

Méta-analyse de l'effet de la phytase dans les aliments pour porcs

P. JEAN dit BAILLEUL (1,2,3), J.F. BERNIER (2), J. VAN MILGEN (4), D. SAUVANT (3), C. POMAR (1)

(1) Agriculture et AgroAlimentaire Canada, Centre de Recherche et Développement sur le Bovin Laitier et le Porc
C.P. 90, Lennoxville, Qc, J1M 1Z3, Canada

(2) Université Laval, Département des Sciences Animales - Pavillon Paul-Comtois, Ste-Foy, Qc, G1K 7P4, Canada

(3) I.N.R.A. - I.N.A.P.G., Laboratoire de Nutrition et Alimentation - 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05

(4) I.N.R.A., Unité Mixte de Recherches sur le Veau et le Porc - 35590 Saint Gilles

Méta-analyse de l'effet de la phytase dans les aliments pour porcs

De nombreuses publications ont montré que la phytase exogène est un additif alimentaire qui permet d'améliorer l'utilisation du phosphore phytique contenu dans les matières premières d'origine végétale. Une méta-analyse a été conduite sur 23 publications afin d'évaluer la possibilité de prédire l'augmentation de la digestibilité du phosphore (DigP, ‰), de l'amélioration de la digestibilité du phosphore par rapport à un témoin négatif (AmelDigP, ‰) et de la digestibilité du phosphore phytique (DigPhyt, ‰) ont été évaluées par régression linéaire. Les modèles obtenus sont les suivants :

$$\text{DigP} = 171,362 + 0,175 \text{ FTU} + 46,685 \text{ TP} - 0,885 \text{ Wt0} \quad (R^2 = 0,518; \text{RSD} = 101,5),$$

$$\text{AmelDig} = 0,334 \text{ FTU} - 1,297 \cdot 10^{-4} \text{ FTU}^2 \quad (R^2 = 0,826; \text{RSD} = 61,9),$$

$$\text{DigPhyt} = 0,753 \text{ FTU} - 3,39 \cdot 10^{-4} \text{ FTU}^2 - 1,047 \text{ Wt0} \quad (R^2 = 0,713; \text{RSD} = 121,3)$$

où FTU est l'activité phytasique (UP kg^{-1}), TP est la teneur en phosphore total (g kg^{-1}) et Wt0 est le poids vif initial des animaux (kg).

Les résultats indiquent que l'amélioration de la digestibilité du phosphore est expliquée uniquement par l'activité phytasique de l'aliment. Ce paramètre apparaît donc comme la meilleure manière de caractériser l'effet de la phytase. La présence du poids vif des animaux dans les autres équations de prédiction indique probablement un effet de la composition des aliments. Cependant, une variabilité résiduelle importante a été obtenue avec tous les modèles. Ces résultats indiquent que l'efficacité de la phytase sur la digestibilité du phosphore est affectée par plusieurs facteurs qui ne sont pas tous clairement identifiés, ou pour lesquels les informations ne sont pas disponibles dans les articles publiés.

Meta-analysis of the effect of phytase in pig diets

Many publications have shown that exogenous phytase is a dietary additive that improves the use of phytic phosphorus from diets of plant origin. A Meta-analysis based on 23 publications was used in order to predict the improvement of phosphorus digestibility by the addition of exogenous phytase. Prediction models of phosphorus digestibility (DigP, ‰), improvement of phosphorus digestibility (AmelDig, ‰) and of phytic phosphorus digestibility (DigPhyt, ‰) were evaluated by linear regression analyses:

$$\text{DigP} = 171.362 + 0.175 \text{ FTU} + 46.685 \text{ TP} - 0.885 \text{ Wt0} \quad (R^2 = 0.518; \text{RSD} = 101.5),$$

$$\text{AmelDig} = 0.334 \text{ FTU} - 1.297 \cdot 10^{-4} \text{ FTU}^2 \quad (R^2 = 0.826; \text{RSD} = 61.9),$$

$$\text{DigPhyt} = 0.753 \text{ FTU} - 3.39 \cdot 10^{-4} \text{ FTU}^2 - 1.047 \text{ Wt0} \quad (R^2 = 0.713; \text{RSD} = 121.3)$$

where FTU is the phytase activity (FTU kg^{-1}), TP is the total phosphorus (g kg^{-1}) and Wt0 is the weight of the pigs at the beginning of the experiment (kg).

The improvement of phosphorus digestibility is the variable that can be explained by the phytase activity of the diet alone. Thus, this factor appears to be the best parameter characterizing the phytase effect. The introduction of live body weight in the other equations seems to be related to differences on diets composition. However, all the regression models are accompanied by an important residual standard deviation. This variability suggests that the effect of phytase on phosphorus digestibility is affected by unidentified or not reported factors than those studied in the published experiments.

INTRODUCTION

Les phytates (myo-inositol phosphate) sont présents dans toutes les plantes et sont la principale forme de stockage du phosphore dans les graines (NELSON et al., 1968). Cependant, en raison de la faible activité phytasique des sucs gastriques et intestinaux, cette forme de phosphore est peu disponible pour les porcs (SOARES, 1995). Certaines céréales telles que le blé et le seigle contiennent une quantité significative d'une phytase endogène qui augmente la disponibilité du phosphore (POINTILLART et al., 1987). Cette phytase serait toutefois peu résistante à certains traitements thermiques fréquemment utilisés en alimentation animale (EECKHOUT et DE PAEPE, 1994). De plus, en chélatant des minéraux et en réagissant avec les protéines, les phytates limitent la disponibilité de certains nutriments de l'aliment (STAHL et al., 1999). Enfin, le phosphore phytique n'étant pas utilisé par les porcs, il est excrété dans le lisier. Étant donné que le phosphore a tendance à s'accumuler dans les sols (DE BOER et al., 1997), de grandes quantités sont retrouvées dans les sols de certaines régions d'élevage intensif telle la Bretagne en France, l'ouest de la Belgique, le sud est des Pays-Bas (PAU VALL et VIDAL, 1999), le Québec au Canada (CLUIS et COUTURE, 1987) et aux États-Unis (LANDER et al., 1998).

Il a été prouvé que la phytase (EC 3.1.3.8) exogène d'origine fongique est efficace pour améliorer la disponibilité du phosphore alimentaire chez les porcs (SIMONS et al., 1990; YI et al., 1996). Néanmoins, l'utilisation pratique de la phytase est limitée par la forte variabilité de son efficacité. Cette variabilité nécessite l'utilisation de marges de sécurité importantes (SPEARS, 1996) qui ne permettent pas de maximiser du point de vue économique la réponse potentielle. Afin d'optimiser cette réponse, il est nécessaire de développer une méthode de prédiction de l'amélioration de la digestibilité du phosphore en fonction de la quantité de phytase ajoutée. Cette méta-analyse constitue une première partie d'un projet ayant pour but de modéliser l'utilisation du phosphore par les porcs.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Sélection des données publiées

Les données utilisées dans cette étude ont été obtenues à partir de publications scientifiques traitant de l'utilisation de la phytase chez les porcs en croissance-finition. Les publications retenues devaient respecter un protocole expérimental comportant au moins 5 porcs par traitement. Les animaux devaient avoir un poids vif minimal de 5 kg au début de l'expérience et un poids vif maximal de 120 kg à la fin de l'expérience. Les protocoles des expériences sélectionnées devaient comprendre un témoin négatif correspondant à un aliment avec une activité phytasique endogène faible (<100 UP. kg^{-1}) et avoir un ou plusieurs aliments avec des activités phytasiques croissantes par l'ajout de phytase exogène d'origine fongique. En effet, la phytase endogène du blé a une activité *in vivo* inférieure à celle de la phytase microbienne pour des activités phytasiques identiques *in vitro* (EECKHOUT et DE PAEPE, 1992). Notre objectif étant

d'évaluer la quantité de phosphore absorbée par les animaux, les études où seul le moment de flexion des os était rapporté n'ont pu être retenues. Un total de 23 publications a été retenu et une description sommaire de ces articles est présentée au tableau 1.

1.2. Extraction des données

Dans cette méta-analyse, une unité d'observation a été définie comme la moyenne d'un groupe d'animaux ayant reçu le même traitement dans une expérience. L'information retenue pour chaque unité d'observation concerne la composition en ingrédients, la composition en nutriments et les performances des animaux. Chaque unité d'observation est identifiée par sa référence bibliographique, le sous-groupe dans l'expérience, le témoin négatif correspondant et les niveaux de phytase mesurés. Les contrôles positifs, c'est à dire les traitements où du phosphore inorganique a été ajouté au témoin négatif, ont été exclus de la présente étude.

Les nutriments pris en compte sont le phosphore total (TP, g. kg^{-1}) et le calcium total (TCa, g. kg^{-1}) déterminés par la méthode d'analyse proposée par l'AOAC. Lorsque le calcium total n'était pas rapporté dans la publication, il a été calculé à partir de la table de matières premières proposée par le CVB (1997). Le phosphore phytique dans l'aliment (Phyt, g. kg^{-1}) a été, soit repris dans les publications, soit calculé à partir de la teneur en acide phytique, soit calculé à partir de table de matières premières. Dans les études rapportant le phosphore phytique, la mesure a été faite par HPLC tel que décrit par SIMONS et al. (1990). Lorsque l'acide phytique était rapporté, nous avons considéré que le phytate était composé exclusivement d'inositol-hexa-phosphate (IP6), c'est à dire que la teneur en phosphore du phytate était de 28,16% (KEMME et al.; 1999). Cependant, cette valeur est légèrement plus élevée que celles de 27,45 à 27,67% rapportées par JONGBLOED et al. (1992). En effet, l'IP6 représentait de 68 à 78% du phytate total dans cette expérience. Lorsque ni le phosphore phytique, ni l'acide phytique n'étaient rapportés, la teneur en phosphore phytique était estimée à partir des valeurs de la table de matières premières proposée par le CVB (1997). Dans la plupart des articles, l'activité phytasique (FTU, UP. kg^{-1}) a été mesurée par la quantité de phosphore libérée (nmol. min^{-1}) à pH 5,2. Lorsque l'activité phytasique du témoin n'a pas été mesurée, mais que ce témoin était composé d'un mélange de maïs et de tourteau de soja et que la phytase a été ajoutée après la granulation, il a été considéré que l'activité phytasique du témoin était nulle. Cette hypothèse est en accord avec POINTILLART et al. (1987) et POINTILLART (1991) qui ont montré que l'activité phytasique endogène de ce type d'aliments est très faible (9 UP. kg^{-1} ou indécélable). Les valeurs rapportées pour la teneur en vitamine D (VitD, UI. kg^{-1}), en phosphore digestible (PDig, g. kg^{-1}), la digestibilité du phosphore (DigP, %) et la teneur en protéines brutes (CP, g. kg^{-1}) ont également été pris en compte.

1.3. Analyses statistiques

Un examen des corrélations de Spearman entre les variables utilisées pour la prédiction de l'efficacité de la phytase

Tableau 1 - Description des expériences utilisées

Référence	Nombre animaux	Nombre groupes	Poids (kg)	Durée (j)	Alimentation	Niveaux FTU
Beers et Jongbloed (1992)	384	2	11-25	n.p.	<i>Ad libitum</i>	0, 1400
Chauvel et al. (1997)	16	8	70 (1)	5	<i>Ad libitum</i>	0, 400, 600, 800
Cromwell et al. (1995a)	36	4	15,3-34,8	36	<i>Ad libitum</i>	0, 200, 400, 800
Cromwell et al. (1995b)	35	4	13,3-35,4	42	<i>Ad libitum</i>	0, 250, 500, 1000, 2000
Harper et al. 1997	189 140	13	18,6- n.p. 29,5- n.p.	6	<i>Ad libitum</i>	0, 250, 500 0, 167, 333, 500
Hoppe et al. (1993)	48	5	7-30	42	<i>Ad libitum</i>	0, 250, 400, 1000
Jongbloed et al. (1992)	6	4	37- n.p.	4*14	<i>Ad libitum</i>	0, 1500
Kemme et al. (1997)	112	22	30-110	7*7	2,8 entr.	0, 600
Kemme et al. (1999)	8	8	37 (1)	n.p.	2,3 entr.	0, 1000
Kornegay et Qian (1996)	96	12	7,8- n.p.	35	<i>Ad libitum</i>	0, 350, 700, 1050, 1400
Lei et al. (1993a)	12	2	6,39- n.p.	14	<i>Ad libitum</i>	0, 1200
Lei et al. (1993b)	12	2	6,0- n.p.	20	<i>Ad libitum</i>	0, 1350
Li et al. (1998)	30	5	23,4-37,5	28	<i>Ad libitum</i>	0, 765
Mroz et al. (1994)	5	2	45-110	n.p.	2,3 ou 2,8 entr.	0, 800
Murry et al. (1997)	18	6	10,9- n.p.	35	45% PV	0, 700, 1000
Näsi (1991)	2*6	4	78,98 (1)	6	75 à 79 g/kg ^{0,75}	0, 500
Näsi et Helander (1994)	36	4	34,8-88	n.p.	<i>Ad libitum</i>	0, 1200
Pallauf et al. (1992)	32	6	9,4- n.p.	35	<i>Ad libitum</i>	0, 600, 1200
Pierce et al. (1997)	12	3	87 (1)	5	<i>Ad libitum</i>	0, 250, 500
Radcliffe et al. (1998)	96 96	7	7,4- n.p. 9,6- n.p.	28	<i>Ad libitum</i>	0, 300, 600, 800 0, 250, 500
Veum et al. (1996)	120	6	20-110	n.p.	<i>Ad libitum</i>	0, 500, 1000
Yi et al. (1996)	96	12	7,5- n.p.	35	<i>Ad libitum</i>	0, 350, 700, 1050, 1400
Young et al. (1993)	9	3	10,2- n.p.	4*21	<i>Ad libitum</i>	0, 500, 1000

(1) Moyenne pour la période expérimentale
n.p. : Non publié

(teneur en phosphore total (TP), teneur en phosphore digestible (PDig), teneur en phosphore phytique (Phyt), teneur en calcium total (TCa), teneur en vitamine D (VitD), poids vif initial des animaux (Wt0), activité phytasique (FTU), digestibilité du phosphore (DigP)) a été effectuée afin de nous assurer que les tests de F utilisés pour évaluer la pertinence de l'utilisation de certaines variables sont exacts. Cet examen a permis de détecter que la teneur en Vitamine D des aliments était corrélée positivement et significativement ($\rho = 0,522$; $P < 0,001$) avec le poids vif des porcs au début de l'expérience. Cette corrélation est liée à la présence d'expériences avec de jeunes porcs dans lesquelles la teneur en vitamine D était inférieure ou égale à 1000 UI. kg⁻¹ alors que la majeure partie des aliments destinés aux porcs plus âgés contenaient 2000 UI. kg⁻¹. Cette relation étant opposée à celle qui existe généralement entre les besoins nutritionnels et le poids vif (NRC, 1998), la vitamine D a été exclue des variables

explicatives de l'analyse de façon à ne pas introduire de biais dans l'analyse des résultats.

Finalement, l'effet de la phytase sur la digestibilité du phosphore total (DigP), sur l'augmentation de la digestibilité du phosphore par rapport au témoin négatif de l'expérience (AmelDig) et sur la digestibilité du phosphore phytique (DigPhyt) ont été étudiées par analyse de régression (FREUND et al., 1986). Le test de F a été utilisé pour vérifier les hypothèses nulles (coefficients de régression nuls et ordonnée à l'origine nulle, $P \leq 0,05$). Les coefficients égaux à zéro ($P \leq 0,05$) ont été exclus des modèles. Les variables explicatives testées (FTU, FTU², TP, TCa, Phyt, Wt0) sont décrites au tableau 2 (p 46). Le nombre d'observations présentes pour chaque unité expérimentale de cette analyse est variable (tableau 1), toutefois un poids identique a été affecté à chacune des observations dans l'analyse. La somme des

Tableau 2 - Statistiques descriptives des variables utilisées (n=131)

	Abrev.	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Activité phytasique	FTU	UP kg ⁻¹	0	2000	519	442
Augmentation de la digestibilité du phosphore	AmelDig	%	0	467	105	102
Calcium total	TCa	g kg ⁻¹	1,27	10,50	6,10	1,75
Digestibilité du phosphore	DigP	%	50	767	428	145
Phosphore digestible	PDig	g kg ⁻¹	0,16	6,74	1,81	0,972
Phosphore phytique	Phyt	g kg ⁻¹	1,94	4,00	2,95	0,796
Poids initial	Wt0	kg	6	100	27,5	24,0
Phosphore total	TP	g kg ⁻¹	2,00	9,30	4,03	1,08
Vitamine D	VitD	UI kg ⁻¹	396	2000	1391	560

carrés de type III a été utilisée pour tester la signification des effets des variables sur la digestibilité du phosphore (DigP), l'amélioration de la digestibilité du phosphore (AmelDig) et la digestibilité du phosphore phytique (DigPhyt). Les tests statistiques ont été réalisés avec la procédure UNIANOVA de SPSS (1999).

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Prédiction de la digestibilité du phosphore

L'analyse de régression indique que les variables ayant le plus d'influence sur la digestibilité du phosphore (%) sont l'activité phytasique (FTU, UP. kg⁻¹, P<0,001), la teneur en phosphore total (TP, g. kg d'aliment⁻¹, P<0,001) et le poids vif (Wt0, kg, P<0,001). Ces trois variables sont les seules introduites par une régression multiple par étape. L'équation obtenue est la suivante :

$$\text{DigP} = 171,362 + 0,175 \text{ FTU} + 46,685 \text{ TP} - 0,885 \text{ Wt0} \\ (R^2 = 0,518; \text{ETR} = 101,5)$$

L'activité phytasique permet à elle seule d'expliquer 36% de la variance totale observée alors que le modèle complet explique 51,8% de cette variation. Le coefficient pour l'effet du phosphore total est positif (+46,685), ce qui est en contradiction avec l'hypothèse d'une diminution de la digestibilité apparente du phosphore avec l'augmentation de la teneur en phosphore de l'aliment (FERNÁNDEZ, 1995). Cet effet est probablement expliqué par la corrélation positive ($\rho = 0,185$, $P=0,026$) entre la digestibilité du phosphore dans les aliments et leur teneur en phosphore. Ceci est lié au fait que les matières premières les plus riches en phosphore sont les sources minérales de phosphore et les co-produits animaux qui contiennent le phosphore le plus digestible. De plus, les aliments utilisés contenant peu de phosphore minéral, il est possible que l'apport de phosphore ne dépasse pas le seuil au-delà duquel la régulation devient mesurable.

Le poids vif des animaux au début de l'expérience a un effet négatif (-0,885) sur la digestibilité du phosphore. Cette relation est probablement expliquée par l'utilisation de matières premières dont le phosphore est moins digestible pour les porcs les plus lourds. Ce qui est en accord avec la corrélation positive ($\rho = 0,262$) observée entre la teneur en phosphore phytique et le poids vif initial des animaux.

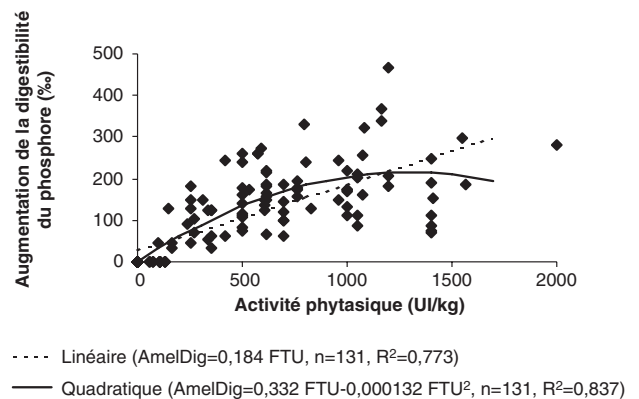
2.2. Augmentation de la digestibilité du phosphore

L'amélioration de la digestibilité du phosphore (AmelDig, %) augmente de façon curvilinéaire avec l'activité phytasique (FTU, UP. kg d'aliment⁻¹; et FTU²; effets linéaire et quadratique : P<0,001). Les modèles linéaire et quadratique obtenus sont présentés à la figure 1.

$$\text{AmelDig} = 27,143 + 0,160 \text{ FTU} \\ (R^2 = 0,534; \text{ETR} = 69,3)$$

$$\text{AmelDig} = 0,334 \text{ FTU} - 1,297 \cdot 10^{-4} \text{ FTU}^2 \\ (R^2 = 0,826; \text{ETR} = 61,9).$$

Figure 1 - Augmentation de la digestibilité du phosphore (%) avec l'accroissement de l'activité phytasique de l'aliment (UP. kg d'aliment⁻¹)



Pour le modèle quadratique, l'ordonnée à l'origine de l'équation de prédiction de l'amélioration de la digestibilité du phosphore n'est pas significative ($P = 0,507$). Ceci indique que l'activité phytasique est bien le seul facteur parmi les facteurs présents dans la base de données à influencer la digestibilité du phosphore. De façon générale, et en l'absence d'inhibiteur, l'activité d'une enzyme est limitée soit par la quantité de l'enzyme, soit par la quantité de substrat disponible. Dans l'hypothèse où le substrat est limitant, son augmentation conduit à un accroissement de la quantité de produit obtenue selon une courbe de Michaelis-Menten, c'est à dire une diminution progressive de la digestibilité du

phosphore avec l'augmentation de la quantité de phytate. Cette relation devrait donc se traduire par un effet négatif de la teneur en phytate sur la digestibilité du phosphore et la présence de la quantité de phytate dans l'équation de prédiction de l'amélioration de la digestibilité du phosphore. Cette relation a été vérifiée *in vitro* pour la phytase par SIMONS et al. (1990) et NEWKIRK et CLASSEN (1998). Dans l'hypothèse où la quantité d'enzyme est limitante, une augmentation de la quantité d'enzyme conduit toujours à la même augmentation de la quantité de produit obtenue. Cette relation devrait produire une équation linéaire pour l'amélioration de la digestibilité du phosphore. Si le substrat devient limitant, un effet quadratique est observé. L'équation obtenue est donc caractéristique de l'activité d'une enzyme avec un substrat limitant. Cependant, l'absence d'effet du phytate total sur l'amélioration de la digestibilité du phosphore suggère que l'activité de la phytase est limitée par la disponibilité du phytate pour la dégradation.

Il est généralement admis que le ratio calcium/phosphore des aliments destinés aux porcs doit rester entre 2:1 et 3:1 afin de limiter la production de sels phospho-calcique insolubles (NRC, 1998). Dans notre étude le calcium n'a pas d'effet sur l'amélioration de la digestibilité du phosphore. Cette absence d'effet du calcium est probablement expliquée par le respect du ratio critique dans toutes les expériences utilisées dans la méta-analyse.

La relation obtenue dans cette méta-analyse donne, pour des aliments contenant 5 g. kg⁻¹ de phosphore total, des quantités de phosphore rendues digestible grâce à la phytase comparables à celles obtenues par l'équation proposée par YI et KORGENAY (1995, cité par YI et KORNEGAY, 1996) pour les volailles (respectivement 145‰ et 140‰ pour une activité phytasique de 500 UP. kg d'aliment⁻¹ et une teneur en phosphore de 5 g. kg d'aliment⁻¹).

2.3. Digestibilité du phosphore phytique

L'analyse de régression indique que les variables ayant le plus d'influence sur la digestibilité du phosphore phytique sont l'activité phytasique (FTU, UP. kg d'aliment⁻¹, P<0,001), l'activité phytasique au carré (P = 0,001) et le poids vif des animaux au début de l'expérience (Wt0, kg; P = 0,032). Ces trois variables sont les seules qui sont introduites par une régression multiple par étape et l'équation obtenue est la suivante :

$$\text{DigPhyt} = 0,753 \text{ FTU} - 3,39 \cdot 10^{-4} \text{ FTU}^2 - 1,047 \text{ Wt0} \\ (\text{R}^2 = 0,713; \text{ETR} = 121,3)$$

Comme pour le modèle précédent, les deux principales variables utilisées pour prédire l'effet de la phytase sur la digestibilité du phosphore alimentaire sont l'activité phytasique et l'activité phytasique au carré. Elles expliquent 69,6% de la variance observée. L'introduction du poids vif des animaux au début de l'expérience indique probablement que l'utilisation d'aliments moins digestible chez les animaux plus âgés diminue l'efficacité de la phytase en limitant l'accès aux phytates alimentaires ainsi que KEMME et al. (1997) le suggèrent. La présence de cette variable semble confirmer l'hypothèse que la quantité totale de phytate n'est pas limitante pour l'efficacité de la phytase.

Les variables explicatives retenues dans les régressions indiquent que l'effet de la phytase sur la digestibilité du phosphore est peu sensible aux autres paramètres disponibles dans la base de données. Cependant, la variabilité résiduelle demeure importante (figure 1). Ces résultats indiquent que l'effet de la phytase sur la digestibilité du phosphore est affecté par plusieurs facteurs qui ne sont pas tous clairement identifiés ou pour lesquels les informations ne sont pas disponibles dans les articles publiés. Plusieurs facteurs pouvant influencer l'effet de la phytase ont été étudiés tels le pH de l'aliment (KEMME et al., 1999; RADCLIFFE et al., 1998) et la teneur en vitamine D (LI et al., 1998). Ces facteurs n'ont toutefois pas pu être pris en compte dans cette étude puisque le pH de l'aliment n'était pas rapporté dans plusieurs études et qu'il existait une corrélation anormale entre le poids vif au début de l'expérience et la teneur en vitamine D.

Les résultats de cette méta-analyse indiquent que l'amélioration de la digestibilité du phosphore suite à l'ajout de phytase est indépendante du poids vif des animaux et des teneurs en phosphore et en calcium. La prédiction de l'effet de la phytase sur le phosphore semble être dépendante de la quantité de phosphore présente dans l'aliment, contrairement à l'hypothèse faite par HOPPE et al. (1993) et HARPER et al. (1997). L'équation de prédiction obtenue permet de prédire une équivalence en phosphore digestible de 0,7 g. kg⁻¹ d'aliment pour 500 UI. kg d'aliment⁻¹ et pour un régime contenant 5 g. kg d'aliment⁻¹ de phosphore total.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par la Fédération des Producteurs de Porcs du Québec (FPPQ), par Agriculture et AgroAlimentaire Canada (PPFI) et par le Ministère de l'Agriculture de France (Fonds d'aide à la mobilité des thésards).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEERS S., JONGBLOED A.W., 1992. Anim. Prod. 55, 425-430.
- CVB (Centraal Veevoederbureau in Netherland), 1997. [Revised table of digestible phosphorus for pigs]. CVB-reeks nr4. Produktschap voor veevoeder. Lelystad, The Netherlands.
- CHAUVEL J., GRANIER R., JONDREVILLE C., WILLIATE I., 1997. Journées Rech. Porcine en France, 29, 277-284.
- CLUIS D., COUTURE P., 1987. Sci. Tech. Eau, 20, 311-317.
- CROMWELL G.L., COFFEY R.D., PARKER G.R., et al., 1995a. J. Anim. Sci. 73, 2000-2008.
- CROMWELL G.L., COFFEY R.D., MONEGUE H.J., RANDOLPH J.H., 1995b. J. Anim. Sci. 73, 449-456.
- DE BOER I.J.M., PETERS H.T.A., GROSSMAN M., KOOPS W.J., 1997. J. Anim. Sci. 75, 2054-2063.

- EECKHOUT W., DE PAEPE M., 1992. *Rev. Agric.* 45, 209-216.
- EECKHOUT W., DE PAEPE M., 1994. *Anim. Feed Sci. Tech.* 47, 19-29.
- FERNÁNDEZ J.A., 1995. *Livestock Prod. Sci.* 41, 255-261.
- FREUND R.J., LITTELL R.C., SPECTOR P.C., 1986. SAS system for linear models. Statistical analysis system institute Inc., Cary, NC, USA, 165p.
- HARPER A.F., KORNEGAY E.T., SCHELL T.C., 1997. *J. Anim. Sci.* 75, 3174-3186.
- HOPPE P.P., SCHÖNER F.J., WIESCHE H., et al., 1993. *J. Anim. Physiol. A. Anim. Nutr.* 69, 225-234.
- JONGBLOED A.W., MROZ Z., KEMME P.A., 1992. *J. Anim. Sci.* 70, 1159-1168.
- KEMME P.A., JONGBLOED A.W., MROZ Z., BEYNEN A.C., 1997. *J. Anim. Sci.* 75, 2129-2138.
- KEMME P.A., JONGBLOED A.W., MROZ Z., et al., 1999. *Livestock Prod. Sci.* 58, 119-127.
- KORNEGAY E.T., QIAN H., 1996. *Br. J. Nutr.* 76, 563-578.
- LANDER C.H., MOFFITT D., ALT K., 1998. Resource assessment and strategic planing working paper 98-1. USDA. In : Nutrient available from livestock manure relative to crop growth requirements.
- LEI X.G., KU P.K., MILLER E.R., et al., 1993a. *J. Anim. Sci.* 71, 3368-3375.
- LEI X., KU P.K., MILLER E.R., et al., 1993b. *J. Nutr.* 123, 1117-1123.
- LI D., CHE X., WANG Y., et al., 1998. *Anim. Feed Sci. Tech.* 73, 173-186.
- MROZ Z., JONGBLOED A.W., KEMME P.A., 1994. *J. Anim. Sci.* 72, 126-132.
- MURRY A.C., LEWIS R.D., AMOS H.E., 1997. *J. Anim. Sci.* 75, 1284-1291.
- NÁSI M., 1991. In : Digestive physiology in pigs, Proceedinbg of the Vth international symposium on digestive physiology in pigs, Verstegen M.W.A. (ed), Huisman J. (ed), den Hartog, L.A. (ed), EAAP Publication No54.
- NÁSI M., HELANDER E., 1994. *Acta Agric. Scand. Sect. A. Anim. Sci.* 44, 79-86.
- N.R.C. (National Research Council), 1998. Nutrient requirements of swine. National Academy Press, Washington DC, USA. 189 pp.
- NELSON T.S., FERRARA L.W., STORER N.L., 1968. *Poult. Sci.* 47, 1372.
- NEWKIRK R.W., CLASSEN H.L., 1998. *Anim. Feed Sci. Tech.* 72, 315-327
- PAU VALL M., VIDAL C., 1999. L'azote et l'agriculture. In : Agriculture, environnement, développement rural: fait et chiffres - les défis de l'agriculture (European commission).
- PALLAUF J., HÖHLER D., RIMBACH G., NEUSSER H., 1992. *J. Anim. Physiol. A. Anim. Nutr.* 67, 30-40.
- PIERCE J.L., DOZIER W.A., CROMWELL G.L., LINDEMANN M.D., 1997. *J. Anim. Sci.* 75(Suppl 1), 66.
- POINTILLART A., 1991. *J. Anim. Sci.* 69, 1109-1115.
- POINTILLART A., FOURDIN A., FONTAINE N., 1987. *J. Nutr.* 117, 907-913.
- RADCLIFFE J.S., ZHANG Z., KORNEGAY E.T., 1998. *J. Anim. Sci.* 76, 1880-1886.
- SIMONS P.C.M., VERSTEEGH H.A.J., JONGBLOED A.W., et al., 1990. *Br. J. Nutr.* 64, 525-540.
- SOARES J.H., 1995. In : Bioavailability of nutrients for animals-Amino acids, minerals and vitamins. Ammerman C.D. (ed), Baker D.H. (ed), Lewis A.J. (ed). Academic press - New York, NY, USA, 257-294.
- SPEARS J.W., 1996. In : Nutrient management of food to enhance and protect the environment, Kornegay E.T. (Ed) pp259-275.
- SPSS, 1999. SPSS 9.0 Base, Syntax reference guide. SPSS, 233 S. Wacker Drive, 11th floor, Chicago, Illinois 60606. 1150 pp
- STAHL C.H., HAN Y.M., RONEKER K.R., et al., 1999. *J. Anim. Sci.* 77, 2135-2142.
- VEUM T.L., BOLLINGER D.W., LIU J., LEDOUX D.R., 1996. *J. Anim. Sci.* 74(Supl 1), 185.
- YI Z., KORNEGAY E.T., RAVINDRAN G., et al., 1996. *J. Anim. Sci.* 74, 1601-1611.
- YI Z., KORNEGAY E.T., 1996. In : Nutrient management of food animals to enhance and protect the environment. Kornegay E.T. (ed) pp 277-302.
- YOUNG L.G., LEUNISSEN M., ATKINSON J.L., 1993. *J. Anim. Sci.* 71, 2147-2150.