

Développement d'un modèle simulant le devenir du phosphore et du calcium alimentaires au niveau métabolique chez le porc en croissance

Marie-Pierre LETOURNEAU MONTMINY (1), Agnès NARCY (2), Candido POMAR (1)

(1) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, J1M1Z3, Canada

(2) INRA UR83 Unité de recherche avicole, 37380 Nouzilly, France

Marie-Pierre.Letourneau@AGR.GC.CA

Développement d'un modèle simulant le devenir du phosphore et du calcium alimentaires au niveau métabolique chez le porc en croissance

Afin d'optimiser l'utilisation de phosphore (P) par les porcs, il est essentiel d'améliorer notre capacité à prédire la quantité de P absorbée et retenue en tenant compte des principaux facteurs modulateurs, tels que les formes alimentaires de P, les apports de calcium (Ca) et de P, le potentiel de minéralisation osseuse et le statut minéral de l'animal, et de déterminer de façon précise le besoin. Le présent travail fait partie d'un programme de recherche visant à développer un modèle robuste simulant l'utilisation du P et du Ca et les besoins en ces éléments dans des contextes alimentaires variés (ex. : phosphates, phytase, drêches, etc.). Un modèle mécaniste dont l'objectif était dans un premier temps de prédire les quantités de P et de Ca requises pour atteindre le potentiel de minéralisation osseuse et de simuler l'impact de déséquilibres phosphocalciques a été construit. Il est divisé en deux parties, un modèle qui prédit la croissance, basé sur InraPorc et un second qui prédit le devenir métabolique du Ca et du P absorbés. Il s'agit d'un modèle à compartiments dans lequel le tractus gastro-intestinal, le milieu extracellulaire, les tissus mous (protéines et lipides) et l'os sont représentés. Le présent modèle est cohérent, en montrant une augmentation des flux d'absorption, de rétention et d'excrétion de P sans modification de la concentration de P dans les tissus mous lorsque l'on augmente les apports alimentaires de P en conditions d'apport de Ca non limitant pour le dépôt osseux. La capacité de prédiction du modèle a été validée en comparant les rétentions de P, de protéines et de Ca prédites par le modèle et celles mesurées dans les essais. Ce modèle est utile pour fixer les niveaux de P et de Ca optimaux en fonction du contexte économique et alimentaire. Les régulations métaboliques devront être incluses pour améliorer sa prédiction.

Development of a model simulating the metabolic fate of dietary phosphorus and calcium in growing pigs

To optimize phosphorus (P) utilization in pigs, it is essential to improve our capacity to predict the amount of dietary P absorbed and retained taking into account the main modulating factors, such as dietary forms of P, amount of calcium (Ca) and P supply, bone mineralization potential and mineral status and to precisely determine the phosphorus requirement for the animal. The current work is part of an ongoing program intended to develop a robust model able to predict P and Ca utilization by pigs in a wide range of P and Ca dietary situations. The objective of this first step modelling study is to predict the amount of dietary Ca and P required to achieve bone mineralization potential and to simulate the impact of Ca and P imbalances. A mechanistic model was developed using literature data. The model is divided into two parts, one to predict growth performance based on InraPorc growth model and a second aiming to simulate the metabolic fate of absorbed P and Ca. This last model has a compartmental structure in which the gastro-intestinal tract, extracellular fluid, soft tissues (protein, lipid) and bone are represented. The current model is consistent when predicting an increase in P absorption, excretion and retention flows while P concentration in soft tissue remains fairly fixed when Ca is not limiting for bone mineralization. The prediction capability of the model was also verified by comparing P, protein and Ca accretion predicted by the model and measured in literature data. The model is helpful to fine-tune P and Ca levels depending on the economic and feeding contexts. P and Ca metabolic regulations had to be included for further model improvements.

INTRODUCTION

Compte tenu de l'impact négatif que peut avoir le phosphore (P) sur l'environnement et de la qualité décroissante des phosphates dont le prix demeure élevé (Cordell *et al.*, 2009), l'optimisation de son utilisation par les porcs est essentielle à la durabilité de cette production. Afin d'optimiser l'utilisation de P par les porcs, il est d'une part, important d'améliorer notre capacité à prédire les quantités absorbées et retenues en considérant les principaux facteurs influents, notamment les formes alimentaires de P, les niveaux d'apports de P et de calcium (Ca), le potentiel génétique de minéralisation osseuse et le statut minéral des animaux. D'autre part, il est essentiel de déterminer de façon précise le besoin en cet élément. Compte tenu des mouvements sur le marché des matières premières (ex. : phosphate, phytase, drêches, etc.), un programme de recherche visant la construction d'un modèle robuste permettant de simuler l'utilisation du P et du Ca et les besoins en ces éléments dans différents contextes alimentaires est actuellement en cours.

Le présent travail consiste en l'une des premières étapes de modélisation dont l'objectif est de prédire les quantités de P et de Ca nécessaires à l'atteinte du potentiel de minéralisation osseuse et de simuler l'effet d'apports phosphocalciques déséquilibrés.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Description du modèle

1.1.1. Principes généraux

Le présent modèle, qui se veut être un modèle de recherche, a pour objectif de simuler la répartition de P et de Ca entre les différents compartiments à l'échelle de l'animal suite à des modifications des apports phosphocalciques. Les simulations du modèle ont été réalisées à partir du logiciel ModelMaker (Version 4).

1.1.2. Module de simulation de la croissance

Le modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008) a été utilisé pour prédire la croissance des porcs. Certaines modifications ont cependant été apportées à ce dernier. Le porc-type a été caractérisé au moyen de données expérimentales (Pomar *et al.*, 2003). A partir de ces données, des équations quadratiques ont été obtenues pour estimer la relation entre l'énergie nette (EN) ingérée et le poids vif (PV) ainsi qu'entre le potentiel de dépôt de protéines et le PV. Les quatre principales composantes corporelles du porc sont l'eau (Eau), les protéines (Prot), les lipides (Lip) et les cendres (Cend). Le poids vif vide (PVV) est la somme de toutes ces composantes. Dans InraPorc, Prot et Lip sont calculées et Eau et Cend estimées en fonction de Prot. Le potentiel de croissance protéique corporelle est estimé par InraPorc selon une équation obtenue d'après les données de Quiniou et Noblet (1995) dans laquelle les coefficients associés à Prot incluent Eau et Cend. Cependant, il a été montré qu'en situation de carence ou de déséquilibre phosphocalcique, il est possible de déminéraliser l'os sans pour autant modifier les performances de croissance et la teneur corporelle en protéines (Pomar *et al.*, 2006). Ainsi, le dépôt de cendres n'est pas strictement lié à celui des protéines. Le modèle InraPorc a donc été modifié afin de dissocier le dépôt de Prot de celui des Cend.

Selon De Lange *et al.* (2003), la relation entre les cendres corporelles totales et les protéines peut être calculée par l'équation suivante :

$$\text{Cend (kg)} = a \times \text{Prot (kg)},$$

où a varie entre 0,19 et 0,21. Cette équation est utilisée dans le modèle uniquement pour calculer le potentiel de dépôt maximal de cendres, situation dans laquelle le lien avec la protéine demeure cohérent.

Au niveau corporel, les cendres sont distribuées entre les tissus osseux et mous, ce qui a été représenté dans le modèle. Les cendres des tissus mous se retrouvent principalement dans le compartiment protéine (Just Nielsen, 1973), ce qui a été pris en compte dans le modèle.

Dans un premier temps, la part de cendres corporelles totales associée aux protéines et celle associée aux tissus osseux devait être déterminée. Pour ce faire, une base de données répertoriant des publications de composition corporelle en Ca, P et protéine de porc en croissance nourris au niveau ou au-delà du besoin a été utilisée. Cette dernière rassemblait des publications de 1969 à 2010 utilisant des porcs de 5 à 110 kg (8 publications, 16 essais et 88 observations).

L'analyse de la base de données a montré que 28% des cendres corporelles se composent de Ca.

La concentration en Ca des cendres osseuses est quant à elle connue et quasi fixe, aux alentours de 39%, 96% du Ca corporel se retrouvant dans l'os sous forme d'hydroxyapatite où il se dépose dans un ratio fixe de 2,2 avec le P (Crenshaw, 2001).

Il était ainsi possible de déterminer la part de cendres corporelles retrouvée dans l'os à partir des concentrations respectives de Ca dans les cendres corporelles totales et dans celles de l'os.

La part des cendres retrouvée dans le compartiment protéine en a ensuite été déduite.

Dans le modèle, les cendres liées à l'os sont prédites à partir du dépôt de Ca dans l'os et celles liées aux tissus mous à partir du dépôt de protéine corporelle, en s'appuyant sur la base de données. L'équation de prédiction des cendres obtenue est la suivante

$$\text{Cend (kg)} = b + c \times \text{Prot (kg)} + d + e \times \text{Ca osseux (kg)},$$

où b et c sont les termes de l'équation linéaire entre les cendres des tissus mous et la protéine corporelle et prennent des valeurs de -0,0046 kg (etr = 0,0077 et 0,0000545 (etr = 0,0000007) et où d et e sont les termes de l'équation linéaire entre les cendres d'os et le Ca corporel et prennent des valeurs de 63,9 kg (etr = 20,9) et 2,55 (etr = 0,0445) respectivement.

L'eau corporelle demeure quant à elle associée à la protéine corporelle de la façon suivante dans le modèle :

$$\text{Eau (kg)} = f \times \text{Prot (kg)}^b,$$

où f prend une valeur de 5,3 (De Lange *et al.*, 2003). Comme dans InraPorc, le PVV est la somme des composantes Prot, Lip, Eau et Cend.

1.1.3. Module de simulation du devenir du phosphore et du calcium

Le présent modèle est un modèle mécaniste à compartiments dans lequel le tractus gastro-intestinal, le milieu extracellulaire, les tissus mous (protéines et lipides) et l'os sont représentés (figure 1). Les sorties correspondent aux pertes fécales et urinaires de P et de Ca.

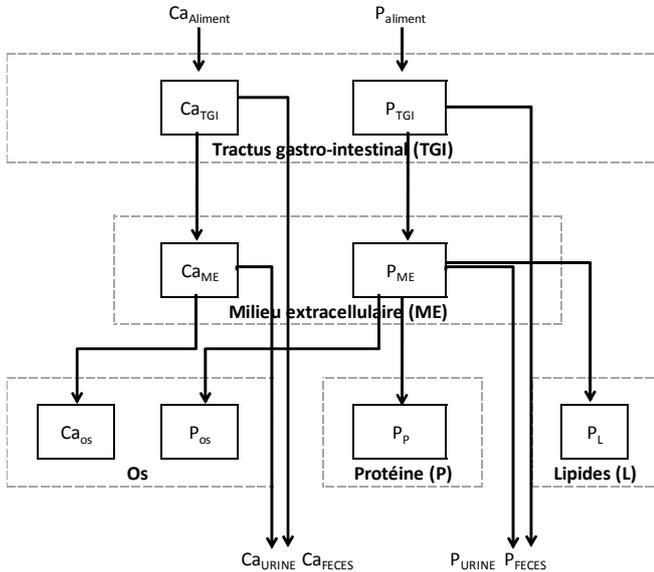


Figure 1 - Schéma général du modèle du devenir de calcium et de phosphore.

1.1.3.1. Devenir digestif du phosphore et du calcium

L'absorption du Ca et du P a été obtenue à partir d'une méta-analyse récente (Létourneau-Montminy et Narcy, 2011 ; Létourneau-Montminy *et al.*, 2011) et dépend principalement des formes d'apport de P, des phytases exogènes et des interactions entre ces deux minéraux au niveau digestif. Cette représentation de l'absorption est une version simplifiée du modèle du devenir de P et de Ca au niveau digestif publié précédemment (Létourneau-Montminy *et al.*, 2011). La partie de P et de Ca ingérée et non-absorbée est excrétée au niveau fécal.

1.1.3.2. Devenir métabolique de phosphore et calcium

Une fois absorbés, P et Ca rejoignent le milieu extracellulaire. Dans ce dernier, le Ca et, dans une moindre mesure, le phosphore sont régulés. Par conséquent, le contenu en P et Ca de ce compartiment est constant.

Le potentiel de dépôt de Ca corporel a été estimé à partir de la base de données précédemment décrite où les porcs recevaient des niveaux au moins adéquats de P et Ca (figure 2). Le ratio Ca/P de l'os étant considéré comme fixe et égal à 2,2, le potentiel de dépôt de P est déterminé par celui de Ca.

Une partie de P est également déposée dans les tissus mous. Chez des rats recevant des apports alimentaires de P et de vitamine D très bas, la concentration de P dans les tissus mous (i.e. foie, rein et muscles) n'était jamais modifiée comparativement aux témoins recevant des apports adéquats, alors que la minéralisation osseuse l'était de façon marquée (Feaster *et al.*, 1953 ; Brautbar *et al.*, 1979).

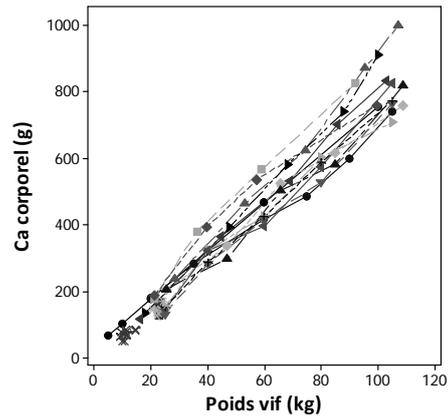


Figure 2 - Relation intra-expérience de la relation entre la teneur en Ca corporel et le poids vif.

Il a ainsi été considéré dans le modèle que le P déposé dans les tissus mous a priorité sur celui déposé dans l'os. La concentration de P a de plus été considérée fixe par unité de protéine et de lipide dans les compartiments tissus mous et a été déterminée à partir de données de composition chimique de dissection de porcs entiers (Just Nielsen, 1973).

Les pertes urinaires de P et de Ca correspondent aux pertes obligatoires et à la part absorbée qui n'est pas retenue en raison soit d'un excès par rapport au potentiel de dépôt corporel ou d'un déséquilibre Ca-P osseux.

1.2. Analyse statistique pour l'évaluation du modèle

La qualité de prédiction du modèle a été évaluée en comparant les simulations du modèle et les résultats rapportés dans la littérature ajustés pour l'effet de l'expérience en utilisant le modèle suivant, avec le logiciel Minitab (Version 15) :

$$\text{Teneur corporelle observée}_{ij} = \alpha + \alpha_i + B \times \text{Teneur corporelle simulée}_{ij} + \epsilon_{ij}$$

où *Teneur corporelle observée_{ij}* correspond à la teneur corporelle en P, Ca ou protéine mesurée dans les publications, *Teneur corporelle simulée_{ij}* correspond à celle prédite par le modèle, tous deux pour l'expérience i et le traitement j, α est l'ordonnée à l'origine, α_i est l'effet fixe de l'expérience sur α , B est la pente de la régression et ϵ_{ij} l'erreur résiduelle. La capacité du modèle à prédire des données expérimentales a été évaluée selon l'ordonnée à l'origine, la pente, l'écart-type et le coefficient de détermination obtenus par régression. De plus, l'erreur de prédiction a été évaluée par la racine carrée de l'erreur relative de prédiction exprimée en pourcentage de la moyenne observée et divisée en trois composantes, soit l'erreur de tendance centrale (ETC) qui indique comment la moyenne prédite dévie de celle mesurée, celle due à la régression (ER) qui mesure la déviation du coefficient de régression par rapport à 1 et celle due au bruit (EB) qui est la variance non-expliquée soit la portion de l'erreur de prédiction qui ne peut être expliquée par la régression, selon Theil (1966). Une prédiction adéquate se caractérise par une EB la plus élevée possible par rapport à ETC et ER.

2. RESULTATS

2.1. Comportement du modèle

Un porc de 50 kg nourri au niveau de ses besoins, à l'exception de ceux de Ca et de P, a été simulé pour évaluer le comportement du modèle.

2.1.1. Effet de l'augmentation des apports phosphocalciques sur le dépôt corporel de calcium et de phosphore

Lorsqu'on augmente l'apport de Ca et de P (sous forme de phosphate bicalcique par exemple), les dépôts de Ca et de P dans l'os augmentent jusqu'à l'atteinte de leur potentiel (figure 3). Le dépôt de P dans les compartiments lipides et protéines demeure quant à lui fixe. Il est intéressant de noter que le P des tissus mous est majoritairement associé à la protéine et qu'il représente une part non négligeable du P corporel. De plus, malgré un dépôt faible de P et Ca dans l'os lors d'apport nul de phosphate bicalcique, la croissance du porc n'est pas modifiée. Ceci est dû au fait que les cendres ne représentent qu'une faible proportion du poids corporel.

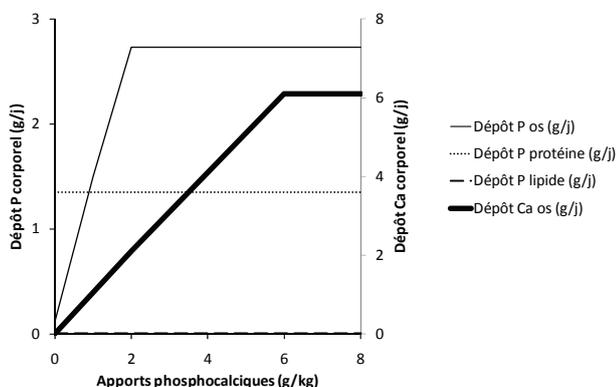


Figure 3 - Dépôt corporel de phosphore et de calcium en fonction des apports phosphocalciques.

2.1.2. Effet de déséquilibre dans les apports phosphocalciques

2.1.2.1. Effet de l'augmentation de l'apport de calcium dans des régimes bien pourvus en phosphore

En accord avec les hypothèses du présent modèle, dans les régimes pauvres en Ca alimentaire, un faible dépôt de Ca par rapport au potentiel entraîne nécessairement un faible dépôt de P, ces deux minéraux devant être fixés de façon simultanée dans l'os (figure 4).

Le P absorbé qui ne peut ainsi être fixé dans l'os est éliminé dans les urines, phénomène caractéristique d'une carence calcique (Pointillart et Fontaine, 1983).

Il est également à noter que l'augmentation de l'apport de Ca se traduit par une légère augmentation de l'excrétion fécale de P en raison de la formation de complexes insolubles dans l'intestin (Létourneau-Montminy *et al.*, 2010).

Il demeure toutefois plus avantageux en termes de durabilité d'apporter suffisamment de Ca pour optimiser la minéralisation osseuse tout en minimisant l'excrétion urinaire de P. La diminution de l'apport de Ca pratiquée durant les dernières années, destinée à maximiser l'efficacité de la phytase (ex. : Liu *et al.*, 1998), pratique remise en cause par de récents travaux (Rousseau *et al.*, 2011 ; Létourneau-Montminy *et al.*, 2010), peut conduire à ce type de déséquilibre et engendrer des pertes de P dans les urines et des défauts de minéralisation osseuse.

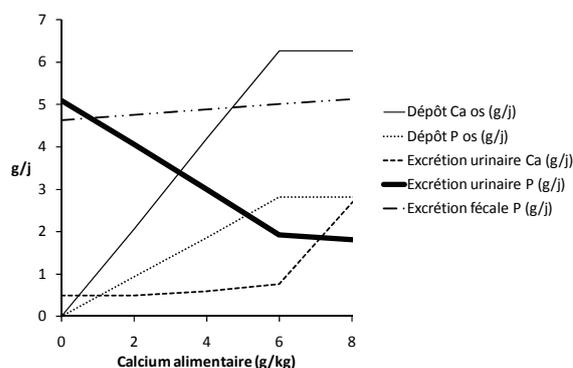


Figure 4 - Dépôt et excrétion de calcium et de phosphore en fonction de l'apport alimentaire de calcium.

2.1.2.2. Effet de l'augmentation de l'apport de phosphate dans des régimes bien pourvus en calcium

A l'identique d'apports faibles de Ca, de faibles apports de P entraînent, un faible dépôt osseux en ces deux minéraux (figure 5). Ainsi, l'augmentation de l'apport alimentaire de phosphate permet d'atteindre le potentiel de dépôt osseux. Cependant, le P apporté en excès du potentiel est rapidement perdu dans les urines.

Il est ainsi important d'apporter suffisamment de P pour obtenir un niveau adéquat de minéralisation osseuse, mais, l'os ne pouvant pas stocker indéfiniment du P, il faut considérer le fait que les excès seront excrétés.

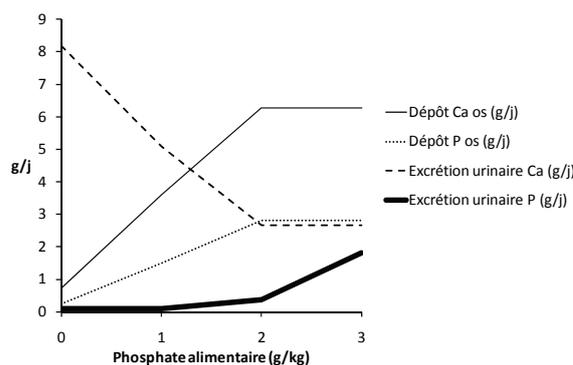


Figure 5 - Dépôt et excrétion de calcium et de phosphore en fonction de l'apport alimentaire de phosphate.

2.2. Evaluation du modèle

Le modèle simule une augmentation du flux d'absorption et d'excrétion du P et de sa rétention par kg de gain avec l'augmentation de l'apport alimentaire de P, alors que le P dans les tissus mous demeure stable. Ces résultats sont en accord avec de précédents travaux utilisant des radioéléments (Lopes *et al.*, 2009). Le modèle est donc à même de bien hiérarchiser les traitements alimentaires selon l'apport de P.

Les essais utilisés pour l'évaluation du modèle portaient sur l'effet du sexe, du génotype ou des niveaux d'apports de P et de Ca sur la composition corporelle minérale (Rymarz *et al.*, 1982 ; Shields *et al.*, 1983 ; Hendriks et Moughan, 1993 ; Jondreville *et al.*, 2004 ; Rousseau *et al.*, 2011). Le modèle prédit de façon adéquate le dépôt corporel de P ($Y = 2,79 + 0,996x$; n obs = 141 ; n exp = 27 ; Erreur relative de prédiction = 6,7% ; ETC = 0,5% ; ER = 0,05% ; EB = 99,4%). Il en est de même pour le calcium ($Y = -23,9 + 1,05x$; n obs = 114 ; n exp = 27 ; Erreur relative de prédiction = 8,9% ; ETC = 0,05% ; ER =

5,7% ; EB =94,2%) et la protéine corporelle ($Y = 224 + 0,99x$; n obs = 141 ; n exp = 19 ; Erreur relative de prédiction = 2,5% ; ETC = 3,6% ; ER = 2,1% ; EB =94,3%). Bien que plusieurs facteurs de variation non pris en compte dans le modèle (ex. : sexe, génotype) aient été étudiés dans les études de la base de données, le modèle demeure à même de bien hiérarchiser, au sein d'une même expérience, les traitements alimentaires tant en terme de rétention corporelle de P, de Ca que de protéines.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nutriments vitaux pour l'animal, le P, apporté en excès, peut devenir un polluant. Son métabolisme est complexe, notamment en raison de son lien avec le métabolisme calcique. Ainsi, seule une approche de modélisation permet de prendre en compte simultanément tous les mécanismes impliqués.

De plus, cette approche permet de rendre compte de différents objectifs de production tels que les performances de croissance, la qualité des produits, le bien-être et la protection

de l'environnement, et contribuera à définir des stratégies alimentaires optimales selon l'objectif de production visé.

Le modèle simule adéquatement le devenir métabolique de P et de Ca en intégrant leurs interactions. Il permet ainsi de prédire l'effet de déséquilibres P-Ca et est utile pour l'évaluation de stratégies alimentaires visant la formulation d'aliments à hautes performances économique et environnementale. L'itération suivante consistera à intégrer les régulations du métabolisme phosphocalcique en fonction des apports alimentaires et du statut minéral de l'animal, ce qui permettra de simuler davantage de situations alimentaires. Des équations simples et robustes permettant aux nutritionnistes de formuler des régimes adéquats en Ca et P dans divers contextes alimentaires seront à terme générées à partir du modèle.

A ce stade du travail, ce modèle se veut un outil de recherche qui permet l'intégration progressive des connaissances acquises sur le métabolisme phosphocalcique, tout en définissant de nouvelles priorités de recherche en nutrition minérale du porc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Brautbar N., Lee D.N.B., Coburn J.W., Kleeman C.R. 1979. Normophosphatemic phosphate depletion in growing rat. *Ame. J. Physiol.*, 236, E283-E8.
- Cordell D., Drammert J.O., White S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Glob. Environ. Change*, 19, 292-305.
- Crenshaw T.D. 2001. Calcium, Phosphorus, Vitamin D, and Vitamin K. In: A.J. Lewis & L.L. Southern (Eds), *Swine Nutrition Second Edition*, 187-212, CRC Press, Boca Raton, USA.
- De Lange C.F.M., Morel C.H., Birkett M.A. 2003. Modeling chemical and physical body composition of the growing pig. *J. Anim. Sci.*, 81, 159-165.
- Feaster J.P., Shirley R.L., McCall J.T., Davis G.K. 1953. P^{32} distribution and excretion in rats fed vitamin D-free and low phosphorus diets. *J. Nutr.*, 51, 381-392.
- Hendriks W.H., Moughan P.J. 1993. Whole-body mineral composition of entire male and female pigs depositing protein at maximal rates. *Livest. Prod. Sci.*, 33, 161-70.
- Jondreville C., Revy P.S., Dourmad J.Y., Nys Y., Hillion S., Pontrucher F., Gonzalez J., Soler J. Lizardo R., Tibau J. 2004. Influence du sexe et du génotype sur la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer, zinc et cuivre chez le porc de 25 à 135 kg de poids vif. *Journées Rech. Porcines*, 36, 17-24.
- Just Nielsen A. 1973. Anatomical and chemical composition of Danish landrace pigs slaughtered at 90 kilograms live weight in relation to litter, sex and feed composition. *J. Anim. Sci.*, 36, 476-482.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A. 2010. Meta-analysis of phosphorus digestive and metabolic utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. *Can. J. Anim. Sci.*, 90, 595-605.
- Létourneau-Montminy M.P., Jondreville C., Sauviant D., Narcy A. 2011. Meta-analysis of phosphorus digestive and metabolic utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. *Animal*, Soumis.
- Létourneau-Montminy M.P. et Narcy A. 2011. Méta-analyse de l'utilisation digestive et métabolique du P chez le porc en croissance : effet de l'apport alimentaire de phosphore, de calcium et de phytase, *Journées Rech. Porcine*, 43, 127-128.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Lescoat P., Magnin M., Bernier J. F., Sauviant D., Jondreville C., Pomar C. 2011. Modeling the fate of dietary phosphorus in the digestive tract of growing pigs, *J. Anim. Sci.*, 89, 3596-3611.
- Liu, J., Bollinger, D.W., Ledoux, T.R., Veum, T.L. 1998. Lowering the dietary calcium to total phosphorus ratio increases phosphorus utilization in low-phosphorus corn-soybean meal diets supplemented with microbial phytase for growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 76, 808-13.
- Lopes J.B., Moreira J.A., Kebreab E., Vitti D.M.S.S., Abdalla A.L., Crompton L.A., France J. 2009. A model on biological flow of phosphorus in growing pigs. *Arq. Bras. Med. Vet. Zoot.*, 61, 691-697.
- Pointillart A., Fontaine N. 1983. Effet de deux régimes hypocalcémiques sur la rétention et l'absorption du phosphore et du calcium chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 15, 375-384.
- Pomar C., Kyriazakis G., Emmans G.C., Knap P.W. 2003. Modeling stochasticity: Dealing with population rather than individual pigs, *J. Anim. Sci.*, 81, 178-186.
- Pomar C., Jondreville C., Dourmad J.Y., Bernier J.F. 2006. Influence du niveau de phosphore des aliments sur les performances zootechniques et la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer et zinc chez le porc de 20 à 100 kg de poids vif. *Journées Rech. Porcine*, 38, 209-216.
- Quiniou N., Noblet J. 1995. Prediction of tissular body composition from protein and lipid deposition in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 73, 1567-75.
- Rousseau X., Létourneau-Montminy M. P., Magnin M., Narcy A., Pomar C. 2011. Effect of different dietary calcium concentrations on the digestive and metabolic response of growing pigs to microbial phytase, *J. Anim. Sci.*, 94, E-Suppl. 1, 95.
- Rymarz A., Fandrejowski H., Kielanowski J. 1982. Content and retention of calcium, phosphorus, potassium and sodium in the bodies of growing gilts Norwegian Landrace, Large White and Hampshire. *Livestock production science* May, 9, 399-407.
- Theil H. 1966. *Applied Economic Forecasting. Studies in Mathematical and Managerial Economics.* North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.
- Van Milgen J., Valancogne A., Dubois S., Dourmad J.Y., Sève B., Noblet J. 2008. InraPorc: a model and decision support tool for the nutrition of growing pigs. *Anim. Feed Sci. Techn.*, 143, 387-405.

