2024. Journées Recherche Porcine, 56, 151-156.
Publication sous Licence Creative Commons

Modèle mécaniste de l'utilisation du phosphore et du calcium alimentaire et de la dynamique de rétention des cendres corporelles chez la truie en lactation

Julien HEURTAULT (1,2), Patrick SCHLEGEL (2), Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1)

(1) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, Canada, GIV 1A6
(2) Agroscope, Groupe de recherche porcine, 1725 Posieux, Suisse

marie-pierre.letourneau-montminy.1@ulaval.ca

Modèle mécaniste de l'utilisation du phosphore et du calcium alimentaire et de la dynamique de rétention des cendres corporelles chez la truie en lactation

Principalement stockés dans l'os, le phosphore (P) et le calcium (Ca) sont mobilisables pour subvenir au fort besoin phosphocalcique des truies durant la lactation. Ce flux, non négligeable et non pris en compte dans les modèles actuels, a été quantifié chez 24 truies primipares nourries à différents niveaux alimentaires de P et de Ca. Ainsi, une nouvelle approche mécaniste a été développée pour simuler la dynamique de rétention et d'utilisation des réserves corporelles de P et de Ca pendant la lactation incluant un compartiment osseux. Le modèle comprend trois sous-modules 1) le sous-module de digestion qui prédit la quantité de minéraux absorbée, 2) le sous-module de croissance et mobilisation des tissus-mous, et 3) le sous-module des cendres corporelles qui simule la répartition du Ca et du P absorbés dans les compartiments osseux, laitier, protéique et lipidique, ainsi que les pertes urinaires. La sortie du modèle est la mobilisation osseuse en P et en Ca à l'issue de la lactation. Le modèle sous-estime la mobilisation osseuse de P (prédit = -72,95 + 0,973 observé ; racine de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSPE) : 71% ; erreur de tendance centrale (ECT) : 87% ; erreur de régression (ER) : 1% ; erreur de bruit (EB) : 11%), et la mobilisation osseuse de Ca (prédit = -117,8 + 0,813 observé ; RMSPE : 72% ; ECT : 84% ; ER : 1% ; EB : 15%). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer une partie de l'erreur de prédiction et restent à confirmer, soit une surestimation des quantités absorbées, une déminéralisation obligatoire en lactation ou une sous-estimation de la quantité de P sécrétée dans le lait.

Mechanistic model of dietary phosphorus and calcium use and the dynamics of body ash retention in lactating sows

Mainly stored in the bone, phosphorus (P) and calcium (Ca) can be mobilised to satisfy the high phosphocalcic requirement of sows during lactation. This flow, which is large and not included in current models, was quantified for 24 primiparous sows fed different dietary levels of P and Ca. Thus, a new mechanistic approach was developed to simulate the dynamics of retention and use of body P and Ca reserves during lactation, including a bone compartment. The model includes three sub-modules: 1) digestion, which predicts the amounts of minerals absorbed; 2) soft tissue growth and mobilisation and 3) body ash, which simulates the distribution of absorbed Ca and P in the bone, milk, protein and lipid compartments, as well as urinary losses. The output of the model is bone mobilisation in P and Ca at the end of lactation. The model underestimated P bone mobilisation (predicted = -72.95 + 0.973 observed; root mean square error of prediction (RMSEP): 71%; central tendency error (ECT): 87%; regression error (ER): 1%; disturbance error (EB): 11%) and Ca bone mobilisation (predicted = -117.8 + 0.813 observed; RMSEP: 72%; ECT: 84%; ER: 1%; EB: 15%). Several hypotheses, which remain to be confirmed, could explain some of the prediction error: overestimation of the amounts absorbed, the necessary demineralisation during lactation, or underestimation of the amount of P secreted in the milk.

INTRODUCTION

Le phosphore (P), bien qu'élément non substituable et essentiel à la structure osseuse (Crenshaw, 2001), représente un risque de pollution pour l'environnement lorsqu'il est apporté en surplus des besoins des cultures (Agroscope, 2017 ; Dourmad *et al.,* 2020). Sur la base actuelle des prédictions du besoin en P digestible d'une truie en lactation, sa couverture ne peut se faire sans ajout de phosphate inorganique dans l'aliment, une ressource limitée et non renouvelable. En raison de la forme de stockage du P dans l'os, conjointement liée au calcium (Ca), l'étude du P s'associe intrinsèquement au Ca.

Répondre à ces deux enjeux implique une estimation précise du besoin en P et en Ca. Cependant, les modèles actuels de prédiction du besoin d'une truie en lactation reposent sur un système factoriel comprenant le besoin d'entretien et le besoin de production laitière, avec l'ingestion comme seul flux disponible de nutriments pour l'organisme. La capacité de la truie à mobiliser ses réserves en P et Ca osseuses (Giesemann *et al.,* 1998) n'est pas considérée dans la prédiction du besoin, par manque de données. Toutefois, de nouvelles données de cinétique de minéralisation osseuse de la truie en lactation en fonction de l'apport en P et Ca alimentaire sont à présent disponibles (Heurtault *et al.,* 2023). L'ajout de ces données pour aboutir à un modèle mécaniste d'utilisation et de rétention des cendres corporelles chez la truie en lactation pourrait permettre d'affiner la prédiction du besoin en P et Ca. Cet écrit se consacre à la première étape de modélisation des flux métaboliques de P et Ca. Une étude du comportement du modèle dans différentes conditions d'alimentation, une analyse de sensibilité, et une étude de la qualité de prédiction du modèle seront également présentées et permettront d'énumérer des axes d'amélioration du modèle.

1. PRESENTATION DU MODELE

1.1. Structure générale du modèle

Une approche mécaniste a été mise en œuvre pour représenter la dynamique de rétention et de répartition du P et du Ca entre les différents compartiments physiologiques chez une truie en lactation. Le modèle simplifié est présenté à la figure 1. Il comprend trois sous-modules : 1) le sous-module de digestion, qui prédit la quantité de P et de Ca absorbée dans le tube digestif et la quantité de P et de Ca excrétée au niveau fécal, 2) le sous-module de croissance des tissus-mous (muscle, gras) est basé sur le modèle de Gauthier *et al.* (2019), et 3) le sous-module des cendres corporelles qui simule le dépôt et la mobilisation du Ca et du P stockés dans les compartiments osseux, protéique et lipidique, l'exportation dans le lait ainsi que les pertes urinaires. Le modèle est basé sur l'hypothèse que la sécrétion de P et de Ca dans le lait est prioritaire sur le dépôt dans les tissus mous et les os. Ainsi, lorsque l'absorption et les cendres libérées par la mobilisation des tissus mous en réponse à la demande importante en protéine et énergie pour la lactation ne suffisent pas à satisfaire le besoin minéral du lait, les réserves osseuses sont mobilisées avec un ratio Ca : P dans les os fixé à 2,16 (Crenshaw, 2001). Le plasma est simulé comme un pool stable dans une situation d'homéostasie. L'excrétion urinaire permet d'éviter un surplus de minéraux au niveau plasmatique. Les entrées nutritionnelles du modèle comportent le niveau d'ingestion, les acides aminées (AA) digestibles iléaux standardisés, l'énergie métabolisable, le Ca et P alimentaire ainsi que les équivalences phytasiques. Les entrées zootechniques du modèle comportent les performances de la portée : la taille de la portée et le gain moyen quotidien. Les sorties du modèle sont la mobilisation osseuse durant la lactation et la quantité de minéraux fécaux et urinaires.

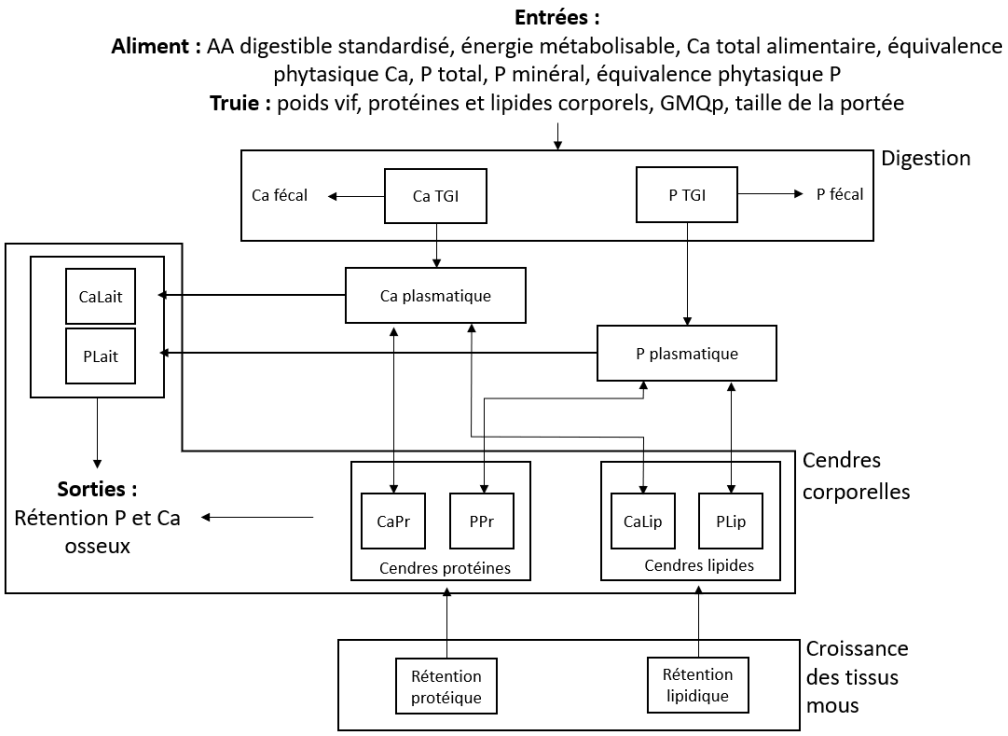

Figure 1 – Modèle mécaniste de prédiction de la mobilisation osseuse en phosphore et calcium d'une truie en lactation [1]

[1] *TGI : tractus gastro-intestinal ; AA : acide aminé ; GMQp : gain moyen quotidien de la portée durant toute la lactation (g/j) ; CaPr : Ca lié à la mobilisation protéique ; PPr : P lié à la mobilisation protéique ; CaLip : Ca lié à la mobilisation lipidique ; PLip : P lié à la mobilisation lipidique ; CaLait : Ca sécrété dans le lait ; PLait : P sécrété dans le lait.*

1.2. Données observées

Le modèle a été ajusté à partir de données issues de 24 truies primipares réparties entre quatre traitements alimentaires. Les aliments étaient formulés pour couvrir les besoins nutritionnels, exceptés ceux en Ca et en P digestible (P dig) : témoin (Lact100 ; 5,9 g P ; 9,9 g Ca/kg), carencé à 25 % (Lact75 ; 5,3 g P ; 8,3 g Ca/kg), carencé à 50 % (Lact50 ; 4,3 g P ; 6,0 g Ca /kg), carencé à 50 % avec phytase (Lact50+FTU ; 4,2 g P ; 6,0 g Ca /kg ; 500 FTU de phytase /kg -Quantum Blue 5G, AB Vista, Marlborough, United Kingdom). Le descriptif de l'essai est détaillé dans la publication de Heurtault *et al.* (2023).

1.3. Compartiments du modèle

Par manque de connaissances disponibles sur des truies en lactation, les pertes fécales endogènes ont été estimées d'après des résultats de truies en gestation à 212 mg P/kg de matière sèche ingérée (MSI ; Bikker *et al.,* 2016) et 596 mg Ca/kg MSI (Lee *et al.,* 2019). En revanche, les pertes urinaires obligatoires ont été estimées à partir de données obtenues chez des truies en lactation à 0,2 g P/j (Everts *et al*., 1998 ; Grez-Capdeville et Crenshaw, 2021) et 0,3 g Ca/j (Giesemann *et al.,* 1998).

1.3.1. *Simulation de la digestion*

Ce sous-module comporte un modèle empirique de prédiction de l'absorption en P et Ca (Heurtault *et al.,* 2024). Il comprend la digestibilité apparente (ATTD) prédite par le Ca total et le P minéral ingéré, respectivement pour l'ATTD Ca et l'ATTD P, ainsi que la quantité de phytase exogène. Les modèles empiriques de l'ATTD ont été construits à partir de données observées de digestibilité apparente de P et de Ca mesurée par la méthode par marqueur à partir d'échantillon de fèces récoltés en 3ème semaine de lactation. Par déduction entre la quantité ingérée et la quantité absorbée, l'excrétion fécale en P et Ca est calculée.

1.3.2. *Simulation de la croissance des tissus mous*

La dynamique des compartiments lipidiques et protéiques maternels est prédite d'après le modèle de Gauthier *et al.* (2019). La teneur de chaque AA digestible iléal standardisé a été calculée à partir de la matrice EvaPig® et corrigée par la teneur en matière azotée de chaque matière première. Durant la lactation, le dépôt protéique et lipidique est nul. La rétention lipidique est la différence entre des flux positifs (l'énergie métabolisable ingérée et l'énergie fournie par l'involution utérine) et des flux négatifs (besoin d'entretien et besoin pour la production laitière). La rétention protéique est dépendante de l'apport des AA et de la déficience énergétique drivée par la rétention lipidique. La production laitière quotidienne a été estimée par le modèle de Hansen *et al.* (2012). Un facteur de production laitière quotidienne, calculé comme la production laitière quotidienne divisée par la production laitière moyenne (Gauthier *et al.,* 2019), a été utilisé pour prédire l'exportation d'énergie et de protéines dans le lait.

1.3.3. *Simulation des cendres des tissus mous*

La simulation des cendres des tissus mous est réalisée comme dans le modèle de Lautrou *et al.* (2020). Le muscle et la graisse sous-cutanée – i.e., les compartiments anatomiques qui contiennent le plus de protéines et de lipides - ont été utilisés comme tissus de référence. La teneur en protéine, P, et Ca du muscle et la teneur en lipides de la graisse sous-cutanée proviennent de données récentes générées à des poids de 25, 75 et 125 kg (Lautrou *et al.,* 2022). La teneur en P et Ca des lipides a été publiée par Nielsen (1973).

1.3.4. *Simulation de l'exportation en* cendres *dans le lait*

L'exportation de P par le lait est estimée à partir de la quantité de protéines exportée par le lait en supposant un ratio P : protéine de 0,031 (Jondreville et Dourmad, 2005 ; NRC, 2012). Le ratio Ca : P dans le lait a été estimé à 1,37 (Bikker et Blok, 2017).

1.4. Évaluation du modèle

Le comportement du modèle a été évalué en simulant l'impact d'une réduction de P alimentaire d'après les niveaux de la publication de Heurtault *et al. (*2023). La simulation a été effectuée sur 21 jours de lactation. Les caractéristiques moyennes en entrée des truies du traitement Lact100 a été prise comme référence pour la composition corporelle de la truie et les performances durant la lactation. La sensibilité globale a été testée avec tous les paramètres dans un plan factoriel complet et toutes les interactions possibles ont été testées. Les critères testés étaient les suivants : la teneur protéique du lait, le ratio Ca : P dans le lait, l'ATTD P, la mobilisation protéique et la mobilisation lipidique. Ces critères ont été testés sur une plage de valeurs situées entre -1,5 et +1,5 écart-type d'après les données observées de l'essai. Ainsi, les variations prises en considération (1,5 écart-type) étaient de 14%, 14%, 24%, 98% et 44% des données observées, respectivement pour la teneur protéique du lait, le ratio Ca : P dans le lait, l'ATTD P, la mobilisation protéique et la mobilisation lipidique. Puis, les indices d'ordre total de Sobol (1993) ont été calculés pour quantifier l'influence de chaque paramètre testé sur les sorties du modèle.
Pour évaluer la qualité de prédiction de la mobilisation osseuse en P et Ca, l'erreur quadratique moyenne de prédiction (MSPE) et sa racine (RMSPE ; exprimé en pourcentage de la moyenne des données observées) ont été calculées selon la procédure Goodness.of.fit du package Zebook sur Rstudio (version 4.0.3). La MSPE a été décomposée en trois fractions : l'erreur de tendance centrale (ECT), l'erreur due à la régression (ER), l'erreur due aux perturbations (ED), exprimées en pourcentage de la MSPE).

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Comportement du modèle

L'analyse du comportement du modèle en situation de mobilisation en P et Ca osseuse est illustrée aux figures 2 et 3. Pour les truies Lact100 et Lact75, la quantité de P et de Ca absorbée ou provenant de la mobilisation des tissus mous suffisait à satisfaire le besoin laitier. Ainsi, la mobilisation osseuse de la truie, étant la différence entre le P et le Ca absorbés et l'export dans le lait, était nulle. En revanche, pour la truie Lact50, le pool de P et de Ca disponible dans le plasma en provenance de la digestion et de la mobilisation des tissus mous ne suffisait pas à satisfaire son besoin laitier. Ainsi, la truie a déminéralisé ses réserves de minéraux osseux. En revanche, la truie Lact50+FTU avait un pool plasmatique de P suffisant pour satisfaire son besoin laitier mais insuffisant en ce qui concerne le Ca. Ainsi, la résorption osseuse a eu lieu et a permis une augmentation du pool plasmatique de Ca, et de P. Cependant, son besoin en P étant déjà couvert, l'excédent de P a été rejeté dans les urines, expliquant une perte urinaire en P élevée.

Ainsi, cette analyse a montré que la déminéralisation osseuse en P pouvait être induite à la suite d'un manque de Ca pour satisfaire la production laitière.

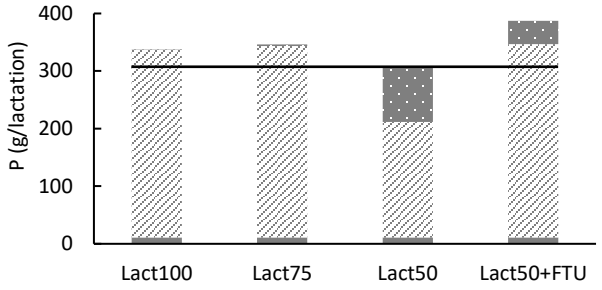

Figure 2 – Simulation du niveau de P plasmatique selon le compartiment d'origine et le traitement alimentaire

Lactation : sevrage à 21 jours, Lact100 : 100 % des besoins en Ca et en P, Lact75 : 75 % des besoins en Ca et en P, Lact50 : 50 % des besoins en Ca et en P, Lact50+FTU : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase, ■ P provenant de la mobilisation des tissus mous, ▨ P absorbé, ■ P provenant de la mobilisation osseuse, ▬ besoin en P pour l'exportation dans le lait.

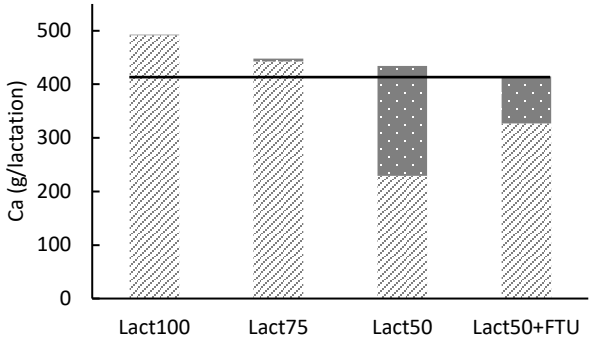

Figure 3 – Simulation du niveau de Ca plasmatique selon le compartiment d'origine et le traitement alimentaire

Lactation : sevrage à 21 jours, Lact100 : 100 % des besoins en Ca et en P, Lact75 : 75 % des besoins en Ca et en P, Lact50 : 50 % des besoins en Ca et en P, Lact50+FTU : 50 % des besoins en Ca et en P avec 500 FTU de phytase, ■ Ca provenant de la mobilisation des tissus mous, ▨ Ca absorbé, ■ Ca provenant de la mobilisation osseuse, ▬ besoin en Ca du lait.

2.2. Analyse de sensibilité

Tableau 1 – Indices de Sobol[1] des paramètres testés sur la mobilisation du P osseux

Paramètres	Mobilisation P os
ATTD[2] du P	59,8
Protéine du lait	40,7
Ca:P du lait [3]	11,8
Mobilisation protéique	< 1
Mobilisation lipidique	< 1

[1] *Résultat en pourcentage de la variance totale.*

[2] *ATTP : digestibilité totale apparente.*

[3] *Ca : P lait : ratio Ca : P dans le lait*

L'ATTD du P était le facteur le plus influent sur la quantité de P mobilisée des os avec 59,8 % de la variance observée (Tableau 1). Ce résultat semble logique en considérant que le P absorbé peut représenter jusqu'à 96 % (Figure 2 ; Lact75) du P présent dans le pool plasmatique avec le modèle actuel.

L'exportation protéique laitière, qui est le prédicteur de la teneur en P du lait, était également un paramètre influent. Ceci est dû aux variations de quantité de lait produite comme la teneur en protéine du lait est supposée stable (NRC, 2012).

Heurtault *et al.* (2023) avait estimé le ratio Ca : P dans le lait à 1,46 ± 0,13 (données non publiées), et ce ratio ne semblait pas être influencé par les traitements alimentaires. Ainsi, bien que ce soit un paramètre du modèle avec 11,8 % de la variance observée, son estimation à ce jour basée sur de nombreuses études (référencées dans Bikker et Blok, 2017) rend ce ratio robuste.

Enfin, en raison d'un stockage de 90% du P et 99% du Ca dans l'os (Crenshaw, 2001), bien qu'une mobilisation des tissus mous ait lieu pendant la lactation en situation de déficit entre l'ingestion et l'exportation dans le lait (Tokach *et al.,* 2019), il semble cohérent que la mobilisation protéique et lipidique n'expliquent que très faiblement la variance observée.

2.3. Qualité de prédiction du modèle

Le modèle sous-estime la mobilisation osseuse de P (Figure 4) et de Ca (Figure 5). Plusieurs hypothèses pourraient expliquer cette sous-estimation. Premièrement, l'absorption pourrait avoir été surestimée. Il est connu qu'en lactation le besoin minéral augmente, donc à un niveau d'ingestion donnée inférieur au besoin, le besoin l'est d'autant plus, ce qui est en faveur d'une absorption active accrue (Berndt et al., 2009).

La régulation de l'absorption est liée en partie au niveau de couverture du besoin phosphocalcique de l'animal. Pendant la lactation, le besoin est majoritairement alloué au besoin laitier, qui suit une courbe de Wood, soit une courbe quadratique ascendante non symétrique avec une augmentation de la production laitière au début de la lactation plus rapide que la diminution en fin de lactation (Wood, 1967 ; Hansen et al., 2012). Ainsi, il est probable que l'absorption ait été surestimée dans les deux premières semaines de lactation en raison d'une prédiction de l'ATTD basée sur des données observées en 3ème semaine de lactation. A notre connaissance, aucune donnée de cinétique de la digestibilité apparente du P et du Ca n'est disponible dans la littérature. Cependant, la forte sensibilité du modèle à ce paramètre demanderait de mieux le quantifier.

Deuxièmement, Heurtault *et al.* (2023) ont montré que le squelette d'une truie nourrie à 100% du besoin en P et Ca calculé selon Bikker et Blok (2017) se déminéralisait durant la lactation. Ainsi, soit le besoin serait sous-estimé, soit une déminéralisation osseuse serait hormonale dépendante en lactation et donc indépendante du traitement alimentaire. Dans l'hypothèse qu'une déminéralisation serait hormonale dépendante, Gutzwiller et Schlegel (2015) ont montré qu'un apport supérieur de P et de Ca en lactation chez des truies primipares et multipares (+15% par rapport à Heurtault *et al.*, 2023) ne diminuait pas l'intensité du processus de déminéralisation osseuse des truies. Ainsi, une déminéralisation indépendante de l'apport alimentaire en P et Ca en lactation serait possible et reste à approfondir.

Enfin, il se pourrait que la production laitière soit sous-estimée et que la quantité de P sécrétée dans le lait le soit donc également. Cependant, dû à la difficulté de quantifier la production laitière d'une truie, il est difficile d'évaluer la précision de prédiction du modèle d'Hansen *et al.* (2012). Le fait que l'estimation de la production laitière serait responsable d'une forte partie de l'erreur de prédiction de la mobilisation du P et du Ca est peu probable. En effet, le modèle estime à 14,9 g

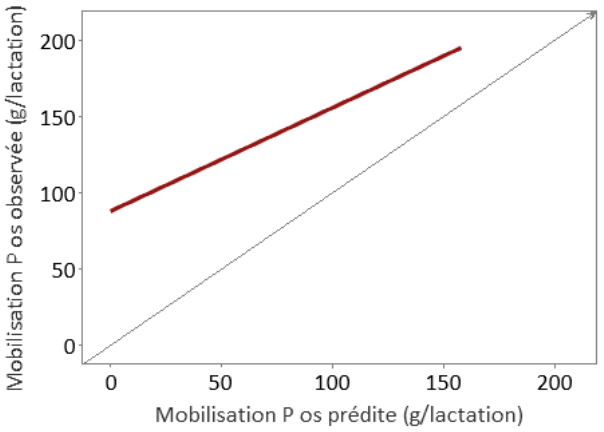

Figure 4 – Mobilisation du phosphore osseux observée et prédite durant la lactation[1] ; rouge : droite de régression ; noire : x=y

[1]Moyenne observée : 113,40 g/lactation ; moyenne prédite : 37,46 g/lactation ; RMSPE : 71% ; ECT : 87% ; ER : 1% ; EB : 11%.

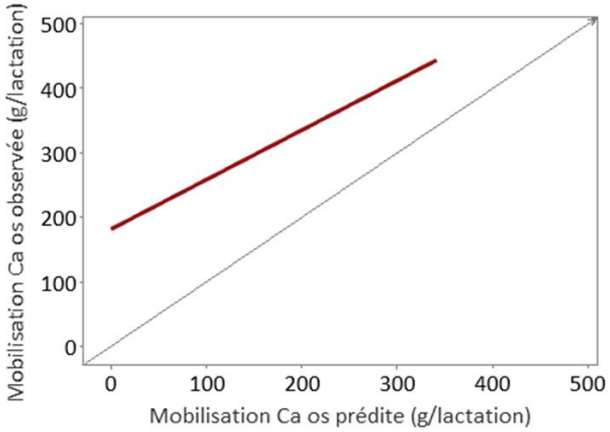

Figure 5 – Mobilisation du calcium osseux observée et prédite durant la lactation[1] ; rouge : droite de régression ; noire : x=y

[1]Moyenne observée : 244,31 g/lactation ; moyenne prédite : 80,91 g/lactation ; RMSPE : 72% ; ECT : 84% ; ER : 1% ; EB : 15%.

la quantité de P sécrété dans le lait en moyenne par jour durant la lactation (pour un nombre de porcelet moyen de 12,9, et un gain moyen quotidien de la portée moyen de 2,7 kg). Ce résultat est proche de l'estimation de 15,2 g par jour pour une truie primipare avec 14 porcelets sous mère et un gain moyen quotidien de la portée de 2,5 kg, cité par Bikker et Blok (2017).

CONCLUSION

L'objectif du présent modèle est de prédire le devenir métabolique du P et du Ca alimentaires chez une truie en lactation. A ce jour, le modèle sous-estime fortement la mobilisation osseuse de P et de Ca. A des fins d'amélioration du modèle, trois axes restent à approfondir : la cinétique d'absorption, l'éventuelle déminéralisation obligatoire en lactation et la qualité de prédiction de la quantité de P secrété dans le lait.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agroscope 2017. Principes de fertilisation des cultures agricoles en Suisse. Recherche Agronomique Suisse 8.
- Berndt T., Kumar R., 2009. Novel mechanisms in the regulation of phosphorus homeostasis. Physiology, 24(1), 17-25.
- Bikker P., van Laar H., Sips V., Walvoort C., Gerrits, W. J. J., 2016. Basal endogenous phosphorus losses in pigs are affected by both body weight and feeding level. J. Anim. Sci., 94, 294-297.
- Crenshaw T.D., 2001. Calcium, phosphorus, vitamin D, and vitamin K in swine nutrition. In: A.J. Lewis and L.L. Southern (Eds), Swine nutrition (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, Floride, USA, 187-212.
- Dourmad J.Y., Boudon A., Narcy A., 2020. Le phosphore dans les systèmes d'élevage. INRAE Prod. Anim., 33(1), 31-40.
- Evapig®. Un outil de prédiction des valeurs énergétiques, d'acides aminés et de phosphore des matières premières et des aliments pour le porc en croissance et adulte. http://www.evapig.com/
- Everts H., Jongbloed A. W., Dekker, R. A., 1998. Calcium, magnesium and phosphorus balance of sows during lactation for three parities. Livest. Prod. Sci., 55, 109-115.
- Gauthier R., Largouët C., Gaillard C., Cloutier L., Guay F., Dourmad J.Y., 2019. Dynamic modeling of nutrient use and individual requirements of lactating sows. J. Anim. Sci., 97, 2822–2836.
- Giesemann M.A., Lewis A.J., Miller P.S., Akhter M.P.,1998. Effects of the reproductive cycle and age on calcium and phosphorus metabolism and bone integrity of sows. J. Anim. Sci., 76(3), 796-807.
- Grez-Capdeville M., Crenshaw T.D., 2021. Evaluation of calcium to phosphorus ratio in spot urine samples as a practical method to monitor phosphorus intake adequacy in sows. J. Anim. Sci., 99, skab335.
- Gutzwiller A., Schlegel P., 2015. Mineralstoffgehalt der Knochen von Sauen als Indikator für die Kalzium-und Phosphorversorgung. ETH-Schriftenreihe zur Tierernährung Band 38.
- Hansen A. V., . Strathe A. B, Kebreab E., France J., Theil P.K., 2012. Predicting milk yield and composition in lactating sows: A Bayesian approach. J. Anim. Sci. 90, 2285–2298.
- Heurtault J., Létourneau-Montminy M.P., Schlegel P., 2023. Cinétique de la minéralisation osseuse de truies primipares en fonction de l'apport en phosphore et en calcium alimentaire durant la lactation. Journées Rech. Porcine, 55, 177-182.
- Heurtault J., Schlegel P., Létourneau-Montminy M.P., 2024. Prédiction de l'absorption de phosphore et de calcium chez une truie en lactation. Journées Rech. Porcine, 56, en cours de publication.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Le phosphore dans la nutrition des porcs. INRA Prod. Anim., 18, 183-192.
- Lautrou M., 2022. Phosphocalcic requirements modeling and strategies to improve phosphorus utilization in growing pigs (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay; Université Laval (Québec, Canada).
- Lautrou M., Pomar C., Dourmad J. Y., Narcy A., Schmidely P., Létourneau-Montminy M. P., 2020. Phosphorus and calcium requirements for bone mineralisation of growing pigs predicted by mechanistic modelling. Animal, 14, 313-322.
- Lee S. A., Lagos L. V., Walk C. L., Stein H. H., 2019. Basal endogenous loss, standardized total tract digestibility of calcium in calcium carbonate, and retention of calcium in gestating sows change during gestation, but microbial phytase reduces basal endogenous loss of calcium. J. Anim. Sci., 97, 1712-1721.

- National Research Council, 2012. Nutrient requirements of swine, 11th revised edition. The National Academies Press, Washington, DC, 420 p.
- Nielsen A. J., 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(3), 476–483.
- Sobol I. M., 1993. Sensitivity analysis for nonlinear mathematical models. Mathematical Modelling Computational Experiments, 1(4).
- Tokach M.D., Menegat M.B., Gourley K.M., Goodband R.D., 2019. Nutrient requirements of the modern high-producing lactating sow, with an emphasis on amino acid requirements. Animal, 13(12), 2967-2977.
- Wood P. D. P., 1967. Algebraic Model of the Lactation Curve in Cattle. Nature, 216, 164– 165.