ⁵	87,3	88,5	88,0	87,9	87,3	88,2	87,4	88,7
Phytase, FTU/kg ⁵	<100	650	<100	450	<100	870	<100	630
Calcium (Ca), % ⁵	0,44	0,62	0,40	0,58	0,44	0,57	0,44	0,60
Phosphore total (Pt), % ⁵	0,46	0,44	0,44	0,43	0,45	0,45	0,46	0,47
Ca : Pt	1,0	1,4	0,9	1,3	1,0	1,3	1,0	1,3
P digestible (Pdig), % ⁶	0,16	0,24	0,16	0,24	0,16	0,24	0,16	0,24
Ca : Pdig	2,8	2,6	2,6	2,5	2,8	2,4	2,7	2,5
Cellulose brute, % ⁶	3,77	3,77	2,89	2,89	4,01	4,01	5,13	5,13
NDF, % ⁶	9,12	9,12	7,15	7,15	9,62	9,62	12,09	12,09

¹Tous les aliments contiennent : maïs (67%), tourteau de soja (10%), P-bicalcique (0,40%), L-Lysine HCl (0,36 à 0,44%), DL-méthionine (0,30 à 0,50%), TiO₂ (0,30%), NaCl (0,25%), L-thréonine (0,080 à 0,130%), L-tryptophane (0,030 à 0,040%), mélange d'oligoéléments et vitamines (0,50%).

²Sur frais.

³C : tourteau de colza standard, Cd : tourteau de colza dépelliculé, CdP1 : tourteau de colza dépelliculé + 4,5% de pellicules et CdP2 : tourteau de colza dépelliculé avec 9% de pellicules ; sans et avec phytase microbienne (0 : 0 FTU/kg ou 500 : 500 FTU/kg).

⁴Phytase microbienne ; Natuphos®, produit par Aspergillus niger (10000 FTU/g, BASF SE, Ludwigshafen, Allemagne).

⁵Valeurs analysées (section Matériel et méthodes).

⁶Valeurs théoriques, Pdig calculé selon INRA-AFZ (2004) ; NDF : Neutral Detergent Fiber.

puis séché (18h, 103°C) et incinéré (16h, 600°C). La densité osseuse (DO) du fémur gauche a été déterminée au moyen d'un CT-scan (Siemens Emotion Duo, Erlangen, Allemagne). Les teneurs en azote (N, méthode Kjeldahl), énergie (E, calorimètre isopéribole IKA C-7000, IKA-Analysentechnik Heitersheim D-79423) et matières grasses (MG, avec hydrolyse préalable puis extraction avec de l'éther de pétrole) ont été analysées dans les régimes et les fèces afin de mesurer leur digestibilité. La teneur en glucosinolates du tourteau de colza entier et dépelliculé ainsi que des pellicules de colza a été déterminée par HPLC (ISO 9167 – 1 :1992). La teneur en cellulose brute de ces matières première a été déterminée selon la méthode de Weende (NF-V03040) et le dosage des parois végétales (ADF, NDF et ADL) selon la méthode de van Soest *et al.* (1991, NF-V18122). La concentration en TiO₂ dans les régimes et les contenus digestifs a été déterminée par dosage colorimétrique (Njaa, 1961).

1.4. Calculs et analyses statistiques

La digestibilité fécale apparente (digF) a été calculée selon l'équation suivante :

$$\text{digF (\%)} = \frac{(P_{\text{ingéré}} - P_{\text{excrété fécal}})}{P_{\text{ingéré}}} * 100$$

Où *P_{ingéré}* : quantité de P ingéré sur la période J14-J23 (g), et *P_{excrété fécal}* : quantité de P excrété dans les fèces sur la période J14-J23 (g).

Les digestibilités iléale (digI) et cœcale (digC) ont été calculées par l'équation suivante :

$$\text{digI ou digC (\%)} = 100 - \left(100 * \left(\frac{P_{\text{tirégime}}}{P_{\text{tisegment}}} \right) * \left(\frac{P_{\text{psegment}}}{P_{\text{prégime}}} \right) \right)$$

où *Tirégime et Tisegment* : titane analysé dans le régime et le contenu digestif (%),

et *Prégime et Psegment* : P analysé dans le régime et le contenu digestif (%).

Les données ont été soumises à une analyse de variance avec la procédure MIXED de SAS (version 9.4, SAS Inst. Inc. Cary, NC). Le porc était considéré comme l'unité expérimentale, le régime expérimental comme effet fixe, et le bloc, la salle et la répétition comme facteurs aléatoires. Trois paramètres ont été étudiés grâce à des contrastes orthogonaux : l'effet linéaire de la phytase microbienne (moyenne des régimes sans phytase vs moyenne des régimes avec phytase), l'effet linéaire du dépelliculage, avec et sans phytase (C₀ vs Cd₀ et C₅₀₀ vs Cd₅₀₀), et les effets linéaires et quadratiques de la teneur en pellicules, avec et sans phytase (Cd₀ vs CdP1₀ vs CdP2₀ et Cd₅₀₀ vs CdP1₅₀₀ vs CdP2₅₀₀) soient au total sept contrastes. Les différences sont considérées comme significatives lorsque la P-value $P_{\text{stat}} < 0,05$ et une valeur de $P_{\text{stat}} \leq 0,10$ est interprétée comme une tendance statistique. Les relations entre P soluble dans le cæcum et pH du contenu ainsi que la surface supérieure à 250 HU et la proportion de P soluble dans l'estomac ont été établies à l'aide de la procédure REG de SAS.

2. RESULTATS

Les teneurs en P total des régimes étaient conformes aux valeurs attendues (de 0,44 à 0,46%). Concernant le Ca, les valeurs étaient légèrement supérieures sans PM (0,43% en moyenne vs 0,41% attendu) et légèrement inférieures avec PM (0,60% en moyenne vs 0,62% attendu). Par conséquent, le ratio Ca : Pdig était compris entre 2,4 et 2,8 au lieu de 2,6

Tableau 3 - Digestibilité fécale apparente des nutriments et minéralisation osseuse

	Traitements					Statistiques ²									
	C		Cd		CdP1		CdP2		Dépêlliculage			Pellicules			
	0	500	0	500	0	500	0	500	0	500	0	500	0	500	
<i>n</i> ¹	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Digestibilité fécale, %															
Azote	81,1	79,8	86,7	86,3	81,5	81,1	76,7	78,4	0,9	0,87	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Energie	86,0	85,1	89,8	89,3	85,9	85,5	81,4	82,8	0,7	0,69	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Matières Grasses	70,7	70,9	74,5	74,0	73,1	70,6	72,3	68,8	0,1	0,08	<0,05	0,08	0,22	0,34	<0,01
Phosphore	29,5	43,0	26,3	45,0	24,1	45,8	24,7	44,5	1,6	<0,01	0,29	0,51	0,61	0,85	0,87
Caractéristiques															
Poids sec, g	83,8	91,4	89,0	85,2	81,4	97,0	87,1	88,8	1,5	0,06	0,35	0,27	0,73	0,70	0,51
Poids de cendres, g	31,6	36,8	32,3	36,0	29,9	38,0	32,3	36,7	0,6	<0,01	0,63	0,55	1,00	0,31	0,62
Cendres, % MS	38,3	40,3	36,5	42,6	37,0	39,4	37,6	41,3	0,6	<0,01	0,44	0,36	0,63	0,67	0,61
DO > 250 HU ³ , cm ²	6,40	8,43	6,93	7,74	5,99	8,50	6,91	8,27	0,17	<0,01	0,19	0,09	0,97	0,19	0,19

¹ Nombre de porcs par traitement. ² ETM= erreur type de la moyenne ; analyse de la variance avec le traitement comme effet principal et le porc comme unité expérimentale. ; valeurs de P_{test} pour le test par contraste des effets linéaires (Lin) et quadratiques (Qua) : effet de la phytase microbienne (PM), moyenne de C₀, Cd₀, CdP1₀ et CdP2₀ vs moyenne C₅₀₀, Cd₅₀₀, CdP1₅₀₀ et CdP2₅₀₀), du dépêlliculage (C vs Cd) et de la teneur en pellicules (Cd vs CdP1 vs CdP2) avec et sans PM (0 et 500 respectivement). ³ Densité osseuse ; surface totale représentée par les pixels ayant une absorption supérieure à 250 HU.

Tableau 4 - Digestibilité caecale du phosphore (P), solubilité du phosphore dans l'estomac et le caecum, et pH des contenus digestifs

	Traitements						Statistiques ¹								
	C		Cd		CdP1		CdP2		Dépêlliculage			Pellicules			
	0	500	0	500	0	500	0	500	0	500	0	500	0	500	
<i>n</i> ¹	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Digestibilité caecale, %															
P total, mg/g ²	50,45	71,58	48,17	71,03	50,58	65,92	42,71	67,19	1,92	<0,01	0,68	0,48	0,61	0,14	0,45
P soluble, mg/g ²	2,89	2,92	2,69	2,78	3,06	2,96	2,94	3,14	0,08	0,71	0,49	0,64	0,40	0,81	0,23
P soluble, mg/g ²	0,29	0,52	0,23	0,52	0,28	0,59	0,28	0,57	0,03	<0,01	0,46	1,00	0,50	0,69	0,57
P soluble, % P total ³	9,97	17,50	8,43	21,92	9,51	20,60	9,74	18,11	0,93	<0,01	0,49	0,07	0,56	0,69	0,11
Solubilité dans le caecum															
P total, mg/g ²	16,45	10,17	18,68	13,76	15,64	12,22	14,64	10,17	0,53	<0,01	0,14	<0,05	<0,01	<0,05	<0,05
P soluble, mg/g ²	0,42	0,17	0,37	0,26	0,40	0,24	0,49	0,27	0,02	<0,01	0,38	0,07	<0,05	<0,05	0,87
P soluble, % P total ³	2,55	1,87	1,98	1,92	2,55	1,99	3,36	2,71	0,11	<0,01	0,12	0,88	<0,01	<0,01	<0,05
pH des contenus digestifs															
estomac	5,26	5,53	5,55	5,56	5,45	5,45	5,18	5,64	0,05	0,10	0,17	0,88	0,09	0,09	0,72
iléon distal	7,52	7,79	7,57	7,44	7,63	7,68	7,60	7,50	0,05	0,80	0,77	0,06	0,89	0,99	0,72
caecum	5,75	6,05	6,14	5,93	6,03	5,87	5,84	5,85	0,03	0,84	<0,01	0,28	<0,01	<0,01	0,45

¹ Voir Tableau 3. ² Teneur de P total et soluble, en mg/g de contenu sec. ³ Proportion de P inorganiquement soluble en % de P total dans le contenu déshydraté.

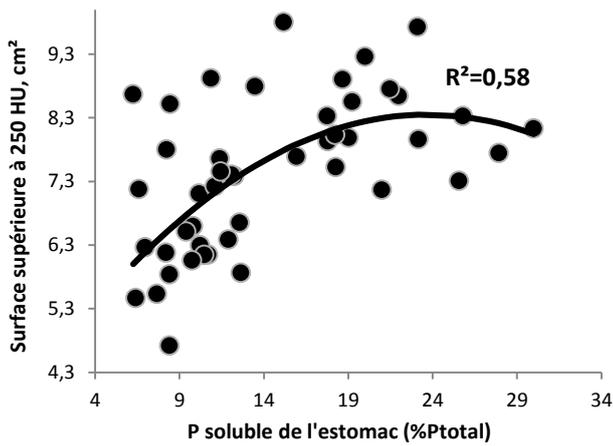


Figure 1 - Surface supérieure à 250 HU du fémur des porcs en fonction du pourcentage de phosphore soluble dans l'estomac ($n = 47$)

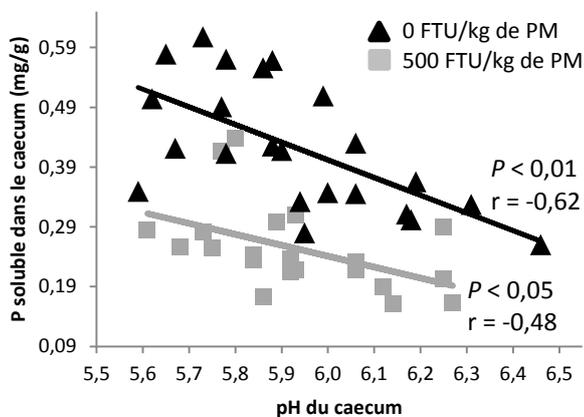


Figure 2 - Phosphore soluble dans le caecum (mg/g) en fonction du pH du caecum ($n = 44$)

attendu. L'activité phytasique était de 650, 450, 870 et 630 FTU/kg respectivement pour les régimes C_{500} , Cd_{500} , CdP_{1500} et CdP_{2500} . Les régimes sans PM présentaient une activité inférieure à 100 FTU/kg (limite de quantification).

2.1. Performances de croissance et digestibilité des nutriments

Les porcs se sont bien adaptés aux régimes expérimentaux. La teneur en pellicules, le dépelliculage et la PM n'ont pas eu d'effet significatif sur la vitesse de croissance entre J8 et J23 (778 g/j en moyenne, $P_{stat} > 0,10$) et le PV à J23 (données non présentées ; 52,6 kg en moyenne, $P_{stat} > 0,10$). Un effet positif du dépelliculage a été observé sur la digestibilité de l'azote (digN) et de l'énergie (digE), avec et sans PM ($P_{stat} < 0,01$; Tableau 3). L'augmentation de la teneur en pellicules a engendré une diminution de la digE et la digN (Lin, Qua : $P_{stat} < 0,01$) avec et sans PM. La digestibilité de la matière grasse (digMG) a été améliorée grâce au dépelliculage de la graine de colza sans PM ($P_{stat} < 0,05$) et avec PM ($P_{stat} = 0,08$). La digMG est également diminuée par la présence de pellicules dans les régimes avec PM (Lin : $P_{stat} < 0,01$ et Qua : $P_{stat} < 0,05$).

2.2. Minéralisation osseuse et bilan du P

La présence de PM a amélioré les caractéristiques des fémurs (Tableau 3). Le dépelliculage, en présence de PM, tendait à diminuer la DO (8,43 cm² pour C_{500} vs 7,74 cm² pour Cd_{500} ; $P_{stat} = 0,09$).

La PM a eu un effet positif sur la digF de P (Tableau 3). Celle-ci a été augmentée de 18 points en moyenne (26 vs 45%, respectivement sans et avec PM). En revanche, aucun effet des pellicules ou du dépelliculage n'a été observé sur ce critère.

2.3. Digestibilités iléale et cœcale et solubilités

La digI de P était de 43% en moyenne (donnée non présentée), et n'a pas été influencée par la teneur en pellicules, la PM ou le dépelliculage. En revanche, la digC de P a été améliorée en présence de PM (+30,4% en moyenne ; $P_{stat} < 0,01$; Tableau 4). Les résultats de solubilité stomacale ont montré une amélioration significative de la teneur de P soluble et du pourcentage de P soluble par rapport au Pt en présence de PM (%Psoluble ; $P_{stat} < 0,01$). Par ailleurs, dans le caecum, la teneur de Pt et P soluble (mg/g de MS), et le %Psoluble étaient plus faibles en présence de PM ($P_{stat} < 0,001$). Avec PM, le dépelliculage a induit une augmentation de la teneur de Pt dans le caecum (+22 %). En l'absence de PM, la teneur en pellicules a entraîné une diminution du Pt dans le caecum (Lin : $P_{stat} < 0,01$ et Qua : $P_{stat} < 0,05$), au profit d'une augmentation de P soluble et de %Psoluble (Lin, Qua : $P_{stat} < 0,05$ et Lin, Qua : $P_{stat} < 0,01$ respectivement). La même tendance a été observée avec PM pour le Pt et le %Psoluble.

3. DISCUSSION

Le processus de dépelliculage a permis d'augmenter la digestibilité de l'E (+4 points), de l'N (+6 points) et de la MG (+3 points). L'apport croissant de pellicules de colza majoritairement indigestibles a contribué à la diminution de la digestibilité, illustrant l'effet négatif des fibres alimentaires. Le gain de poids n'a pas été affecté par ces différences, probablement en raison de la durée limitée de l'expérimentation. Il apparaît que le dépelliculage et l'ajout de pellicules n'ont pas impacté de manière significative la digF de P. La PM a permis de diminuer de 25,3% la quantité de P fécal, soit une diminution de 1,30 g par jour et par animal. La digF de P était ainsi améliorée de 18 points en moyenne. Akinmusire et Adeola (2009) avaient auparavant montré une augmentation de la digF de P de 30 points avec une activité phytasique mesurée d'environ 930 FTU/kg. Les valeurs de digF de P sont faibles mais en adéquation avec de précédentes études (Liu *et al.*, 2014 ; Vilariño *et al.*, 2015). Adhikari *et al.* (2015) avaient par exemple obtenu des valeurs de digF de P allant de 19% à 30% sans supplémentation en phytase. Le calcul de l'équivalence en Pdig de la PM a permis de mettre en évidence une moindre valorisation pour le régime C (+0,05 point avec 650 FTU/kg) comparé aux trois autres régimes Cd, CdP1 et CdP2 (+0,07, +0,09 et +0,08 point respectivement avec 450, 870 et 630 FTU/kg). Le processus de dépelliculage de la graine de colza aurait donc permis une meilleure accessibilité de la PM aux phytates, permettant une valorisation plus importante par rapport au tourteau de graines entières. Ainsi, bien qu'une valeur équivalente de digestibilité apparente de P puisse être utilisée en pratique pour le tourteau classique et le tourteau de graines dépelliculées, l'équivalence attribuée à la PM doit être adaptée. L'augmentation de la digF de P grâce à la PM s'est répercutée sur la qualité minérale de l'os, notamment sur le poids de cendres (+5,3 g), la teneur en cendres (+3,6 points) et la densité osseuse (+26%). Cet effet positif de la PM s'explique par le fait que le P est majoritairement stocké au niveau du squelette. La tendance à l'amélioration de la DO

dans le régime Cd₅₀₀ comparé au régime C₅₀₀ est probablement liée à une activité phytasique réelle moindre (650 vs 450 FTU/kg). Dans l'estomac, le pH relativement acide permet une action optimale de la PM (Pointillart, 1994). Les résultats de solubilité montrent une amélioration de 10 points du %Psoluble grâce à la PM (9,4% vs 19,5% sans et avec PM respectivement). La relation entre la densité osseuse du fémur et le %Psoluble dans l'estomac (Figure 1) montre l'importance de l'étape de solubilisation dans le tube digestif proximal.

Il est surprenant que les valeurs absolues de digI et de digC de P observées dans la présente étude soient plus élevées que celles de digF. Les valeurs de digI rapportées dans la littérature sont généralement plus faibles qu'au niveau fécal. La méthodologie employée dans ces études, i.e. canule rééminente ou anastomose iléo-rectale, permet de limiter les biais inhérents à l'échantillonnage qui peut se faire en continu et d'obtenir des valeurs moyennes représentatives. La méthodologie utilisée dans la présente étude pour déterminer les digI et digC, qui s'appuie sur l'inclusion d'un marqueur indigestible et sur un échantillonnage ponctuel, est peu représentative d'un état d'équilibre. Aussi, les valeurs absolues de ces critères sont à relativiser au regard de celles de digF obtenues par bilan digestif sur plusieurs jours. Contrairement à de précédentes études, la PM n'a pas amélioré de manière significative la digI de P. Seule une augmentation numérique (+4 points) a été observée. Cervantes *et al.* (2011) avaient montré une augmentation de 12 points avec 1050 FTU/kg. La digC de P est plus élevée que la digI (respectivement 59 et 43%) et un effet positif de la PM est observé, suggérant une participation active de ce segment dans les processus de digestion de P (Liu *et al.*, 2000).

Des complexes de phytates-cations et phosphates-cations se forment au cours de l'avancée du chyme alimentaire et de la remontée du pH dans l'intestin grêle, malgré l'action de la PM (Hurwitz, 1971). Les fermentations dans le cæcum provoquent une baisse du pH (-1,7 point avec l'iléon distal) permettant une solubilisation de ces complexes et donc de P. Cette hypothèse est étayée par la relation entre la solubilité de P et le pH dans le cæcum (Figure 2), avec et sans PM. Le pH est diminué significativement en présence de pellicules (6,14 vs 6,03 vs 5,84, respectivement pour Cd₀, CdP₁₀ et CdP₂₀), et augmenté lors du dépelliculage (5,75 vs 6,14, respectivement pour C₀ et Cd₀). En présence de pellicules et de PM, la diminution du pH dans le cæcum est moins importante et non significative, probablement à cause de la plus grande teneur en carbonate de calcium des régimes (0,45 vs 0,98%, respectivement sans et avec PM). Par ailleurs, le P total et le %Psoluble dans le contenu cæcal étaient diminués chez les animaux nourris avec des régimes supplémentés en PM suggérant une absorption facilitée.

CONCLUSION

Cette étude montre que les fibres alimentaires impactent différemment la digestibilité de P et les digestibilités de l'E, de l'N et des MG. Le processus de dépelliculage ou l'ajout de pellicules n'affecte pas la digestibilité fécale de P mais la valorisation de la PM en termes de Pdig semble plus limitée en présence de tourteau de colza entier. Il apparaît également que le cæcum pourrait jouer un rôle dans les processus de digestion de P, en particulier dans les régimes supplémentés en PM.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adhikari P.A., Heo J.M., Nyachoti C.M., 2015. True and standardized total tract phosphorus digestibility in canola meals from black and yellow fed to growing pigs J. Anim. Sci., 93 (1), 209-216.
- Akinmusire A.S., Adeola O., 2009. True digestibility of phosphorus in canola and soybean meal for growing pigs: influence of microbial phytase. J. Anim.Sci., 87 (3), 977-983.
- Bach Knudsen K.E., 2001. The nutritional significance of "dietary fibre" analysis. Anim. Feed Sci. Technol., 90, 3-20.
- Carré P., Quinsac Q., Citeau M., Fine F., 2015. A re-examination of the technical feasibility and economic viability of rapeseed dehulling. OCL, 22 (3), D304.
- Cervantes M., Gome, R., Fierro S., Barrera M.A., Morales, A., Araiza B.A., Zijlstra R.T., Sanchez J.E., Sauer W.C., 2011. Ileal digestibility of amino acids, phosphorus, phytate and energy in pigs fed sorghum-based diets supplemented with phytase and Pancreatin®. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 95, 179-186.
- Démigné C., Rémésy C., Younes H., 2004. Les fibres alimentaires et le métabolisme des acides gras à chaînes courtes. Cahier de Nutrition Préventive, 1, 79-90.
- Engelen A.J., van der Heeft F.C., Randsdorp P.H., Smit E.L., 1994. Simple and rapid determination of phytase activity. J. AOAC Int. 77:760-764.
- Hurwitz S.B., 1971. Calcium and Phosphorus interrelationships in the intestine of the flow. J. Nutr., 101, 677-686.
- INRA-AFZ, 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Sauvart D., Pérez J.M., Tran G., Coord., INRA Eds, Paris, 291 p.
- Njaa L.R., 1961. Determination of protein digestibility with titanium dioxide as indicator substance. Acta Agric. Scand., 11, 227-241.
- Létourneau-Montmigny M.P., 2009. Modélisation du métabolisme phosphocalcique chez le porc et le poulet en croissance. Thèse de doctorat. Université de Laval, Québec, Canada et AgroParisTech, Paris, France, 300 p.
- Liu J., Bollinger D.W., Ledoux D.R., Venum T.L., 2000 Effect of dietary calcium: phosphorus ratios on apparent absorption of calcium and phosphorus in the small intestine cæcum and colon of pigs. J. Anim. Sci., 78, 106-109.
- Liu J.B., Yang Y.K., He J., Zeng F.K., 2014. Comparison of two diets types in the estimation of true digestibility of phosphorus in soybean meal and canola meals for growing pigs by the regression method. Livest. Sci., 167, 269-275.
- Pointillart A., 1994. Phytates, phytases: leur importance dans l'alimentation des monogastriques. INRA Prod. Anim., 7, 29-39.
- Rousseau X., 2013. Optimisation de l'utilisation de phosphore alimentaire chez le porc et le poulet en croissance. Thèse de doctorat. Université de Tours, France, 150 p.
- Vilariño M., Callu P., Quinsac A., Peyronnet C., Gaudré D., 2015. Digestibilité vraie du phosphore de deux coproduits de bioéthanol issus de blé et d'un tourteau de colza : additivité chez le porc en croissance. Journées Rech. Porcine, 47, 139-140.
- Van Soest P.J., Robertson J., Lewis B.A., 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition. J. Dairy. Sci., 74, 3583-3597.