

A8712

EFFETS DE LA CARENCE ET DE LA SURCHARGE EN PHOSPHORE SUR L'OS CHEZ LE PORC EN CROISSANCE

Annie FOURDIN, Nicole FONTAINE, A. POINTILLART

I.N.R.A., Station de Recherches de Nutrition, 78350 JOUY-EN-JOSAS

avec la collaboration technique de Pierrette CAMUS, Colette COLIN et B. CAYRON

INTRODUCTION

Les régimes non supplémentés en phosphore minéral, dont tout le phosphore est apporté par les matières premières végétales (céréales et tourteaux), entraînent une carence en phosphore. Chez le porc cette carence se manifeste par une hypophosphatémie, une hypophosphaturie, une hypercalciurie et une déminéralisation osseuse (POINTILLART *et al.*, 1985, FOURDIN *et al.*, 1986). Par ailleurs, dans la plupart des espèces, l'excès alimentaire de phosphore n'est pas recommandé et pourrait prédisposer à l'ostéoporose et donc à la fragilisation osseuse (POINTILLART et GUEGUEN, 1985). Ainsi donc, l'addition de phosphore minéral aux régimes des porcs, bien qu'étant indispensable, ne devrait pas non plus conduire à des régimes excessifs en phosphore. Pour le vérifier, des os de porcs nourris pendant 7 semaines avec 3 régimes ne différant que par leur contenu en phosphore, de la carence à la surcharge, ont été soumis à un test de résistance à la rupture. Le régime carencé (0,4 % P) était sans addition de P minéral, le régime excessif (1,2 % P) contenait environ 2 fois plus de P minéral que de P végétal et, le régime témoin (0,7 % P) environ 60 % de P végétal et 40 % de P minéral, les taux de Ca (0,8 %) et de vitamine D₃ (500 UI/kg) étant identiques.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dix-huit porcelets Large White, âgés de 11 semaines, pesant $23 \pm 0,6$ kg ont été répartis en 3 groupes de 6 : + P, surchargés en P ; NP, témoins et - P, carencés en P, suivant les régimes reçus, lesquels furent distribués durant 7 semaines avant l'abattage. La semaine précédant l'abattage, des récoltes d'urines et la mesure de la consommation alimentaire ont été réalisées afin d'évaluer la phosphaturie et la calciurie. Sur les prises de sang, à l'abattoir, la calcémie, la phosphatémie et la phosphatasémie (phosphatase alcaline) ont été déterminées.

Le moment de flexion des os (qui est un critère d'évaluation de la résistance à la rupture) a été mesuré à l'aide d'un appareil, l'INSTRON, qui permet de mesurer la force F (en Newton) nécessaire pour rompre une longueur L (en m) déterminée d'os, cette force étant appliquée (à vitesse constante) au milieu de la diaphyse, laquelle repose sur 2 couteaux (distant entre eux de L). Le calcul du moment de flexion (MF) se fait par la formule : $MF = F \times L/4$. Le contenu en Ca, P et cendres des os a également été estimé après minéralisation des échantillons. La densité a été calculée sur les os entiers par double pesée, dans l'air et dans l'eau.

TABLEAU 1
COMPOSITION DES RÉGIMES

RÉGIMES	- P	NP	+ P
Ingrédients			
Maïs, %	74	73,4	72
Tourteau de soja 50, %	23,6	23,4	23
CMV, % (1)	2,4	3,2	5
Ca, %	0,8	0,8	0,8
Vitamine D ₃ , UI/kg	500	500	500
Phosphore végétal, g/kg (2)	3,8	3,8	3,8
Phosphates ajoutés, g de P/kg	0	2,9	7,9
Phosphore total, g/kg	3,8	6,7	11,7

(1) Pour - P, pas de phosphore minéral dans le CMV ; pour NP, 43 % de phosphate bicalcique et 8 % de phosphate monocalcique dans le CMV ; pour + P, 42 % de phosphate bicalcique, 23 % de phosphate monopotassique, 20 % de phosphate monosodique et 14 % de phosphate monocalcique.
(2) Phosphore du maïs et du tourteau dont environ 70 % est sous forme phytique.

RÉSULTATS

1. CROISSANCE ET CONSOMMATION

Seule la carence en phosphore a un effet significatif sur les performances en réduisant, légèrement mais significativement, la vitesse de croissance et en diminuant l'efficacité alimentaire (tableau 2). A l'abattoir, des troubles osseux apparents (atrophie des cornets nasaux, fractures des vertèbres et du pelvis, côtes déformées) ont été observés sur 4 des 6 porcs carencés en phosphore dont 2 avaient présenté des signes cliniques (troubles locomoteurs).

TABLEAU 2
PERFORMANCES

RÉGIMES	+ P	NP	- P
Poids vif à l'abattage, kg	52,5 ± 0,7	52,4 ± 1,2	49,6 ± 1,0
GMQ, kg/jour	0,63 ± 0,02	0,65 ± 0,02	0,57 ± 0,02*
IC (1)	2,20 ± 0,05	2,35 ± 0,13	3,11 ± 0,30*

(1) Estimé seulement sur les 3 dernières semaines d'expérience
* P < 0,05, la valeur - P est différente des 2 autres.

2. PARAMÈTRES PLASMATIQUES ET URINAIRES (TABLEAU 3)

La calcémie n'est modifiée par aucun des régimes, la carence en phosphore entraînant une hypophosphatémie considérable (la phosphatémie du lot - P atteint à peine 60 % de celle du lot témoin) ainsi qu'une hyperphosphatasémie (la phosphatase alcaline plasmatique du lot - P est plus du double de celle des témoins). La carence en phosphore provoque également une hypercalciurie (valeur témoin × 5) et une hypophosphaturie extrêmement sévères. Ainsi, on ne retrouve que des traces de phosphore dans les urines du lot - P. La surcharge en phosphore ne modifie pas la calciurie ni non plus la phosphatémie mais elle déclenche une hyperphosphaturie très importante. Ainsi, presque la moitié du phosphore ingéré est excrété dans les urines. L'analyse des reins des animaux de ce lot révèle une néphrocalcinose très importante qui se traduit par une augmentation considérable de la teneur en calcium et en phosphore et une réduction de la proportion de matière sèche du tissu frais (tableau 4).

TABLEAU 3
CALCÉMIE, PHOSPHATÉMIE, CALCIURIE, PHOSPHATURIE ET PHOSPHATASÉMIE

RÉGIMES	+ P	NP	- P
Calcémie, mg/100 ml	10,8 ± 0,2	10,8 ± 0,3	10,7 ± 0,4
Phosphatémie, mg/100 ml	8,5 ± 0,5	7,7 ± 0,4	4,5 ± 0,4**
Calciurie {	mg/jour	158 ± 19	787 ± 79**
	% ingéré	1,2 ± 0,1	6,2 ± 0,7
Phosphaturie {	g/jour	2,2 ± 0,2 ^b	(16 ± 3) 10 ^{-3c}
	% ingéré	48,5 ± 2 ^a	0,3 ± 0,005 ^c
Phosphatasémie, UI/l plasma	49 ± 4	42 ± 4	101 ± 23**

A, B, C : toutes les moyennes sont différentes entre elles (P < 0,01).

** : valeur significativement (P < 0,01) différente des deux autres.

TABLEAU 4
TENEURS EN Ca, P ET MATIÈRE SÈCHE DES REINS

RÉGIMES	Ca en mg/g de tissu sec	P	MS en % du frais
+ P	10,3 ± 1,7**	15,9 ± 1,5**	18,0 ± 0,7*
NP	0,41 ± 0,03	11,0 ± 0,2	20,3 ± 0,5
- P	0,52 ± 0,04	10,4 ± 0,3	20,9 ± 0,3

* : P < 0,02 ; ** : P < 0,01 valeur différente des deux autres (pour une même colonne).

3. PARAMÈTRES OSSEUX

Seule la carence en phosphore entraîne une diminution considérable du contenu en minéraux des os et ce, quel que soit le type d'os considéré : spongieux (prédominant dans l'épiphyse ou les vertèbres) cortical (prédominant dans les diaphyses ou les péronés) (tableau 5).

TABLEAU 5
COMPOSITION MINÉRALE DES OS (en % de la matière sèche)

LOTS	+ P	NP	- P
Vertèbres (1)			
Cendres	37,6	36,9	29,8**
Ca	13,5	15,2	11,2**
P	7,0	6,5	4,9**
Péronés (2)			
Cendres	56,8	58,9	50,0**
Ca	18,9	19,0	16,5**
P	9,8	9,9	8,2**
Métatarsiens (3)			
Épiphyse			
Cendres	35,1	35,2	26,4**
Ca	12,9	13,4	10,2**
P	6,1	6,2	4,3**
Métaphyses et diaphyse			
Cendres	42,4	41,6	33,5**
Ca	16,0	15,8	13,1**
P	7,6	7,4	5,8**

(1) 11^e vertèbre, 1 et 2 : minéralisés en entier, 3 métatarsien interne gauche (doigt III) : épiphyse proximale, métaphyses distale et proximale, diaphyse entière.

** : P < 0,05 ou P < 0,01, valeur inférieure aux deux autres qui ne sont pas différentes entre elles.

Cette diminution est en moyenne de $21,1 \pm 1,5$ % rapportée aux valeurs (Ca, P, cendres) rencontrées chez les témoins (calcul : $\text{écart} (-P) - (NP)/NP \times 100$). Par contre, la surcharge est sans effet significatif apparent sur la teneur en minéraux des os et il n'y a pas de raréfaction osseuse diffuse, ou ostéoporose, dans ce lot. En effet, les quantités totales de minéraux des os entiers du groupe + P ne diffèrent pas significativement de celles des témoins : respectivement 1,52 et 1,57 ($\pm 0,5$) g de Ca, 0,72 et 0,73 ($\pm 0,02$) g de P pour les métatarsiens entiers (III) des lots + P et NP ; 0,92 et 0,89 ($\pm 0,5$) g de Ca, 0,41 et 0,41 ($\pm 0,01$) g de P, pour les péronés. De même, les teneurs en calcium ou en cendres rapportées au volume osseux sont semblables entre témoins et surchargés : 24,7 ($\pm 0,6$) et 25,2 (± 1) g de cendres et 9,3 ($\pm 0,3$) et 9,5 ($\pm 0,4$) g de Ca pour 100 cm³ d'os, pour les métatarsiens + P et NP respectivement.

TABLEAU 6
DENSITÉ ET MOMENT DE FLEXION DES OS

OS	RÉGIMES			MOMENT DE FLEXION (N × m)		
	+ P	NP	- P	+ P	NP	- P
Tibia	1,22 (0,01)	1,24 (0,01)	1,18** (0,01)	50 ± 3 ^b	63 ± 3 ^a	30 ± 3 ^c
Péroné	1,15 (0,02)	1,18 (0,03)	1,11 (0,02)	5,3 ± 0,3	5,1 ± 0,3	4,0 ± 0,2**
Métatarsiens						
Externe (IV)	1,19 (0,01)	1,18 (0,01)	1,11** (0,01)	5,5 ± 0,3	5,7 ± 0,3	2,7 ± 0,3**
Interne (III)	1,20 (0,01)	1,21 (0,02)	1,13** (0,01)	4,6 ± 0,1 ^b	5,5 ± 0,3 ^a	2,5 ± 0,2 ^c

** : P < 0,01 ou < 0,05, significativement inférieur aux deux autres.

A, B, C : A > B > C, tous les écarts sont significatifs (P < 0,05), comparaisons inter-groupes. () et ± : écart-types des moyennes.

La carence en phosphore entraîne une densité généralement moindre (significatif pour le tibia et les 2 métatarsiens principaux) et une résistance à la rupture diminuée (quel que soit l'os considéré, tableau 6) des os en comparaison de celles de ceux des deux autres groupes. La surcharge en phosphore, sans entraîner de chute de la densité, provoque un affaiblissement significatif de certains os (tableau 6). Ainsi, tibia et métatarsien interne présentent des moments de flexion inférieurs de 21 et 16%, respectivement, à ceux du groupe témoin. La carence en phosphore a vraisemblablement entraîné une hyper-résorption osseuse comme l'indiquent les écarts significatifs (P < 0,05) entre l'hydroxyprolinurie du lot - P, 480 ± 67 mg/jour, et celle des autres lots : 241 ± 74 et 202 ± 27 mg/jour pour N et + P, respectivement. Cette hyper-résorption jointe à l'hyperphosphatasémie (tableau 3) signifierait que la chute de la teneur en minéraux des os du groupe carencé et celle de leur résistance à la rupture, proviennent à la fois d'une minéralisation insuffisante (par défaut de phosphore, le calcium ne peut se fixer dans l'os et est excrété dans les urines, cf. tableau 3) et d'une déminéralisation importante (l'ostéolyse est stimulée).

DISCUSSION

A ne considérer que les résultats des analyses minérales, plasmatiques ou osseuses, seule la carence en phosphore paraît avoir perturbé gravement le métabolisme phosphocalcique des porcs et ce dans un délai assez court de quelques semaines. Par contre, si l'on prend en considération l'excrétion urinaire de phosphore, la surcharge en phosphore, bien que n'ayant pas modifié les paramètres sanguins, a provoqué une hyperphosphaturie dramatique. Celle-ci pourrait bien être à l'origine, en grande partie de la néphrocalcinose. En effet, si, par comparaison avec les dépôts de minéraux dans les reins des porcs témoins, on calcule l'excès de Ca et P déposé dans ceux des

animaux surchargés (9,9 mg de Ca et 4,9 mg de P), on retrouve le rapport Ca/P (voisin de 2) du phosphate tricalcique, forme de concrétion fréquente dans la néphrocalcinose laquelle est un symptôme classique de l'excès alimentaire de phosphore (POINTILLART *et al.*, 1978 ; POINTILLART et FONTAINE, 1983 ; POINTILLART et GUEGUEN, 1985).

Par ailleurs, si chez les porcs surchargés en P la résistance à la rupture est inchangée pour le péroné et le métatarsien externe, elle est nettement diminuée pour le tibia et le métatarsien interne qui pourraient être considérés comme plus « porteurs » (au moins pour le tibia). Le fait que la minéralisation des os du lot + P soit comparable à celle des os des témoins pourrait être attribué au manque de sensibilité du paramètre « teneur en minéraux des os » comme nous l'avons montré à plusieurs reprises chez des porcs, soit carencés en vitamine D (POINTILLART, 1980), soit carencés en calcium, soit surchargés en phosphore (POINTILLART et FONTAINE, 1983). Néanmoins, l'absence d'ostéoporose, chez les porcs surchargés en phosphore, est en contradiction avec les données rapportées dans la littérature chez la plupart des espèces (revue in « POINTILLART et GUEGUEN, 1985 ») y compris le porc (BROWN *et al.*, 1966 ; DOIGE *et al.*, 1975). Nous ne pensons pas que cela soit dû à la trop courte durée de l'expérience. En effet, après 5 semaines, chez les porcs du lot + P, une prise de sang a permis de mettre en évidence une hypocalcémie ($9,9 \pm 0,2$ contre $10,7 \pm 0,2$ mg de Ca/100 ml de plasma, chez les témoins, $P < 0,01$), une hyperphosphatémie ($11,5 \pm 0,8$ contre $9,2 \pm 0,1$ mg de P/100 ml chez les témoins, $P < 0,05$) ainsi qu'un hyperparathyroïdisme ($2,7 \pm 0,2$ contre $2 \pm 0,1$ ng de PTH/ml de plasma, chez les témoins, $P < 0,05$). Or, ces signes biochimiques caractérisent généralement l'hyperparathyroïdisme secondaire d'origine nutritionnelle, lié à l'excès de phosphore, et à l'ostéoporose que celui-ci entraîne, tel que cela a été décrit chez le singe, le chat, le chien et le cheval (KROOK *et al.*, 1975). Mais nous l'avons vu, ces signes sont transitoires puisque 2 semaines plus tard, à l'abattage, ils avaient disparu.

Toutefois, la moindre résistance de certains os, l'hyperphosphaturie et la néphrocalcinose indiquent clairement que l'excès de phosphore est à proscrire. En effet, même si aucune ostéoporose n'est apparue, il est probable que la fragilisation de certains os parmi les plus « exposés » pourrait s'étendre à d'autres os, voire s'aggraverait jusqu'à ce que la déminéralisation soit patente à l'analyse minérale. Cette fragilisation ne semble pas provenir d'une perturbation de l'absorption calcique, celle-ci étant comparable chez les témoins ($45,3 \pm 2,5$ % de l'ingéré) et chez les surchargés ($41,9 \pm 2$ %, $P > 0,10$).

En ce qui concerne les animaux carencés en phosphore, on retrouve, dans cet essai, la plupart des troubles du métabolisme minéral décrits précédemment chez les porcs recevant un régime dont, comme dans le cas présent, l'essentiel du phosphore est phytique, c'est-à-dire lorsqu'on omet de supplémenter en phosphore minéral (POINTILLART *et al.*, 1985, FOURDIN *et al.*, 1986) : hypophosphatémie, hypophosphaturie, hypercalciurie, chute de la teneur en minéraux et de la résistance à la rupture des os, hyperphosphatasémie.

Si l'on compare l'ensemble des désordres du métabolisme minéral et, en particulier, les troubles osseux, ceux-ci sont beaucoup plus graves et plus précoces (hypophosphatémie et hyperphosphatasémie existaient déjà à 4 semaines) avec la carence qu'avec la surcharge en phosphore.

Au vu des résultats de cette expérience, la résistance à la rupture des os paraît être un critère plus sensible que leur contenu en minéraux pour évaluer les effets des régimes phosphocalciques déséquilibrés. De même, ce test mécanique est un meilleur critère que les paramètres sanguins tels que calcémie ou phosphatémie, ce que nous avons déjà observé avec des formes d'apport de Ca et P très différentes (carbonate de calcium, phosphate bicalcique et phosphore végétal contre Ca et P du yaourt) mais des teneurs en minéraux identiques (POINTILLART, CAYRON et GUEGUEN, 1986).

En outre, le moment de flexion et la densité osseuse, en général, corrént de façon élevée et significative (pour les tibias, $r = 0,79$, pour le métatarsien IV, $r = 0,77$, $P < 0,001$) ; de même, la corrélation est très élevée entre les cendres et le moment de flexion ($r = 0,91$, $P < 0,001$ pour les métatarsiens III, par exemple) ainsi que les moments de flexion des différents os, entre eux (de $0,88$ à $0,94$, $P < 0,001$) à l'exception du péroné avec les autres os pour lesquels les coefficients de corrélation sont moins élevés ($r = 0,62$ à $0,73$) et moins significatifs ($P < 0,01$).

BIBLIOGRAPHIE

- BROWN W.R., KROOK L., POND W.G., 1966. Cornell vet. **56**, suppl., 3-127.
- DOIGE C.E., OWEN B.D., MILLS J.H.L., 1975. Can. J. Anim. Sci., **55**, 147-164.
- FOURDIN A., FONTAINE N., POINTILLART A., 1986. Journées Rech. Porcine en France, **18**, 83-90.
- KROOK L., WHALEN J.P., LESSER G.V., BERENS D.L., 1975. Meth. Achiev. exp. Pathol., **7**, 72-108.
- POINTILLART A., 1980. Journées Rech. Porcine en France, **12**, 335-344.
- POINTILLART A., FONTAINE N., 1983. Journées Rech. Porcine en France, **15**, 375-384.
- POINTILLART A., GAREL J.M., GUEGUEN L., 1978. Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys., **18**, 699-709.
- POINTILLART A., GUEGUEN L., 1985. Cah. Nutr. Diét., **20**, 425-428.
- POINTILLART A., JAY M.E., FONTAINE N., 1985. Journées Rech. Porcine en France, **17**, 463-472.