

Apports alimentaires de zinc nécessaires à la couverture du besoin du porcelet sevré recevant un aliment à base de maïs et de tourteau de soja additionné ou non de phytase microbienne

Pierre-Stéphane REVY (1) (2), Catherine JONDREVILLE (1), Jean-Yves DOORMAD (1), Yves NYS (3)

(1) INRA-UMRVP, 35590 Saint-Gilles

(2) Calcialiment, Z.I. de la Gare, 22690 Pleudihen

(3) INRA, Station de Recherches Avicoles, 37380 Nouzilly

Avec la collaboration technique de M. ALIX, B. CARISSANT, H. DEMAY, G. GUILLEMOIS, S. HILLION, C. HOMO, Y. LEBRETON, M. LEFÈVRE, F. LE GOUËVEC, J. LIGER, M. MASSARD, F. PONTRUCHER, H. RENOULT, J.F. ROUAUD, P. TOUANEL et R. VILBOUX

Apports alimentaires de zinc nécessaires à la couverture du besoin du porcelet sevré recevant un aliment à base de maïs et de tourteau de soja additionné ou non de phytase microbienne

Cinquante-quatre porcelets sevrés à 26 jours au poids vif moyen de 7,74 kg, ont été utilisés dans un essai de 19 jours destiné à estimer l'apport alimentaire de zinc nécessaire à la couverture de leurs besoins, dans des aliments à base de maïs et de tourteau de soja contenant ou non de la phytase microbienne. Neuf aliments expérimentaux ont été formulés : l'aliment de base, contenant 33 mg de zinc/kg, supplémenté avec 10, 25, 40, 60 ou 80 mg de zinc sous forme de sulfate/kg ou avec 0, 10, 25 ou 40 mg de zinc sous forme de sulfate et 700 unités (U) de phytase microbienne/kg. L'incorporation de phytase microbienne augmente l'activité de la phosphatase alcaline (APA) plasmatique, la teneur en zinc plasmatique et la teneur en zinc de l'os mesurées à l'issue de l'expérimentation ($P < 0,001$). Avec et sans phytase microbienne, ces trois indicateurs du statut en zinc augmentent linéairement avec la quantité de zinc ingéré, les pentes étant équivalentes avec et sans phytase. L'APA et la teneur en zinc plasmatiques atteignent ensuite un plateau équivalent pour les deux niveaux de phytase, alors qu'aucun plateau n'est observé pour la teneur en zinc de l'os. Sans phytase microbienne, 86 et 92 mg de zinc/kg d'aliment sont nécessaires pour maximiser respectivement l'APA et la teneur en zinc du plasma. Avec phytase, ces indicateurs sont maximisés pour des apports alimentaires de respectivement 54 et 49 mg de zinc/kg d'aliment. De ces valeurs, il est déduit que 700 U phytase sont équivalentes à 32 à 43 mg de zinc sous forme de sulfate.

Assessment of zinc dietary requirements of weanling pigs fed a maize - soybean meal diet with or without microbial phytase

Fifty-four pigs, weaned at 26 d of age at an average body weight of 7.74 kg were used in a 19-d experiment to assess their dietary zinc requirements, using diets based on corn and soybean meal with or without microbial phytase. Nine experimental diets were formulated: the basal diet containing 33 mg zinc/kg supplemented with 10, 25, 40, 60 or 80 mg zinc from sulfate ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) / kg and the basal diet supplemented with 0, 10, 25 or 40 mg zinc from sulfate together with 700 phytase units (U) / kg. Pigs were fed the basal diet for a 7-d adjustment period prior to the experimental period. Microbial phytase increased plasma alkaline phosphatase activity (APA), plasma zinc concentration and bone zinc concentration measured at the end of the experiment ($P < 0.001$). With and without microbial phytase, these three indicators of zinc status linearly increased with zinc intake, with a similar slope with and without phytase. Plasma APA and zinc concentration plateaued thereafter, with a similar maximum with and without phytase, whereas bone zinc concentration did not plateau. Without microbial phytase, plasma APA and zinc concentration were maximized when dietary zinc reached 86 and 92 mg/kg diet without microbial phytase, respectively, and 54 and 49 mg/kg diet, with microbial phytase, respectively. From the previous estimates it was derived that 700 U phytase were equivalent to 32 to 43 mg zinc as $ZnSO_4$.

INTRODUCTION

La supplémentation usuelle en zinc des aliments pour le porc excède souvent ses besoins physiologiques (INRA, 1989 ; NRC, 1998). De telles pratiques conduisent à un excédent de cet élément dans les lisiers et à sa concentration croissante dans les sols de certaines zones à forte densité d'élevage porcin (COPPENET et al., 1993 ; REVY et al., 2003a).

Face à ce problème, la teneur maximale en zinc autorisée dans les aliments pour le porc a récemment été réduite de 250 à 150 mg/kg (Règlement (CE) N° 1334/2003 de la Commission du 25 juillet 2003). Une telle réduction des marges de sécurité nécessite une bonne connaissance du besoin en zinc alimentaire des animaux selon leur stade physiologique et plaide en la faveur d'une amélioration de la disponibilité du zinc présent dans les aliments.

En 1994, WEDEKIND et al. ont évalué le besoin en zinc du porc en engraissement à 50 mg / kg d'aliment, en accord avec les données publiées par le NRC (1998). En revanche, le besoin en zinc du porcelet en post-sevrage n'a pas été récemment évalué (REVY et al., 2003a). Le NRC (1998) indique que l'apport de 80 mg de zinc/kg d'aliment permet de couvrir ce besoin chez des animaux pesant entre 10 et 20 kg. Cependant les résultats publiés par HÖHLER et PALLAUF (1994) suggèrent que ce niveau d'apport pourrait être insuffisant.

Par ailleurs, un certain nombre d'études ont montré que l'introduction de phytase microbienne dans les aliments pour porcs permet d'améliorer la disponibilité du zinc (PALLAUF et al., 1992 ; 1994 ; LEI et al., 1993). REVY et al. (2003b) indiquent ainsi que l'introduction de 1000 U de phytase microbienne dans un aliment pour porcelets sevrés à base de maïs et de tourteau de soja permettait de réduire d'environ 35 ppm la supplémentation en zinc sous forme de sulfate. Toutefois, à l'instar de ce qui a été observé pour l'efficacité de la phytase sur la disponibilité du phosphore, la réponse de la disponibilité du zinc à des apports croissants de phytase microbienne pourrait ne pas être linéaire (KORNEGAY et QIAN, 1996). Ainsi, aucune équivalence entre zinc ajouté sous forme de sulfate et phytase microbienne ne peut être tirée de ce résultat pour des niveaux plus faibles et plus courants de supplémentation en phytase microbienne.

Le but du présent essai est de faire une mise à jour du besoin en zinc du porcelet sevré et d'évaluer l'épargne de zinc permise par l'addition de 700 U de phytase microbienne/kg d'aliment. L'impact de l'usage de phytase microbienne sur l'excrétion de zinc par les animaux et sa concentration dans les produits épandus ou exportés est également évalué.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Aliments expérimentaux

Un aliment de base, contenant 33 mg de zinc/kg, a été formulé de façon à satisfaire l'ensemble des besoins nutritionnels du porc entre 5 et 20 kg (INRA, 1989 ; NRC, 1998), à l'exception du zinc (tableau 1). Dans cet aliment à base de

maïs et de tourteau de soja, du son de blé chauffé (2 x 2 min à 900 W au micro-onde) a été introduit afin d'augmenter la concentration en phytates de l'aliment sans en augmenter l'activité phytasique. Les neuf régimes expérimentaux sont constitués à partir de l'aliment de base supplémenté avec 10, 25, 40, 60 ou 80 mg/kg de zinc sous forme de sulfate ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) et l'aliment de base supplémenté avec 0, 10, 25 ou 40 mg/kg de zinc sous forme de sulfate ainsi que 700 unités (U) de phytase microbienne (Natuphos®). Les matières premières ont été broyées avec un broyeur à marteaux muni d'une grille de 2,5 mm avant 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 une forme granulée.

1.2. Animaux et conduite expérimentale

Cinquante-quatre porcelets mâles castrés Piétrain x (Landrace x Large White), pesant en moyenne $7,74 \pm 0,22$ 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*. Cette période d'adaptation avait pour objectif de réduire la variabilité de leurs réserves en zinc (HAHN et BAKER, 1993). A l'issue de cette période, six blocs de neuf animaux chacun ont été constitués sur la base du poids vif. 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 4,0 % du poids vif et était distribuée en trois repas égaux à 9, 13 et 17 h. La consommation individuelle d'aliment a été enregistrée quotidiennement. Les porcs avaient accès à de l'eau sans zinc 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 subi une anesthésie 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, la patte antérieure droite de chaque animal a été prélevée puis cuite à l'autoclave à 120°C pendant 20 min avant extraction du métacarpe IV. Les métacarpes ont été conservés à -20°C avant analyses.

Toutes les analyses ont été effectuées en double. L'activité phytasique de l'aliment de base avec et sans phytase ajoutée a été contrôlée par colorimétrie après incubation dans une solution de phytate de sodium (ENGELEN et al, 1994). Une unité de phytase est définie comme la quantité d'enzyme qui libère 1 nmol de phosphate de la solution de phytate de sodium à 0,0051 mol/l par minute à pH 5,5 et à 37°C. L'activité de la phosphatase alcaline du plasma a été mesurée selon la procédure de Sigma (Sigma 245, St Louis, MO, USA) sur un appareil Cobas Mira (Hoffman-LaRoche, Nutley, NJ).

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

Composition	g/kg
Mais	487,36
Tourteau de soja 50	220,00
Lactosérum doux déshydraté	100,00
Son de blé ^a	80,00
Isolat de soja	40,00
Huile de soja	29,40
Carbonate de calcium	17,00
Phosphate monocalcique	12,50
Sel	2,00
L-Lysine HCl	2,37
DL-Méthionine	2,35
L-Thréonine	1,63
L-Tryptophane	0,39
COV ^b	5,00
Caractérisation analytique	
Matière sèche (MS) (g/kg) ^c	895,7
Matières azotées totales (MAT) (g/kg) ^c	203
Matières minérales (MM) (g/kg) ^c	56,3
Matières grasses (MG) (g/kg) ^c	54,1
Cellulose brute (CB) (g/kg) ^c	26,2
Amidon (g/kg) ^c	368
Phosphore (g/kg)	7,25
Phosphore digestible apparent (g/kg) ^d	3,34
Phosphore phytique (g/kg) ^d	2,91
Calcium (g/kg)	9,45
Activité phytasique (U/kg) ^e	150
Magnésium (mg/kg)	1684
Fer (mg/kg)	154
Zinc (mg/kg) ^f	33,4
Cuivre (mg/kg)	7,82
Manganèse (mg/kg)	39,8

^a Chauffé à deux reprises pendant 2 mn à 900 W dans un four à micro-ondes

^b Sans zinc ajouté, le complément apporte (/kg aliment) : Cu, 2,33 mg ; Mn, 15,2 mg ; Co, 2 mg ; I, 1 mg ; Se, 0,3 mg ; vitamine K3 (menadione), 2 mg ; vitamine B1 (thiamine), 2 mg ; vitamine B2 (riboflavine), 10 mg ; vitamine B3 (PP, niacine), 30 mg ; vitamine B5 (acide pantothénique), 15 mg ; vitamine B6 (pyridoxine), 10 mg ; vitamine B8 (biotine, H), 0,2 mg ; vitamine B9 (acide folique), 2 mg ; vitamine B12 (cyanocobalamine), 0,05 mg ; choline, 800 mg ; vitamine C (acide ascorbique), 100 mg ; vitamine A, 15000 UI ; vitamine D3, 3000 UI ; vitamine E (acétate de DL α -tocopherol), 40 UI

^c Analysé selon les procédures suivantes : MS, séchage jusqu'à poids constant à 103°C ; MAT, N x 6,25, méthode Dumas ; MM, four à moufle (550°C, 8 h) ; MG, sans hydrolyse préalable ; CB, méthode de Weende ; amidon, méthode Ewers

^d Calculé (INRA-AFZ, 2002)

^e L'activité phytasique mesurée dans l'aliment de base supplémenté avec la phytase microbienne est de 850 U/kg

^f La teneur en zinc des aliments sans phytase ajoutée était de 43, 55, 67, 91 et 103 mg/kg, celle des aliments avec phytase ajoutée était de 34, 45, 60 et 71 mg/kg

Après centrifugation des échantillons de plasma mélangé avec du TCA à 20 %, le surnageant a été prélevé et dilué avec de l'acide nitrique 1,2 N. Chaque métacarpe IV a été sectionné longitudinalement, puis séché à 103 °C toute une nuit. L'os a ensuite été incinéré à 550 °C pendant 12 h dans un four à moufle. Les cendres ont été pesées, puis broyées en une fine poudre. Un échantillon de chaque aliment a été incinéré à 550 °C pendant 8 h dans un four à moufle. Les cendres d'os et d'aliment ont ensuite été minéralisées avec de l'acide nitrique à 16 N et du peroxyde d'hydrogène à 30% sur un bain à sec jusqu'à évaporation, puis diluées dans de l'acide nitrique 0,4 N. Les teneurs en calcium, magnésium, fer, zinc, cuivre et manganèse des aliments et la teneur en zinc du plasma et de l'os ont été mesurées par spectrométrie d'absorption atomique (SpectrAA 220 FS, Varian, Springvale, Australie). La concentration du phosphore dans les aliments a été déterminée selon la méthode colorimétrique Vanadate sur l'appareil Cobas Mira (Hoffman-LaRoche, Nutley, NJ).

1.4. Calculs et analyses statistiques

L'analyse statistique des données a été menée au moyen de la procédure GLM du logiciel SAS (1990), en considérant le porcelet comme l'unité expérimentale. Par régression de chacun des critères de réponse sur la quantité quotidienne de zinc ingéré (mg/j), l'effet linéaire de la quantité de zinc ingéré, entre et intra niveaux de phytase, ainsi que son effet quadratique, entre et intra niveaux de phytase, ont été testés. Le modèle comprenait le bloc, le niveau de phytase et l'effet linéaire de la quantité de zinc ingéré (mg/j) entre niveaux de phytase, les autres termes étant introduits successivement et conservés dans le modèle lorsqu'ils étaient significatifs ($P < 0,05$).

Lorsque l'effet linéaire de la quantité de zinc ingéré entre niveaux de phytase et l'effet quadratique de la quantité de zinc ingéré intra niveau de phytase étaient significatifs, l'analyse a été poursuivie au moyen de la procédure NLIN du logiciel SAS (1990), en considérant le porcelet comme unité expérimentale. Par régression non linéaire, les données ont alors été ajustées en utilisant un modèle comprenant un paramètre décrivant l'effet entre blocs et une fonction décrivant l'effet intra bloc. Cette dernière fonction était décrite comme une fonction linéaire-plateau, avec la même pente et le même maximum pour les deux niveaux de phytase, et un point de rupture pour chaque niveau de phytase.

2. RÉSULTATS

La teneur en zinc des aliments expérimentaux est conforme aux valeurs attendues (tableau 1), les différences extrêmes atteignant 9 % pour l'aliment additionné de 80 mg de zinc/kg (103 mesurés vs 113 mg de zinc/kg attendus). L'activité phytasique est de 150 et 850 U/kg dans l'aliment de base, respectivement sans et avec phytase microbienne.

2.1. Performances de croissance

Les animaux ont tous consommé la totalité de l'aliment alloué sauf les porcs nourris avec l'aliment de base supplémenté

Tableau 2 - Performances de croissance, activité de la phosphatase alcaline (APA) plasmatique, teneur en zinc plasmatique et teneur en zinc de l'os des animaux recevant l'aliment de base additionné de zinc sous forme de sulfate avec ou sans phytase microbienne ^a

Phytase ajoutée (U/kg)	0					700				ETR ^b
	10	25	40	60	80	0	10	25	40	
Zinc ajouté (mg/kg)	10	25	40	60	80	0	10	25	40	
Zinc ingéré (mg/j)	17,6	26,2	31,4	42,2	50,9	16,3	21,2	28,1	33,3	-
Performances de croissance										
Poids initial (kg)	8,7	8,7	8,8	8,8	9,2	9,1	8,5	8,6	8,8	-
Poids final (kg) ^{d, i}	14,0	15,4	15,8	15,6	16,3	15,8	15,6	15,8	15,5	0,86
Consommation d'aliment (g/j) ^c	405	471	467	460	490	471	470	468	463	-
Vitesse de croissance (g/j) ^{e, i}	280	359	368	357	382	361	375	381	360	35,8
Indice de consommation ^{c, e, k}	1,52	1,31	1,27	1,29	1,29	1,30	1,25	1,22	1,29	0,116
Critères plasmatiques										
APA (U/l) ^{f, i}	48	118	167	190	230	166	198	212	221	31,0
Zinc (mg/l) ^{g, i}	0,185	0,407	0,503	0,676	0,707	0,644	0,766	0,752	0,800	0,090
Critères osseux										
Zinc (mg/kg cendres) ^{h, i}	89,8	111	146	174	207	172	216	234	245	23,7

^a Moyennes, n=6 ^b ETR, Ecart type résiduel ^c Aliment contenant 90 % de matière sèche

^d Effet zinc (linéaire, P < 0,01 ; linéaire intra niveau de phytase, P < 0,01 ; quadratique, P < 0,01)

^e Effet zinc (linéaire, P < 0,01 ; linéaire intra niveau de phytase, P < 0,05 ; quadratique, P < 0,05)

^f Effet zinc (linéaire, P < 0,001 ; quadratique, P < 0,001 ; quadratique intra niveau de phytase, P < 0,001)

^g Effet zinc (linéaire, P < 0,001 ; quadratique, P < 0,05 ; quadratique intra niveau de phytase, P < 0,01)

^h Effet zinc (linéaire, P < 0,001) ⁱ Effet phytase (P < 0,001) ^j Effet phytase (P < 0,01) ^k Effet phytase (P < 0,05)

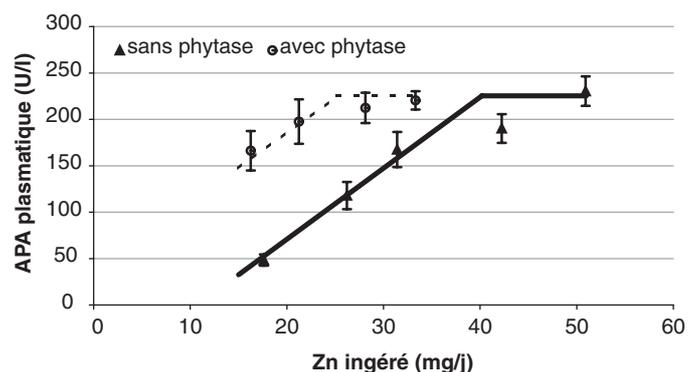
avec 10 ppm de zinc et sans phytase ajoutée qui ont présenté des refus en fin d'essai (tableau 2). La vitesse de croissance des animaux ainsi que leur poids final augmentent avec l'addition de phytase microbienne (respectivement P < 0,01 et P < 0,001), de façon linéaire avec la quantité de zinc ingéré (P < 0,01), les pentes différant suivant le niveau de phytase ajoutée (respectivement P < 0,05 et P < 0,01) et de façon quadratique avec la quantité de zinc ingéré (respectivement P < 0,05 et P < 0,01). L'indice de consommation est également affecté par l'addition de phytase dans l'aliment (P < 0,05), ainsi que par la quantité de zinc ingéré avec des effets linéaire (P < 0,01), linéaire intra niveau de phytase (P < 0,05) et quadratique (P < 0,05).

2.2. Critères plasmatiques et osseux

L'activité de la phosphatase alcaline (APA) et la teneur en zinc plasmatiques augmentent avec l'addition de phytase dans l'aliment (P < 0,001). Ces paramètres augmentent également avec la quantité de zinc ingéré, de façon linéaire (P < 0,001) et quadratique (respectivement P < 0,001 et P < 0,05) ; l'effet quadratique intra niveau de phytase est significatif (respectivement P < 0,001 et P < 0,01) (tableau 2).

Ces données ont été ajustées à un modèle linéaire plateau avec des coefficients de détermination de respectivement 0,60 et 0,84 pour l'APA et la teneur en zinc plasmatiques (figure 1 et figure 2). Sans phytase, l'APA et la teneur en

zinc plasmatiques augmentent linéairement tant que la quantité de zinc ingéré est inférieure à respectivement $40 \pm 2,1$ et $43 \pm 2,9$ mg/j puis restent constantes à respectivement 225 U/l et 0,765 mg/l. En présence de phytase, le même



- Sans phytase : si Zn ingéré \leq Opt₀,

$Y = Y_{max} + b (Zn \text{ ingéré} - Opt_0)$; si Zn ingéré > Opt₀, $Y = Y_{max}$

- Avec phytase : si Zn ingéré \leq Opt₇₀₀,

$Y = Y_{max} + b (Zn \text{ ingéré} - Opt_{700})$; si Zn ingéré > Opt₇₀₀, $Y = Y_{max}$

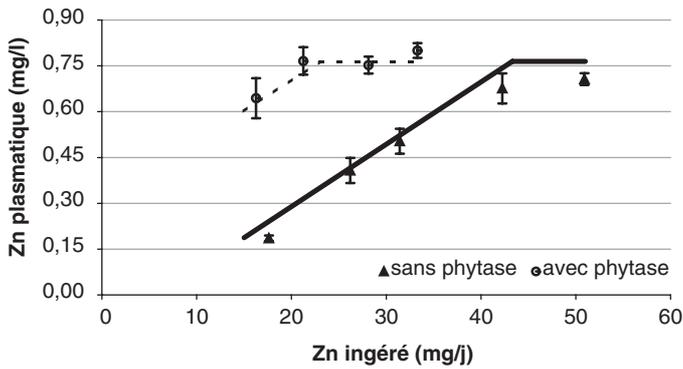
- Avec $Y = \text{APA plasmatique (U/l)}$; Zn ingéré (mg/j) ;

$Y_{max} = 225 \text{ U/l}$; Opt₀ = $40 (\pm 2,1) \text{ mg/j}$; Opt₇₀₀ = $25 (\pm 1,6) \text{ mg/j}$;

$b = 7,65 (\pm 0,91)$; n = 54 ; P < 0,001 ; R² = 0,60 ;

ETR = 42,5

Figure 1 - Activité de la phosphatase alcaline (APA) plasmatique en fonction de la quantité de zinc ingéré, avec ou sans phytase ajoutée



Sans phytase : si Zn ingéré \leq Opt_0 , $Y = Y_{max} + b(Zn\ ingéré - Opt_0)$; si Zn ingéré $>$ Opt_0 , $Y = Y_{max}$
Avec phytase : si Zn ingéré \leq Opt_{700} , $Y = Y_{max} + b(Zn\ ingéré - Opt_{700})$; si Zn ingéré $>$ Opt_{700} , $Y = Y_{max}$
 avec $Y =$ teneur en Zn du plasma (mg/l), Zn ingéré (mg/l),
 $Y_{max} = 0,765$ mg/l, $Opt_0 = 43 (\pm 2,9)$ mg/l,
 $Opt_{700} = 23 (\pm 2,0)$ mg/l, $b = 0,0204 (\pm 0,0026)$; $n = 54$
 $P < 0,001$; $R^2 = 0,84$, $ETR = 0,147$

Figure 2 - Teneur en zinc du plasma sanguin en fonction de la quantité de zinc ingéré, avec ou sans phytase ajoutée

plateau est atteint lorsque la quantité de zinc ingéré est de respectivement $25 \pm 1,6$ et $23 \pm 2,0$ mg/l. Avant ces valeurs seuils, la pente des droites est la même, que l'aliment contienne ou non de la phytase microbienne.

La teneur en zinc de l'os (mg/kg de cendres) augmente linéairement avec la quantité de zinc ingéré ($P < 0,001$) (tableau 2). De plus, l'addition de 700 unités de phytase microbienne dans l'aliment conduit à une augmentation ($P < 0,001$) de la teneur en zinc de l'os de $103 \pm 7,12$ mg/kg de cendres (figure 3).

Tableau 3 - Besoins en zinc du porc (mg/kg d'aliment) d'après nos résultats et d'après la littérature et comparaison aux recommandations du NRC (1998)

Stade	Besoin ^a	NRC (1998)
Porcelet 1 ^{ère} âge	86-92 ^b	100
Porcelet 2 ^{ème} âge	65 ^c	80
Croissance	50 ^d	60
Finition	50 ^d	50

^a Zinc total (apporté par les matières premières et par le sulfate de zinc)

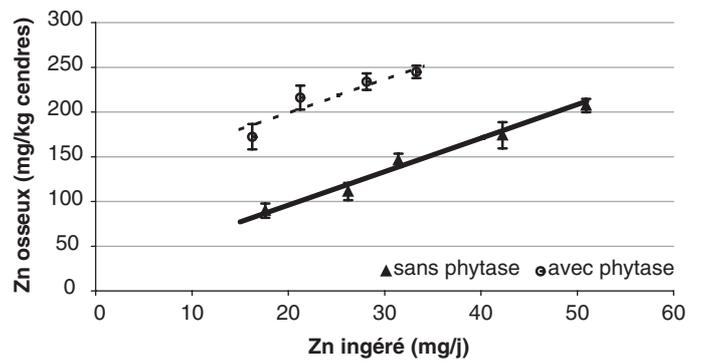
^b D'après nos résultats

^c D'après la compilation de données de la littérature (REY et al. 2003a)

^d D'après WEDEKIND et al. (1994)

3. DISCUSSION

L'addition de 10 ppm de zinc sous forme de sulfate dans l'aliment de base n'a pas permis de prévenir l'apparition d'anorexie, première manifestation clinique de la carence en zinc (UNDERWOOD et SUTTLE, 1999). Toutefois, la perte d'appétit n'explique que partiellement la diminution de la



$Zn\ osseux\ (mg/kg\ cendres) = a + P_0 \times a_0 + b\ Zn\ ingéré\ (mg/l)$
 Avec respectivement $P_0 = 0$ et 1 avec et sans phytase,
 $a = 124 (\pm 12,2)$ mg/kg cendres,
 $a_0 = -103 (\pm 7,12)$ mg/kg cendres,
 $b = 3,74 (\pm 0,346)$,
 $n = 54$; $P < 0,001$; $R^2 = 0,85$, $ETR = 23,7$

Figure 3 - Teneur en zinc de l'os en fonction de la quantité de zinc ingéré, avec ou sans phytase ajoutée

vitesse de croissance des animaux ayant reçu cet aliment puisque leur indice de consommation a augmenté. Cet effet de la carence en zinc a été observé par ailleurs et pourrait avoir pour origine le rôle joué par le zinc dans la croissance en raison de son implication dans l'expression des gènes (REY et al., 2003a ; UNDERWOOD et SUTTLE, 1999).

3.1. Besoin en zinc du porcelet en post-sevrage recevant un aliment sans phytase ajoutée supplémenté avec du sulfate de zinc

Le besoin en zinc du porc en engraissement recevant un aliment à base de maïs et de tourteau de soja supplémenté avec du zinc sous forme de sulfate a été établi par WEDEKIND et al. (1994) à 50 mg/kg d'aliment, dont 27 à 32 ppm provenant des matières premières. Cette valeur est proche de celle fournie par le NRC (1998) (tableau 3). Cependant, le besoin en zinc du porcelet en post-sevrage n'a pas été récemment évalué. Selon le NRC (1998), l'apport de 80 mg de zinc/kg d'aliment permet de couvrir les besoins de porcelets 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 zinc sous forme de sulfate pour atteindre une concentration totale de 80 mg de zinc/kg ne permettait de maximiser ni l'activité de la phosphatase alcaline ni la teneur en zinc plasmatiques. En accord avec cette observation, nous estimons l'apport alimentaire de zinc nécessaire à la maximisation de ces indicateurs du statut en zinc chez des animaux pesant de 9 à 16 kg à respectivement 40 et 43 mg/l, soit, en tenant compte de la consommation moyenne d'aliment (aliment 1 excepté) observée dans notre étude, à respectivement 86 et 92 mg de zinc/kg d'aliment. Cependant, cette valeur ne vaut que pour des aliments riches en matières premières d'origine végétale supplémentés avec du zinc sous forme de sulfate. Si nous avions supplémenté le même aliment de base avec du zinc sous forme d'oxyde, nous aurions vraisemblablement estimé le besoin en zinc entre 118 à 128 mg/kg, compte tenu d'une disponibilité relative du zinc sous forme d'oxyde par rapport au sulfate pouvant être réduite à 62 % (INRA-AFZ, 2002).

Tableau 4 - Bilan de zinc et estimation des teneurs en zinc des produits épandus et exportés selon différentes hypothèses de teneur en zinc des aliments et de traitements appliqués au lisier

Scénarios					A	B	C	
		N ^a	P	K	Zn	Zn	Zn	
Caractéristiques des aliments		/kg ^a	g	g	g	mg	mg	
Porcelet 1 ^{er} âge	8 à 13 kg, IC = 1,4	200	6,8	10	150	100	70	
Porcelet 2 ^{ème} âge	13 à 30 kg, IC = 1,9	180	5,8	8,9	150	80	50	
Croissance	30 à 60 kg, IC = 2,5	165	4,8	8,1	150	60	30	
Finition	60 à 110 kg, IC = 3,1	150	4,4	7,3	150	50	30	
Bilan		par porc	kg	kg	kg	g	g	
Ingéré		6,85	1,28	2,10	40,4	15,5	9,01	
Retenu ^b		2,57	0,54	0,22	2,22	2,22	2,22	
Excrété		4,28	0,74	1,88	38,2	13,3	6,78	
Coefficient de rétention (%)		37,5	42,3	10,4	5,50	14,3	24,7	
Gestion des effluents			kg	kg	kg	g	g	
Composition du lisier		/t MS ^c	94	23	58	1185	413	211
Épandage des effluents sur l'exploitation			kg	kg	kg	g	g	
Épandage du lisier sans traitement	/ha.an ^d	170	41	105	2134	744	379	
	% exportations par cultures ^e	100	98	115	1067	372	190	
Épandage d'un lisier traité (N épuré à 70 %)	/ha.an ^d	170	137	350	7114	2481	1264	
	% exportations par cultures ^e	100	327	385	3557	1240	632	
Traitement du lisier puis exportation			kg	kg	kg	g	g	
Produit géré sur l'exploitation			kg	kg	kg	g	g	
Composition	/t MS	10,7	11,8	291	0	0	0	
Application annuelle	/ha.an ^d	170	189	4635	0	0	0	
	% exportations par cultures ^e	100	449	5093	0	0	0	
Produit exporté			kg	kg	kg	g	g	
Composition	/t MS ^f	34,9	25,1	11,4	1427	497	253	
	% NFU-44-051 - révision ^g				476	166	84	

^a N x 6,25 pour les aliments uniquement. Aliments de type biphasé CORPEN (2003) pour les teneurs en N, P et K selon le stade physiologique

^b Sur la base de la composition corporelle en fonction du poids vif (kg) retenue par le CORPEN (2003),

soit $N \text{ (kg)} = e^{(-0,9385-0,0145 \text{ TVM})} (0,915 \text{ PV}^{1,009})^{(0,7364+0,044 \text{ TVM})} / 6,25$, TVM : teneur en viande maigre estimée à 60,5 % pour un poids d'abattage de 110 kg ; $P \text{ (g)} = 5,3 \text{ PV}$; $K \text{ (g)} = -0,034 \text{ PV}^2 + 2,53 \text{ PV}$; $Zn \text{ (mg)} = 21,8 \text{ PV}$

^c Volume de lisier par porc produit : 460 l après lavage, dont 50 l d'eau ; teneur en MS du lisier estimée à 7 % ; 29 % de l'N volatilisé dans le bâtiment et lors du stockage

^d 170 kg d'N épandus annuellement par ha

^e Exportations annuelles par les cultures : kg/ha - N, 170 ; P, 42 ; K, 91 ; g/ha - Zn, 200

^f D'après BELINE et al. (2003) - N épuré à 70 % - en % du produit entrant dans la station : produit exporté - MS (83,1), N (30,7), P (91,3), K (16,2), Zn (100) ; produit géré sur l'exploitation - MS (16,8), N (1,9), P (8,7), K (83,8), Zn (0)

^g Teneurs maximales autorisées dans les produits épandus (mg/kg MS) - Amendement organique (Norme NF U 44-051) projet de révision : Zn, 300

Dans plusieurs études menées sur le porc en croissance (WEDEKIND et al., 1994), le poulet (WEDEKIND et al., 1992) et le rat (HUNT et JOHNSON, 1992), un point de rupture dans la réponse de la teneur en zinc de l'os à l'augmentation du zinc ingéré a été observé. Dans notre étude, l'absence d'effet quadratique de la quantité de zinc ingéré sur la teneur en zinc de l'os nous a empêchés d'estimer le besoin en zinc à partir de ce critère. Il est possible que le niveau maximum de supplémentation en zinc de 80 ppm ait été trop faible pour rendre cet effet significatif.

3.2. Libération de zinc par la phytase microbienne, et besoin en zinc du porcelet en post-sevrage recevant un aliment contenant 700 U de phytase microbienne et supplémenté avec du sulfate de zinc

La libération importante de zinc par 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 ; REVY et al., 2003b). Dans notre étude, nous esti-

mons que, lorsque l'aliment est additionné de 700 U de phytase microbienne, l'apport alimentaire de zinc nécessaire à la maximisation de l'activité de la phosphatase alcaline et de la teneur en zinc plasmatiques est de respectivement 25 et 23 mg/j, soit 54 et 49 mg/kg d'aliment. Suivant l'indicateur du statut en zinc considéré, cette estimation du besoin en zinc des animaux recevant les aliments avec et sans phytase nous permet de calculer que 700 U de phytase microbienne sont équivalentes à respectivement 32 et 43 mg de zinc sous forme de sulfate.

Chez le porcelet sevré, les résultats de LEI et al. (1993) suggèrent que 1350 U de phytase microbienne sont équivalentes à 30 ppm de zinc sous forme de sulfate et REVY et al. (2003b) ont calculé une équivalence d'environ 35 ppm de zinc sous forme de sulfate pour 1000 U de phytase microbienne. Dans notre étude, en dépit d'une moindre addition de phytase, la quantité de zinc libéré est du même ordre de grandeur que dans les deux essais cités précédemment. Cette observation suggère que l'augmentation de la disponibilité du zinc en réponse à l'addition de phytase microbienne n'est pas linéaire et qu'elle serait maximisée pour un apport inférieur ou égal à 700 U / kg d'aliment. Cette hypothèse est en accord avec l'allure de la réponse de la disponibilité du phosphore à des apports croissants de phytase microbienne (e.g. KORNEGAY ET QIAN, 1996).

3.3. Impact environnemental

Dans le tableau 4, nous avons évalué l'impact de la réduction des apports alimentaires de zinc sur les rejets. Cette évaluation a porté non seulement sur les quantités de zinc rejeté, mais aussi sur l'équilibre en éléments fertilisants par rapport aux besoins des cultures des produits épandus sur l'exploitation ainsi que des produits obtenus par traitement des lisiers et exportés. Pour ce calcul, nous nous sommes appuyés sur les équations de rétention corporelle en fonction du poids vif des animaux proposées par le CORPEN (2003). Trois scénarios d'alimentation, dans lesquels seule la teneur en zinc de l'aliment variait, ont été envisagés. Selon les scénarios A et B, l'apport alimentaire de zinc correspond respectivement à la nouvelle réglementation (Règlement (CE) N° 1334/2003 de la Commission du 25 juillet 2003) et aux recommandations du NRC (1998). Le scénario C est équivalent au B mais avec l'addition de 700 U de phytase /kg d'aliment en supposant que cette activité phytasique permette de réduire la supplémentation en zinc de 30 mg/kg (sous forme de sulfate), quel que soit le stade physiologique de l'animal, et que l'aliment non supplémenté contienne 30 mg de zinc /kg.

Le coefficient de rétention du zinc sur la période totale est de 5,5 % pour le scénario A alors qu'il atteint 24,7 % lorsque de la phytase microbienne est ajoutée à l'aliment (scénario C). Comparé à la législation (scénario A), l'ajuste-

ment des apports de zinc aux recommandations du NRC (1998) (scénario B) permettrait une réduction des rejets de zinc d'environ 65 % et de 82 % avec l'addition de 700 U phytase/kg d'aliment (scénario C).

En l'absence d'exportation de produits de traitement de lisiers à l'extérieur de l'exploitation, même en utilisant de la phytase microbienne et sans appliquer de traitement destiné à épurer une partie de l'azote excrété, l'application annuelle de zinc demeure presque deux fois supérieure aux exportations par les cultures (379 vs 200 g/ha). La politique de réduction de la pollution azotée a conduit à la mise en place de systèmes de traitement du lisier de porc. L'exemple que nous avons choisi est celui d'un traitement aérobie permettant l'épuration de 70 % de l'azote présent dans le lisier et l'exportation de la totalité du zinc en dehors de l'exploitation (BÉLINE et al., 2003). Ce traitement déséquilibre encore davantage le produit épandu, puisque la quantité de zinc appliqué est alors plus de 6 fois supérieure aux exportations par les cultures (1264 vs 200 g/ha). La valorisation des produits exportés en tant qu'amendements organiques est un enjeu important pour le développement des stations de traitement des lisiers de porc. Or, seul le scénario C permet d'envisager l'usage du produit exporté comme amendement organique, dans le cas d'une teneur maximale autorisée en zinc de 300 ppm MS pour ces produits. Ainsi, une telle réglementation sur les produits d'épuration rendrait obligatoire la prise en compte de l'effet de la phytase microbienne sur la disponibilité du zinc dans les aliments des porcs.

CONCLUSION

Les besoins en zinc du porcelet sevré pesant entre 9 et 16 kg et recevant un aliment à base de maïs et de tourteau de soja supplémenté avec du sulfate de zinc ont été estimés à environ 86 à 92 mg/kg d'aliment. L'addition de 700 U de phytase microbienne dans cet aliment a permis de réduire les apports nécessaires à la couverture de ces besoins à environ 49 à 54 mg de zinc/kg aliment, ce qui représente une économie d'environ 30 ppm zinc sous forme de sulfate. Avant d'utiliser cette équivalence dans la pratique, l'allure de la réponse à différents niveaux d'apport de phytase microbienne doit être examinée, non seulement pour les porcelets sevrés, mais également pour des animaux en engraissement. Toutefois, de simples calculs de bilan indiquent que l'impact de la phytase microbienne sur la disponibilité du zinc devra vraisemblablement être pris en compte afin d'assurer l'adéquation des produits issus des traitements du lisier à la réglementation sur les amendements organiques.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été conduit dans le cadre du programme Porcherie Verte dont il a reçu un soutien financier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BÉLINE F., DAUMER M.L., GUIZIOU F., 2003. Journées Rech. Porcine, 35, 29-34.
- COPPENET M., GOLVEN J., SIMON J.C., LE ROY M., 1993. Agronomie, 13, 77-83.
- CORPEN, 2003. Estimation des rejets d'azote, phosphore, potassium cuivre et zinc des porcs. Influence de la conduite alimentaire et du mode de logement des animaux sur la nature et la gestion des déjections produites. Comité d'Orientation pour des Pratiques Agricoles Respectueuses de l'Environnement, 40 pp.
- ENGELEN A.J., VAN DER HEEFT F.C., RANDSDORP P.H.G., SMIT E.L.C., 1994. J. AOAC Int., 77, 760-764.
- HAHN J.D., BAKER D.H., 1993. J. Anim. Sci., 71, 3020-3024.
- HÖHLER D., PALLAUF J., 1994. J. Anim. Physiol. a Anim. Nutr., 71, 189-199.
- HUNT J. R., JOHNSON L.K., 1992. J. Nutr., 122, 161-169.
- INRA., 1989. L'Alimentation des Animaux Monogastriques : Porc, Lapin, Volailles. INRA éd., 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, INRA éd., Paris.
- 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.
- PALLAUF J., HOHLER D., RIMBACH G., 1992. J. Anim. Physiol. a. Anim. Nutr., 68, 1-9.
- PALLAUF J., RIMBACH G., PIPPIG S., SCHINDLER B., HÖHLER D., MOST E., 1994. Z. Ernährungswiss., 33, 128-135.
- REY P.S., JONDREVILLE C., DOURMAD J.Y., NYS Y., 2003a. INRA Prod. Anim., 16, 3-18.
- REY P.S., JONDREVILLE C., DOURMAD J.Y., GUINOTTE F., COUPEL A., NYS Y., 2003b. Journées Rech. Porcine, 35, 55-60.
- SAS, 1990. SAS/STAT, User's Guide (Release 6.07) SAS Inst. Inc. Cary, NC, USA.
- UNDERWOOD E.J., SUTTLE N.F., 1999. The mineral nutrition of livestock. 3rd edition, CABI publishing, NY, USA, 614 pp.
- WEDEKIND K.J., HORTIN A.E., BAKER D.H., 1992. J. Anim. Sci., 70, 178-187.
- WEDEKIND K.J., LEWIS A.J., GIESEMANN M.A., MILLER P.S., 1994. J. Anim. Sci., 72, 2681-2689.