

Remplacement du sulfate de zinc par de la phytase microbienne dans des aliments pour porcelets sevrés

Catherine JONDREVILLE (1), Ruth HAYLER (2), Dieter FEUERSTEIN (2)

(1) Institut National de la Recherche Agronomique,
Unité Mixte de Recherches sur le Veau et le Porc, 35590 Saint-Gilles, France
(2) BASF AG, E-MME/A Rheincenter 5. OG, 67056 Ludwigshafen, Allemagne

Avec la collaboration technique de Sandrine Hillion, Christelle Homo et Patrick Touanel ainsi que de Maurice Alix, Georges Conseil, Hervé Demay, Georges Guillemois, Michel Lefebvre, Jérôme Liger, Henri Renoult, Jean-François Rouaud et Raymond Vilboux.

Remplacement du sulfate de zinc par de la phytase microbienne dans des aliments pour porcelets sevrés

Quarante-huit porcelets sevrés sont utilisés dans un essai de 19 jours destiné à calculer une équivalence entre phytase microbienne (3-phytase obtenue à partir d'*Aspergillus niger*) et Zn sous forme de sulfate. Un aliment à base de maïs et de tourteau de soja contenant 30 mg de Zn / kg est additionné de 10, 25, 40 ou 100 mg de Zn ou de 100, 250, 500 ou 750 unités de phytase microbienne (FTU)/ kg. La teneur en Zn et l'activité de la phosphatase alcaline (APA) plasmatiques, de même que la teneur en Zn de l'os augmentent de façons linéaire ($P < 0,001$) et quadratique (respectivement $P < 0,01$; $< 0,001$ et $< 0,001$) avec le Zn ajouté. Ces critères augmentent de façons linéaire ($P < 0,001$) et quadratique (respectivement $P < 0,05$; $< 0,001$ et $< 0,05$) avec la phytase ajoutée. La teneur en Zn du foie augmente de façon quadratique avec le Zn ajouté ($P < 0,05$) et tend à augmenter linéairement avec la phytase ajoutée ($P = 0,077$). À partir d'équations de réponse des indicateurs du statut en Zn au Zn et à la phytase ajoutés, une fonction d'équivalence entre Zn sous forme de sulfate (Zn, mg) et phytase microbienne (Phyt, FTU) de la forme $Zn = 49,9 - 58,3 e^{-0,0023 \text{ Phyt}}$ est établie. Cette équation permet d'estimer que 250, 500 et 750 FTU sont équivalentes à respectivement 17, 32 et 40 mg de Zn sous forme de sulfate.

Replacement of zinc sulphate by microbial phytase for piglets

Forty-eight pigs, weaned at 27 d of age at an average body weight of 7.55 kg were used in a 19-d experiment to calculate equivalency values of Zn as sulphate for microbial phytase (3- phytase from *Aspergillus niger*). A maize-soybean meal basal diet containing 30 mg of Zn / kg was supplemented with 10, 25, 40 or 100 mg of Zn from sulphate or with 100, 250, 500 or 750 units of microbial phytase (FTU) / kg. Plasma Zn, plasma alkaline phosphatase activity (APA) and bone Zn increased linearly ($P < 0.001$) and quadratically ($P < 0.01$, < 0.001 and < 0.001 , respectively) with Zn added. These parameters also increased linearly ($P < 0.001$) and quadratically ($P < 0.05$, < 0.001 and < 0.05 , respectively) with phytase added. Liver Zn increased quadratically ($P < 0.05$) with Zn added and tended to increase linearly with phytase added ($P = 0.077$). From linear and nonlinear response equations of the indicators of Zn status to Zn added and phytase added, a function of equivalency of zinc as sulphate (Zn, mg) for microbial phytase (Phyt, FTU) of the following form $Zn = 49.9 - 58.3 e^{-0.0023 \text{ Phyt}}$ was developed. From this equation it was estimated that 250, 500, and 750 FTU can replace 17, 32 and 40 mg of Zn as sulphate, respectively, in a piglet diet.

INTRODUCTION

L'acide phytique, principale forme de stockage du phosphore dans les matières premières d'origine végétale, limite la disponibilité de certains cations di- et trivalents en formant des complexes insolubles. En particulier, l'acide phytique présente une forte affinité pour le Zn dans les conditions physico-chimiques du tube digestif (DAVIES et NIGHTINGALE, 1975) et limite sa disponibilité chez les animaux monogastriques (OBERLEAS et al, 1962, 1966). La présence de quantités importantes de phytates dans les aliments a donc des conséquences négatives sur les rejets non seulement de P mais également de Zn par les porcs (JONDREVILLE et al, 2003).

L'usage de phytase microbienne pour améliorer la disponibilité du P et en limiter les rejets par les porcs est désormais courant (KORNEGAY, 2001). Par ailleurs, la démonstration de l'amélioration de la disponibilité du Zn grâce à cette enzyme a été faite à plusieurs reprises (PALLAUF et al, 1992, 1994 ; LEI et al, 1993 ; ADEOLA et al, 1995). REY et al (2004a et b) ont estimé que 700 et 1200 unités de 3-phytase obtenue à partir d'*Aspergillus niger* (FTU) sont équivalentes à environ 35-40 mg de Zn sous forme de sulfate ajoutés dans un aliment pour porcelets sevré à base de maïs et de tourteau de soja. Cependant, aucune équivalence entre Zn et phytase n'a été établie, ce qui limite l'utilisation pratique de cette enzyme pour abaisser les apports de Zn dans les aliments pour porcs.

Le but de la présente expérimentation est d'établir une équation d'équivalence entre phytase microbienne et Zn sous forme de sulfate, dans un aliment à base de maïs et de tourteau de soja pour porcelets sevrés.

1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

1.1. Aliments expérimentaux

Un aliment à base de maïs et de tourteau de soja, contenant 30 mg de Zn / kg, a été formulé de façon à satisfaire l'ensemble des besoins nutritionnels du porc entre 5 et 15 kg (INRA, 989 ; NRC, 1998), à l'exception du Zn (tableau 1). Les huit régimes expérimentaux ont été élaborés à partir de l'aliment de base en lui ajoutant 10, 25, 40 ou 100 mg de Zn sous forme de sulfate ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) / kg ou 100, 250, 500 ou 750 unités (FTU) de phytase microbienne (3-phytase produite par *Aspergillus niger*, BASF AG, Ludwigshafen, Allemagne) / kg. La teneur en Zn du lot de sulfate utilisé était de 322 g / kg et l'activité phytasique du lot de phytase utilisé de 6500 FTU / g. L'apport de P minéral et de Ca a été ajusté en fonction de l'addition de phytase microbienne en considérant que 100 FTU correspondent à 0,16 g de P digestible apparent et 0,20 g de Ca pour des niveaux de supplémentation inférieurs à 500 FTU et à 0,08 g de P digestible apparent et 0,10 g de Ca pour des niveaux supérieurs. Les matières premières ont été broyées avec un broyeur à marteaux muni d'une grille de 2,5 mm avant

Tableau 1 - Composition et caractérisation analytique de l'aliment de base

Matières premières	g / kg	Caractérisation analytique	/ kg
Maïs	569	Matière sèche (MS, g) ³	903
Tourteau de soja 48	215	Protéine (N x 6,25, g) ⁴	198
Isolat de soja	40,0	Cendres (g) ³	56,3
Lactosérum doux déshydraté	130	Cellulose brute (g) ⁴	28,0
L-Lysine HCl	4,20	Matière grasse (g) ⁴	28,9
L-Thréonine	2,10	Energie nette (MJ) ⁴	10,2
DL Méthionine	2,80	Ca (g) ³	9,55
L-Tryptophane	0,800	P (g) ³	6,82
Sel	2,00	P phytique (g) ⁴	2,14
Carbonate de calcium ¹	15,6	P digestible (g) ⁴	3,78
Phosphate monobasique ¹	13,6	Cu (mg) ³	11
COV ²	5,00	Zn (mg) ³	30
Amidon de maïs	0,311	Fe (mg) ³	143
		Activité phytasique (FTU) ³	60

¹ Les niveaux d'incorporation de carbonate de Ca dans les aliments supplémentés avec 100, 250, 500 et 750 FTU (3-phytase produite à partir d'*Aspergillus niger*) / kg étaient respectivement de 15,6 ; 15,4 ; 15,3 et 15,2 g / kg ; ceux du phosphate monobasique étaient respectivement de 12,4 ; 10,6 ; 7,8 et 6,3 g / kg.

² Sans Zn ajouté, le complément apportait (/kg d'aliment) : Cu ($CuSO_4$) : 5 mg ; Mn (MnO) : 27 mg ; Co ($CoSO_4$) : 2 mg ; I ($Ca(IO_3)_2$) : 1 mg ; Se (Na_2SeO_3) : 0,3 mg ; vitamine K3 : 2 mg ; vitamine B1 : 2 mg ; vitamine B2 : 10 mg ; vitamine B3 : 30 mg ; vitamine B5 : 15 mg ; vitamine B6 : 10 mg ; vitamine B8 : 0,2 mg ; vitamine B9 : 2 mg ; vitamine B12 : 0,05 mg ; choline : 800 mg ; vitamine C : 100 mg ; vitamine A : 15000 UI ; vitamine D3 : 3000 UI ; vitamine E (acétate de DL α -tocophérol) : 40 UI.

³ Analysé selon les procédures suivantes : MS, séchage jusqu'à poids constant à 103°C ; Cendres, P, Ca, Fe, Zn, Cu et activité phytasique, comme décrit dans la partie matériel et méthodes. Les teneurs en Ca des aliments supplémentés avec 100, 250, 500 et 750 FTU / kg étaient respectivement de 9,73 ; 8,79 ; 8,23 et 8,12 g / kg ; leurs teneurs en P étaient respectivement de 6,68 ; 6,12 ; 5,55 et 5,52 g / kg ; leurs activités phytasiques étaient respectivement de 210, 320, 570 et 930 FTU / kg ; leurs teneurs en Zn étaient respectivement de 29, 28, 26 et 26 mg / kg ; la teneur en Zn des aliments supplémentés avec 10, 25, 40 et 100 mg de Zn sous forme de sulfate / kg était de respectivement 40, 50, 67 et 128 mg / kg.

⁴ Calculé (INRA-AFZ, 2002).

d'être mélangées. Durant le processus de fabrication des aliments, la température n'a pas dépassé 50°C. Les aliments ont été distribués aux animaux sous forme granulée.

1.2. Animaux et conduite expérimentale

Quarante-huit porcelets Piétrain x (Large White x Landrace), pour moitié mâles castrés et pour moitié femelles, pesant en moyenne $7,55 \pm 0,79$ kg au sevrage (27 ± 1 jours), ont été placés dans des loges collectives dans lesquelles ils ont reçu, pendant une période d'adaptation de 7 jours, le régime de base *ad libitum*. A l'issue de cette période, six blocs de huit animaux chacun ont été constitués sur la base du type sexuel, du poids vif et de la portée. Les porcs ont ensuite été placés dans des cages individuelles en acier inoxydable et matière plastique pendant 19 jours. Durant cette période, la quantité journalière d'aliment allouée était ajustée à 3,5 % du poids vif et était distribuée en trois repas égaux à 9, 13 et 17 heures. La consommation individuelle d'aliment a été enregistrée quotidiennement. Les porcs avaient accès à de l'eau sans Zn détectable ($< 0,01$ mg/l). Chaque porc a été pesé au début et à la fin de la période expérimentale. La température de la salle a été maintenue à 25 ± 1 °C. A la fin de la période expérimentale et après une nuit de jeûne, les porcs ont été abattus par saignée après avoir été anesthésiés par choc électrique.

1.3. Collecte des échantillons et analyses chimiques

Avant l'abattage et après une nuit de jeûne, un prélèvement sanguin a été effectué sur chaque porc par ponction dans la veine jugulaire au moyen de vacutainers® héparinés. Le plasma, obtenu par centrifugation (1360 g, 10 min, 4 °C), a été congelé à -20 °C. A l'abattage, le foie et la patte antérieure droite de chaque animal ont été prélevés. Le foie a été grossièrement coupé puis lyophilisé. La patte antérieure droite a été cuite à l'autoclave à 120 °C pendant 20 min avant extraction du métacarpe IV, qui a été conservé à -20 °C avant analyses.

Toutes les analyses ont été effectuées en double. L'activité phytasique dans l'aliment de base et dans les aliments additionnés de phytase microbienne a été contrôlée par colorimétrie après incubation dans une solution de phytate de sodium (ENGELEN et al, 1994). L'activité de la phosphatase alcaline plasmatique a été mesurée selon la procédure de Sigma (Sigma 245, St Louis, MO, USA) sur un appareil Cobas Mira (Hoffman-LaRoche, Nutley, NJ). Avant analyse des minéraux, les échantillons ont été préparés comme décrit par REVY et al (2004a et b). Les analyses du Ca, du Fe, du Zn et du Cu ont été effectuées par spectrométrie d'absorption atomique (SpectrAA 220 FS, Varian, Springvale, Australie) et celle du P, selon la méthode colorimétrique Vanadate sur l'appareil Cobas Mira (Hoffman-LaRoche, Nutley, NJ).

1.4. Calculs et analyses statistiques

L'effet du régime a été testé par une analyse de variance suivie d'une comparaison de moyennes. Dans un second temps, les effets linéaire et quadratique des quantités ajou-

tées de Zn (mg / kg d'aliment) et de phytase (FTU / kg d'aliment) sur les indicateurs du statut en Zn (APA plasmatique et teneurs en Zn du plasma, de l'os et du foie) ont été testés par régression linéaire multiple. Ces analyses ont été menées au moyen de la procédure GLM du logiciel SAS (version 8.1, SAS Institute, Cary, NC, USA), en considérant le porcelet comme l'unité expérimentale, selon un dispositif en bloc. Pour ces calculs, les teneurs en Zn et activités phytasiques alimentaires mesurées ont été utilisées.

Dans un second temps, des modèles linéaires (procédure GLM de SAS) et non linéaires (procédure NLIN de SAS) décrivant la réponse des indicateurs du statut en Zn à la supplémentation en Zn ou en phytase microbienne ont été établis en utilisant les moyennes par régime. La précision de chaque modèle a été évaluée au moyen du coefficient de détermination R^2 , calculé comme le carré du coefficient de corrélation entre les valeurs prédites et observées.

Pour les aliments sans phytase ajoutée, un modèle linéaire plateau de la forme suivante a été utilisé : Si $Zn < Opt$, $Y = Max + b(Zn - Opt)$, si $Zn \geq Opt$, $Y = Max$, avec $Zn = Zn$ ajouté sous forme de sulfate (mg / kg d'aliment), $Y =$ indicateur du statut en Zn.

Pour les aliments additionnés de phytase microbienne, un modèle exponentiel de la forme suivante a été utilisé : $Y = a(1 - b e^{-k Phyt})$, avec $Phyt =$ phytase microbienne ajoutée (FTU / kg d'aliment), $Y =$ indicateur du statut en Zn.

Les équations obtenues ont été égalisées afin d'établir des équivalences entre Zn sous forme de sulfate (mg) et phytase microbienne (FTU).

2. RÉSULTATS

La teneur en Zn des aliments expérimentaux est conforme aux valeurs attendues (tableau 1), les différences extrêmes atteignant 10 % pour l'aliment additionné de 25 mg de Zn / kg (50 mesurés vs 55 mg de Zn / kg attendus). L'activité phytasique dans l'aliment de base est de 60 U / kg. Cent cinquante, 260, 510 et 870 FTU ont été ajoutées par kg d'aliment pour 100, 250, 500 et 750 FTU / kg attendues (tableau 1).

2.1. Performances de croissance et indicateurs du statut en Zn

En dépit du rationnement des animaux, la quantité d'aliment consommée diffère entre régimes ($P < 0,05$). Les aliments 1 et 5, supplémentés avec respectivement 10 mg de Zn et 100 FTU / kg ont été les moins consommés ; pour ces aliments, la quantité ingérée est inférieure de 7,7 % ($P < 0,05$) à celle observée avec l'aliment 4, supplémenté avec 100 mg de Zn / kg. La vitesse de croissance et l'indice de consommation sont indépendants de l'aliment ($P > 0,05$) (tableau 2).

Le Zn et l'APA plasmatiques augmentent de façons linéaire ($P < 0,001$) et quadratique (respectivement $P < 0,01$ et $P < 0,001$) avec le Zn ajouté. Ils augmentent également de façons linéaire ($P < 0,001$) et quadratique (respectivement P

Tableau 2 - Effet du régime sur les performances de croissance et les caractéristiques du plasma sanguin, de l'os et du foie des porcelets à l'abattage ¹

Aliment	1	2	3	4	5	6	7	8		
Zn ajouté (mg/kg aliment)	10	25	40	100	0	0	0	0	ETR ³	Probabilité
Phytase ajoutée (FTU/kg aliment)	0	0	0	0	100	250	500	750		
Poids initial (kg)	8,60	8,34	8,52	8,56	8,63	8,50	8,54	8,88		
Poids final (kg)	14,2	14,2	14,5	14,5	14,3	14,7	14,9	14,7	0,7	NS
Consommation (g/j) ²	387 ^a	402 ^{ab}	398 ^{ab}	416 ^b	380 ^a	414 ^b	402 ^{ab}	402 ^{ab}	19	*
Vitesse de croissance (g/j)	294	309	315	311	301	324	334	305	24	NS
IC (kg/kg) ^{2,3}	1,33	1,31	1,27	1,34	1,27	1,29	1,20	1,33	0,09	NS
Zn plasmatique (mg/l)	0,297 ^a	0,552 ^b	0,632 ^{bc}	0,866 ^d	0,341 ^a	0,402 ^a	0,688 ^{bc}	0,744 ^{cd}	0,117	***
APA plasmatique (U/l) ³	88,0 ^a	173 ^b	236 ^c	276 ^d	80,0 ^a	104 ^a	222 ^c	242 ^{cd}	30	***
Cendres osseuses (g/kg MS) ³	395	374	387	376	404	392	380	381	18	NS
Zn osseux (mg/kg MS) ³	37,2 ^a	51,6 ^c	67,9 ^{de}	90,1 ^f	41,2 ^{ab}	45,5 ^{bc}	61,1 ^d	72,0 ^e	6,4	***
Zn hépatique (mg/kg MS) ³	95,2 ^a	103 ^{abc}	112 ^{bcd}	200 ^e	93,5 ^a	100 ^{ab}	117 ^{cd}	126 ^d	13	***

¹ valeurs moyennes, n = 6.

² pour un aliment contenant 90% de matière sèche.

³ IC, indice de consommation ; MS, matière sèche ; APA, activité de la phosphatase alcaline ; ETR, écart type résiduel.

a, b, c, d, e, f les moyennes sur une même ligne suivies de lettres différentes diffèrent entre elles (P < 0,05).

NS, P > 0,05 ; *, P < 0,05 ; **, P < 0,01 ; ***, P < 0,001

< 0,05 et P < 0,001) avec la phytase ajoutée (tableau 2, tableau 3). La teneur en cendres de l'os est indépendante de l'aliment. La teneur en Zn de l'os augmente de façon linéaire (respectivement P < 0,001 et P < 0,001) et quadratique (respectivement P < 0,001 et P < 0,05) avec les suppléments en Zn et en phytase. La teneur en Zn du foie augmente de façon quadratique (P < 0,05) avec la supplémentation en Zn et tend à augmenter linéairement (P = 0,077) avec la supplémentation en phytase microbienne.

Les animaux recevant l'aliment 8, supplémenté avec 750 FTU/kg présentent une teneur en Zn et une APA plasmatiques ainsi que des teneurs en Zn de l'os et du foie inférieures à celles des animaux recevant l'aliment 4, supplémenté avec 100 mg de Zn / kg. Cette différence est numérique pour les deux premiers indicateurs du statut en

Zn (respectivement -14 et -12 %, P > 0,05) ; elle est significative pour les deux derniers (respectivement -20 et -37 %, P < 0,05) (tableau 2).

2.2. Modèles linéaires et non linéaires de réponse du statut en Zn à l'augmentation des suppléments en Zn et en phytase microbienne ; Equivalence entre Zn sous forme de sulfate et phytase microbienne

La meilleure prédiction de la teneur en Zn et de l'APA plasmatiques ainsi que de la teneur en Zn de l'os en fonction de la supplémentation en Zn est obtenue avec le modèle linéaire plateau (R² = 0,73 ; 0,83 et 0,94, respectivement) (tableau 4, figure 1). Ces indicateurs du statut en Zn augmentent linéairement avec la supplémentation en Zn tant qu'elle est inférieure à respectivement 54,4 ; 43,0 et 56,1 mg / kg d'aliment puis se stabilisent à respectivement 0,866 mg / l, 276 U / l et 90,1 mg / kg MS. La meilleure prédiction de la teneur en Zn du foie en fonction de la supplémentation en Zn est linéaire (R² = 0,86).

La meilleure prédiction de chacun des indicateurs du statut en Zn en fonction de la supplémentation de l'aliment en phytase microbienne est obtenue avec le modèle non linéaire (R² = 0,67 ; 0,86 ; 0,70 et 0,77 pour respectivement la teneur en Zn du plasma, l'APA plasmatique, la teneur en Zn de l'os et celle du foie) (tableau 4, figure 1).

Des équivalences entre Zn sous forme de sulfate et phytase microbienne ont été obtenues en égalisant les équations précédentes (tableau 5). Selon les modèles obtenus pour la teneur en Zn du plasma, l'APA plasmatique et les teneurs en Zn de l'os et du foie, 250 FTU sont équivalentes à respectivement 18, 14, 17 et 20, soit en moyenne 17 mg de Zn sous forme de sulfate. Ajouter 250 FTU supplémentaires dans l'aliment pour obtenir une activité phytasique de 500 FTU / kg est équivalent à l'addition de 15 mg supplémentaires de Zn sous forme de sulfate.

Tableau 3 - Régression des indicateurs du statut en Zn sur les quantités de Zn et de phytase microbienne ajoutées dans l'aliment ¹

	Probabilité				ETR ³
	Zn ajouté		Phytase ajoutée		
	L ²	Q ²	L	Q	
Zn plasmatique (mg/l)	***	**	***	*	0,121
APA plasmatique (U/l) ³	***	***	***	***	31,8
Zn osseux (mg/kg MS) ³	***	***	***	*	6,3
Zn hépatique (mg/kg MS) ³	NS	*	0,077	NS	12,3

¹ Les analyses ont été menées en utilisant les données individuelles et les concentrations du Zn et activités phytasiques mesurées dans les aliments.

² Effets linéaire (L) et quadratique (Q) du Zn ajouté dans les aliments sans phytase et de la phytase ajoutée dans les aliments sans Zn sous forme de sulfate.

³ APA, activité de la phosphatase alcaline ; MS, matière sèche ; ETR, écart type résiduel.

NS, P > 0,05 ; *, P < 0,05 ; **, P < 0,01 ; ***, P < 0,001

Tableau 4 - Modèles linéaires et non linéaires de prédiction des indicateurs du statut en Zn en fonction des quantités de Zn et de phytase microbienne ajoutées dans l'aliment ¹

	Zn ajouté ²				Phytase ajoutée ³			
	Coefficients			R ² ⁴	Coefficients			R ² ⁴
Non linéaire	Opt	b	Max		a	b	k	
Zn plasmatique (mg / l)	54,4	0,0115	0,866	0,73	0,826	0,945	0,00284	0,67
APA plasmatique (U / l) ^{3,5}	43,0	5,28	276	0,83	274	1,15	0,00291	0,86
Zn osseux (mg / kg MS) ^{3,5}	56,1	1,12	90,1	0,94	93,8	0,691	0,00127	0,70
Zn hépatique (mg / kg MS) ^{3,5}					134	0,437	0,00232	0,77
Linéaire	a	b			a	b		
Zn plasmatique (mg / l)	0,355	0,00553		0,66	0,292	0,000571		0,62
APA plasmatique (U / l) ^{3,5}	118	1,79		0,62	56,2	0,236		0,77
Zn osseux (mg / kg MS) ^{3,5}	38,6	0,556		0,86	35,9	0,0429		0,69
Zn hépatique (mg / kg MS) ^{3,5}	76,9	1,23		0,86	89,7	0,0442		0,73

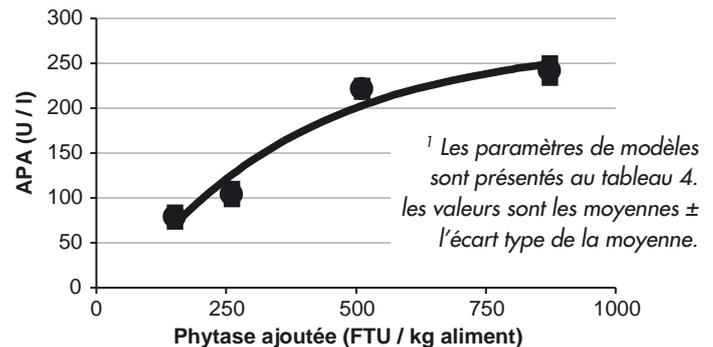
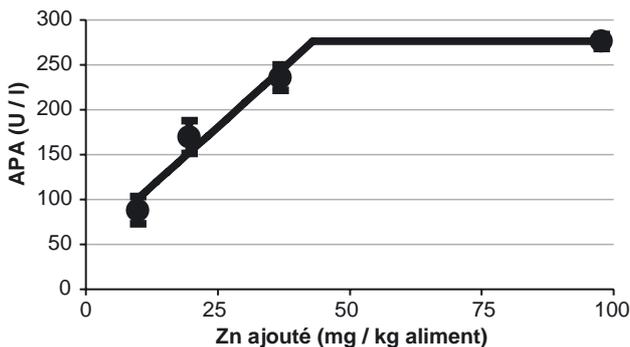
¹ Les modèles ont été ajustés en utilisant les moyennes par traitement ainsi que les concentrations du Zn et activités phytasiques mesurées dans les aliments.

² Le modèle non linéaire est un modèle linéaire plateau de la forme suivante : Si $Zn < Opt$, $Y = Max + b * (Zn - Opt)$, si $Zn \geq Opt$, $Y = Max$; le modèle linéaire est de la forme suivante : $Y = a + b Zn$, avec $Y =$ indicateur du statut en Zn, $Zn = Zn$ ajouté sous forme de sulfate (mg / kg aliment).

³ Le modèle non linéaire est un modèle exponentiel de la forme suivante : $Y = a (1 - b e^{-k Phyt})$; le modèle linéaire est de la forme suivante : $Y = a + b Phyt$, avec $Y =$ indicateur du statut en Zn, $Phyt =$ phytase ajoutée (FTU / kg aliment).

⁴ R², coefficient de détermination calculé comme le carré du coefficient de corrélation entre les valeurs individuelles prédites et observées.

⁵ APA, activité de la phosphatase alcaline ; MS, matière sèche.

**Figure 1** - Modèles non linéaires de prédiction de l'activité de la phosphatase alcaline plasmatique (APA) en fonction des quantités de Zn et de phytase microbienne ajoutées dans l'aliment ¹**Tableau 5** - Equations d'équivalence entre le Zn sous forme de sulfate (mg) et la phytase microbienne (FTU)

Equation ¹	Coefficients			Phytase ajoutée (FTU)		
	a	b	k	250	500	750
Zn plasmatique (mg / l)	51,0	-67,8	0,00284	18	35	43
APA plasmatique (U / l) ²	42,7	-60,0	0,00291	14	29	36
Zn osseux (mg / kg MS) ²	59,3	-58,0	0,00127	17	29	37
Zn hépatique (mg / kg MS) ²	46,5	-47,6	0,00232	20	32	38
Moyenne	49,9	-58,3	0,00233	17	32	40

¹ Equation : $Zn = a + b e^{-k Phyt}$, avec Zn , Zn ajouté sous forme de sulfate (mg) ; $Phyt$, phytase microbienne ajoutée (FTU)

Pour le Zn plasmatique, l'activité de la phosphatase alcaline plasmatique et le Zn osseux, les modèles utilisés sont les modèles non linéaires de prédiction du statut en Zn en fonction du Zn ajouté et de la phytase ajoutée dans l'aliment ; pour le Zn hépatique, les modèles utilisés sont le modèle linéaire en fonction du Zn ajouté dans l'aliment et le modèle non linéaire en fonction de la phytase ajoutée dans l'aliment (tableau 4).

² APA, activité de la phosphatase alcaline ; MS, matière sèche.

3. DISCUSSION

Ni l'addition de 10 mg de Zn sous forme de sulfate ni celle de 150 FTU par kg d'aliment n'ont permis de prévenir l'apparition d'anorexie, première manifestation clinique de la carence en Zn (UNDERWOOD et SUTTLE, 1999).

Cependant, ni la vitesse de croissance, ni l'indice de consommation n'ont été affectés par la supplémentation de l'aliment en Zn ou en phytase.

Pour les aliments sans phytase ajoutée, la teneur en Zn du plasma, l'APA plasmatique et la teneur en Zn de l'os étaient

maximisées lorsque respectivement 54, 43 et 56 mg de Zn étaient ajoutés par kg d'aliment. En tenant compte des 30 mg de Zn contenus dans l'aliment de base, l'apport alimentaire de Zn nécessaire à la maximisation de ces indicateurs était donc de 73, pour l'APA et 94-96 mg de Zn / kg d'aliment pour les autres indicateurs. Ces dernières valeurs sont supérieures aux 80 mg de Zn / kg d'aliment recommandés par le NRC (1998) pour des porcelets sevrés pesant entre 10 et 20 kg. Cependant, HÖHLER et PALLAUF (1994) ont observé qu'un aliment à base de maïs et de tourteau de soja, supplémenté avec du Zn sous forme de sulfate pour atteindre une concentration totale de 80 mg de Zn / kg ne permettait pas de maximiser la teneur en Zn plasmatique de porcelets sevrés. De même, dans une étude menée selon des conditions expérimentales similaires, nous avons estimé à 86-92 mg de Zn / kg d'aliment l'apport alimentaire de Zn nécessaire à la maximisation des indicateurs plasmatiques du statut en Zn chez des porcelets pesant de 9 à 16 kg (REVY et al, 2004a). Au contraire des autres critères étudiés, la teneur en Zn du foie a augmenté avec la supplémentation en Zn de l'aliment sans atteindre de plateau, même pour un apport alimentaire de 128 mg / kg d'aliment. Cet organe, qui joue un rôle central dans le métabolisme du Zn, a la capacité de le stocker en cas d'excès alimentaire (REVY et al., 2003).

L'absence de diminution de la teneur en cendres des os, en dépit de la diminution des teneurs en P et Ca dans les aliments additionnés de phytase microbienne suggère l'efficacité de la phytase pour hydrolyser les phytates dans la présente étude. L'augmentation de la disponibilité du Zn consécutive à l'addition de phytase microbienne dans des aliments pour porcs a été observée à plusieurs reprises (PALLAUF et al, 1992, 1994 ; LEI et al, 1993 ; ADEOLA et al, 1995 ; REVY et al, 2004 a et b). Comme pour le P, la réponse des indicateurs du statut en Zn à l'augmentation de l'activité phytasique dans l'aliment n'est pas linéaire, mais l'efficacité de la phytase microbienne par unité est d'autant plus élevée que le niveau de supplémentation est faible (KORNEGAY et QIAN, 1996 ; YI et al, 1996). De plus, la teneur en Zn des tissus était plus élevée lorsque l'aliment était supplémenté avec 100 mg de Zn plutôt qu'avec 750 FTU/kg, ce qui suggère que la phytase était le facteur limitant à l'amélioration du statut en Zn des animaux.

Dans une récente revue KORNEGAY (2001) propose une équation d'équivalence entre P digestible et phytase ajoutée de la forme suivante : $P \text{ digestible (mg)} = 1026 * (1 - e^{-0,00263 \text{ Phyt}})$,

avec Phyt = phytase ajoutée (FTU). A partir de cette équation et de l'équation moyenne présentée au tableau 5, on peut estimer qu'une unité supplémentaire de phytase est équivalente à $2,70 * e^{-0,00263 \text{ Phyt}}$ mg de P digestible et à $0,136 * e^{-0,00233 \text{ Phyt}}$ mg de Zn sous forme de sulfate. La libération de Zn (équivalent sulfate, mg) relativement à celle de P digestible (mg) par la phytase (FTU) peut donc être estimée selon la formule suivante $0,0503 * e^{-0,000300 \text{ Phyt}}$. Cette équation suggère, qu'indépendamment de la dose de phytase ajoutée, la libération de Zn et celle de P sont proportionnelles.

Dans la présente étude, 250, 500 et 750 FTU sont équivalentes à respectivement 17, 32 et 40 mg de Zn sous forme de sulfate. Ces estimations sont en accord avec d'autres obtenues chez le porcelet sevré recevant des aliments à base de maïs et de tourteau de soja (LEI et al, 1993 ; REVY et al, 2004 a et b). En prenant en compte une teneur en P de l'acide phytique de 28,18 % et une masse molaire de 660 et 65,4 pour respectivement l'acide phytique et le Zn, on calcule que le rapport molaire entre phytate et Zn dans l'aliment était de 25. Dans ce cas, tout le Zn contenu dans la ration de base avait la capacité de se lier aux phytates qui y étaient présents. Cependant, dans la présente étude, comme dans les précédentes (LEI et al, 1993 ; REVY et al, 2004 a et b), les équivalences obtenues pour les niveaux de supplémentation en phytase les plus élevés sont égales voire supérieures à la quantité de Zn présent dans l'aliment de base. Cela pourrait suggérer que le Zn libéré par la phytase est plus disponible que le Zn ajouté sous forme de sulfate dans l'aliment de base, dans lequel les phytates n'ont pas été hydrolysés. Par ailleurs, comme l'indiquent OBERLEAS et HARLAND (1996), les phytates seraient capables de complexer non seulement le Zn alimentaire mais également le Zn sécrété via le pancréas. Dans ce cas, la quantité de Zn libéré par la phytase pourrait excéder le contenu de l'aliment de base.

D'un point de vue pratique, ces résultats indiquent les possibilités de protection de l'environnement grâce à l'utilisation de phytase microbienne dans l'alimentation du porcelet sevré. En effet, la rétention corporelle de Zn par les porcs étant très faible (JONDREVILLE et al, 2003, 2004), pratiquement la totalité du Zn ingéré est excrétée. Ainsi la quantité de Zn ingérée, et donc excrétée peut être réduite d'environ 30 % en remplaçant 30 mg de Zn sous forme de sulfate par 500 FTU dans un aliment pour porcelets sevrés à base de maïs et de tourteau de soja, formulé pour contenir 100 mg de Zn par kg.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEOLA O., LAWRENCE B. V., SUTTON A. L., CLINE T. R., 1995. *J. Anim. Sci.*, 73, 3384-3391.
- DAVIES N. T., NIGHTINGALE R., 1975. *Br. J. Nutr.*, 34, 243-258.
- ENGELEN A. J., VAN DER HEEFT F. C., RANDSDORP P. H. G., SMIT E. L. C., 1994. *J. AOAC Intern.*, 77, 760-764.
- HÖHLER D., PALLAUF J., 1994. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 71, 189-199.
- INRA, 1989. *L'Alimentation des Animaux Monogastriques : Porc, Lapin, Volailles*. INRA, Paris, 49-76.
- INRA-AFZ, 2002. *Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons*. D. Sauvant, J.-M. Perez, G. Tran eds, INRA, Paris.
- JONDREVILLE C., REVY P. S., DOURMAD J. Y., 2003. *Livest. Prod. Sci.*, 84, 147-156.
- JONDREVILLE C., REVY P. S., DOURMAD J. Y., NYS Y., HILLION S., PONTRUCHER F., GONZALES J., SOLER J., LIZARDO R., TIBAU J., 2004. *Journées Rech. Porcine*, 36, 17-24 .
- KORNEGAY E. T., 2001. Digestion of phosphorus and other nutrients: the role of phytases and factors influencing their activity. In : *Enzymes in Farm Animal Nutrition* M. R. Bedford, G. G. Partridge eds, CAB International, Wallingford, UK, 237-271.
- KORNEGAY E. T., QIAN H., 1996. *Br. J. Nutr.*, 76, 563-578.
- LEI X.G., KU P.K., MILLER E.R., ULLREY D.E., YOKOYAMA M.T., 1993. *J. Nutr.*, 123, 1117-1123.
- NRC, 1998. *Nutrient Requirements of Swine*. (10^{ème} éd.) National Academy Press, Washington, DC.
- OBERLEAS D., HARLAND F., 1996. Impact of phytic acid on nutrient availability. In : *Phytase in animal nutrition and waste management*. M.B. COELHO, E.T. KORNEGAY eds, BASF, 77-84.
- OBERLEAS D., MUHRER M. E., O'DELL B. L., 1962. *J. Anim. Sci.*, 21, 57-61.
- OBERLEAS D., MUHRER M. E., O'DELL B. L., 1966. *J. Nutr.*, 90, 56-62.
- PALLAUF J., HOHLER D., RIMBACH G., 1992. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.*, 68, 1-9.
- PALLAUF J., RIMBACH G., PIPPIG S., SCHINDLER B., HÖHLER D., MOST E., 1994. *Z. Ernährungswiss.*, 33, 128-135.
- REVY P. S., JONDREVILLE C., DOURMAD J. Y., NYS Y., 2003. *INRA Prod. Anim.*, 16, 3-18.
- REVY P. S., JONDREVILLE C., DOURMAD J. Y., NYS Y., 2004a. *Journées Rech. Porcine*, 36, 25-32.
- REVY P. S., JONDREVILLE C., DOURMAD J. Y., NYS Y., 2004b. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 116, 93-112.
- UNDERWOOD E. J., SUTTLE N. F., 1999. *The mineral nutrition of livestock*, 3rd ed. CAB International, NY, USA.
- YI Z., KORNEGAY E. T., RAVINDRAN V., LINDEMANN M. D., WILSON J. H., 1996. *J. Anim. Sci.*, 74, 1601-1611.