

Capacité des modèles d'estimation des besoins chez le porc à l'engrais pour prédire l'utilisation du phosphore alimentaire chez la cochette

Piterson FLORADIN (1, 2), Marion LAUTROU (2, 4) Candido POMAR (3), Patrick SCHLEGEL (1),
Marie-Pierre LÉTOURNEAU-MONTMINY (2)

(1) Agroscope, Groupe Recherche Porcine, 1725 Posieux, Suisse

(2) Département des sciences animales, Université Laval, Québec, QC, J1V 0A6, Canada

(3) Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sherbrooke, QC, J1M 1Z3, Canada

(4) UMR MOSAR, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 75005 Paris, France

piterson.floradin.1@ulaval.ca

Capacité des modèles d'estimation des besoins chez le porc à l'engrais à prédire l'utilisation du phosphore alimentaire chez la cochette

Une approche de modélisation visant à prédire la dynamique corporelle du calcium (Ca) et du phosphore (P) indépendamment de la croissance des tissus mous chez les porcs à l'engrais a été proposée. L'objectif du présent travail était d'évaluer la capacité de ce modèle et des modèles conventionnels disponibles chez le porc à l'engrais (INRAE, NRC et CVB) à prédire la rétention corporelle de P et Ca chez des cochettes. Des données de cochettes nourries en deux phases (croissance (C) : 55-95 kg et finition (F) : 95-140 kg) ont été utilisées pour évaluer le modèle. Pendant la première phase, les animaux recevaient un aliment apportant 100% des besoins de Ca et P (C100 ; 2,1 g de P digestible/kg) *ad libitum*. Pendant la deuxième phase, dite de finition, les cochettes recevaient un régime témoin (F100) ou un régime riche apportant 160% des besoins (F160 ; 3,5 g de P digestible). Les apports d'aliment quotidiens et la teneur en énergie de ces deux régimes ont été réduits pour un gain de 700 g/jour. Les données de composition corporelle ont été utilisées pour estimer la capacité de prédiction du modèle par l'erreur quadratique moyenne de prédiction (MSPE) et sa décomposition en erreur de tendance centrale (ETC), de régression (ER) et de bruit (EB). À 95 kg, les résultats montrent que le modèle de proposé prédit adéquatement le P corporel (MSPE = 2,26%, ETC = 0,016%, ER = 13,4% et EB = 86,5%), alors que les autres modèles montraient une ETC plus élevée indiquant une sous-estimation. À 140 kg, la qualité des prédictions était réduite pour tous les modèles montrant une surestimation avec le modèle proposé et une sous-estimation avec les autres modèles. Ces résultats permettront d'adapter les modèles existants aux cochettes de renouvellement.

Ability of model that predict fattening pig requirements to predict dietary phosphorus use in gilts

A modeling approach to predict dynamics of body phosphorus (P) and calcium (Ca) independent of soft-tissue growth in fattening pigs has been developed. The objective of this study was to evaluate the ability of this model and other available models for fattening pigs (INRAE model, NRC, and CVB) to predict body P and Ca retention in gilts. Data from gilts fed in 2 phases (Growing (C): 55-95 kg, finishing: 95-140 kg) was used to evaluate the models. In the first phase, the gilts received a diet that provided 100% of the Ca and P requirements (C100; 2.1 g of digestible P/kg) *ad libitum*. In the finishing phase, the gilts received a control diet (F100; 2.1 g of digestible P) or a rich diet providing 160% of the requirements (F160; 3.5 g of digestible P), and daily feed intake and the energy content was reduced for a gain of 700 g/day. Body composition data were used to evaluate the predictive ability of the model according to the mean square error of prediction (MSEP) and its subdivision into central tendency error (CTE), regression (RE) and disturbance (DE). At 95 kg, the proposed model adequately predicted body P (MSPE = 2.26%, CTE = 0.016%, RE = 13.4% and DE = 86.5%), while the other models had a higher CTE, thus indicating underestimation. At 140 kg, accuracy of predictions decreased for all models, with the proposed model overestimating body P and the other models underestimating it. These results will help adapt existing models to replacement gilts.

INTRODUCTION

Compte tenu de la complexité de la réponse animale et des nombreux facteurs qui modulent l'utilisation des minéraux, des modèles mathématiques ont été développés chez le porc à l'engrais pour prédire les besoins en calcium (Ca) et phosphore (P) (Jondreville et Dourmad, 2005 ; NRC, 2012 ; Bikker et Blok, 2017). Ces modèles utilisent respectivement le gain de poids, le dépôt protéique et le poids vif vide (PVV) comme force motrice de la rétention corporelle de P. Le Ca est considéré proportionnel au P sauf pour celui du CVB (Bikker et Blok, 2017) qui utilise une équation en fonction du PVV indépendante de P. Des modèles avec des approches similaires sont disponibles pour les truies en gestation et lactation, mais aucun de ces autres modèles ne considère les cochettes de renouvellement. Les recommandations actuelles sont ainsi les mêmes que pour les porcs en croissance avec comme objectif une vitesse de croissance maîtrisée et une minéralisation osseuse maximale et (Jondreville et Dourmad, 2005 ; Bikker et Blok, 2017). Toutefois, le NRC (2012) recommande ainsi 15% plus de P que pour les porcs en croissance. Récemment, une nouvelle approche a été proposée pour dissocier les dépôts phosphocalciques de la protéine fondé sur des résultats récents de composition corporelle chez le porc en croissance (Lautrou *et al.*, 2019, 2020).

L'extrapolation des modèles de croissance disponibles aux cochettes de renouvellement n'a pas été validée. Ainsi, contrairement aux porcs à l'engrais où l'objectif est de garantir l'expression du potentiel de croissance des tissus maigres, l'alimentation des cochettes de renouvellement est raisonnée pour limiter la croissance afin d'éviter les situations d'aplombs trop fragiles (Quiniou, 2016), et ceci conjointement à une minéralisation maximale pour faire face aux cycles de gestation et lactation à venir. Le modèle mécaniste développé par Lautrou *et al.* (2020) pourrait permettre de prendre en compte simultanément la complexité du métabolisme phosphocalcique et les particularités de la restriction protéique et énergétique. L'objectif du présent travail est d'évaluer la capacité de ce modèle et des autres modèles couramment utilisés chez le porc à l'engrais (Jondreville et Dourmad, 2005 ; NRC, 2012 ; Bikker et Blok, 2017) à prédire la rétention corporelle de P chez les cochettes de renouvellement.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Description de la base de données

Les modèles ont été mis en œuvre et comparés à partir d'une base de données provenant d'une population de cochettes de renouvellement décrite par Floradin *et al.* (2021). Les cochettes ont été nourries selon un programme alimentaire en deux phases (55-95 kg et 95-140 kg). Pour chaque phase, les aliments ont été formulés selon les recommandations suisses de façon à satisfaire l'ensemble des besoins nutritionnels à l'exception du Ca et du P digestible (dP) (Agroscope, 2004). Deux traitements alimentaires ont été testés. Dans la première phase, les animaux recevaient tous un aliment croissance apportant 100% des besoins de Ca et P (C100 ; 2,1 g de P digestible/kg). Dans la seconde phase, dite de finition, les cochettes alimentées avec le C100 recevaient soit un régime témoin (F100 ; 2,1 g dP/kg), soit un régime riche (F160 ; 3,5 g dP/kg) apportant, respectivement, 100% et 160% des besoins en Ca et dP. Les cochettes ont été alimentées *ad libitum* durant la phase de croissance, mais elles sont ensuite rationnées (3 kg /jour) et l'énergie a été aussi été

réduite pendant la phase de finition pour limiter la croissance à environ 700 g/j, tel que recommandé jusqu'à la première saillie (Kraeling *et al.*, 2020). Le contenu minéral osseux (CMO) du corps entier ainsi que la masse des tissus maigres et gras des cochettes ont été mesurés toutes les 2 semaines par absorptiométrie biphotonique à rayons X (DXA, i-DXA, GE Medical Systems, Glattbrugg, Suisse). La concentration corporelle en protéines a été calculée à partir de la masse maigre et celle de lipides à partir de la masse maigre et grasse selon les équations proposées par Kasper *et al.* (2019).

1.2. Description des modèles sélectionnés

Les modèles du National Research Council (NRC, 2012), de INRAE (Jondreville et Dourmad, 2005), les équations du CVB (Bikker et Blok, 2017) et le modèle de recherche Lautrou *et al.* (2020) ont été sélectionnés pour évaluer leur capacité à prédire la rétention de P et Ca corporels chez des cochettes dans un contexte de restriction nutritionnelle avant la première saillie. Ces modèles estiment les besoins nutritionnels sur la base de la rétention corporelle, à laquelle s'ajoutent les besoins d'entretien. La rétention corporelle de P est cependant calculée selon différents principes distinguant ces modèles (Tableau 1). Ainsi, pour tenir compte du génotype et du sexe, le modèle du NRC (2012) propose d'utiliser une relation quadratique du P corporel en fonction de la masse corporelle de protéines. Pour la cochette, ce modèle recommande de fournir 100% du P estimé, alors que pour les porcs en croissance il propose d'apporter 85 % des besoins estimés. Le modèle proposé par INRAE estime la masse de P corporel à partir d'une fonction quadratique du poids vif (PV ; Jondreville et Dourmad, 2005). La quantité de P retenu par unité de gain de poids peut-être ainsi être estimée par la dérivée première de cette fonction (Jondreville et Dourmad, 2005). Les équations du CVB (Bikker et Blok, 2017) proposent d'estimer la rétention corporelle de Ca et P à partir d'une fonction allométrique du PVV sur la base des études récentes et des travaux de Jongbloed *et al.* (1999, 2003). Les besoins en Ca total sont estimés à partir d'un ratio Ca/P digestible fixe de 2,9 pour INRAE et de 2,15 pour le NRC.

Une autre approche a récemment été proposée pour prédire les besoins en considérant les cendres corporelles indépendamment de la croissance des tissus mous (Létourneau-Montminy *et al.*, 2015 ; Lautrou *et al.*, 2019, 2020). L'utilisation métabolique de P et Ca est représentée sous forme de trois modules, soit un module de digestion, de tissus mous et de cendres corporelles. Le module de digestion simule l'absorption de P et Ca, soit le passage de l'intestin au milieu extracellulaire, et leur excrétion au niveau fécal. Le module de tissus mous simule la croissance sous forme de dépôt de protéines et lipides corporels d'après le modèle InraPorc (van Milgen *et al.*, 2008). Le module de cendres simule le devenir du Ca et du P absorbés, en termes de rétention dans les compartiments osseux, maigres et gras.

1.3. Description de la démarche utilisée pour comparer les modèles

1.3.1. Croissance de la cochette

Des équations polynomiales ont été générées pour chaque cochette à partir des données expérimentales pour estimer la relation entre les dépôts protéiques (PD) et lipidiques (LD) et le PV. Les dépôts quotidiens de PD et de LD ont été ensuite additionnés pour calculer la masse protéique et lipidique et les dépôts d'eau et de cendres ont été calculés à partir du PD (van

Tableau 1 – Caractéristiques des modèles sélectionnés¹

Modèle	Minéralisation osseuse	Force motrice	Rétention corporelle	
			Phosphore	Calcium
INRAE	100%	PV	$5,4199 \times PV - 0,002857 \times PV^2$	Rapport Ca : P = 2,9
NRC	100%	Prot	$1,1613 + 26,012 \times Prot + 0,2299 \times Prot^2$	Rapport Ca : P = 2,15
CVB	100%	PVV	$P = e^{(1,67 + 1,0004 \times \ln PVV)}$	$Ca = e^{(0,385 + 1,0135 \times \ln PVV)}$
Lautrou <i>et al.</i> (2020)	85 ou 100%	Ca potentiel	Ca osseux / 2,16	$5,7 + 0,0461 \times PV$

¹ Prot : masse de protéines corporelles ; PV : poids vif ; PVV : poids vif vide.

Milgen *et al.*, 2008). Le PV a été calculé à partir du PVV en additionnant les masses protéiques et lipidiques, l'eau et les cendres (Whittemore et Fawcett, 1976 ; Quiniou et Noblet, 1995).

1.3.2. Prédiction des contenus corporels

Le contenu corporel en P a été estimé à partir de la masse protéique pour le NRC (Tableau 1), du PV pour INRAE, du PVV (équation spécifique au modèle) pour le CVB et du potentiel de dépôt de Ca et P dans les cendres osseuses et des tissus mous (protéines et lipides) pour le modèle de Lautrou *et al.* (2019, 2020).

Les résultats des simulations des quatre modèles ont été comparés avec les données de composition corporelle mesurées des cochettes. Les teneurs en Ca et P corporels des cochettes (observées) ont été calculées comme étant la somme des contenus dans les cendres osseuses, les protéines et les lipides lesquels sont calculés à partir des valeurs CMO, de protéines et de lipides obtenus par le DXA tel que décrit par Lautrou *et al.* (2019, 2020).

Les modèles utilisés ne présentant pas les mêmes sorties, le modèle de Lautrou *et al.* (2020) a été évalué pour son aptitude à prédire le contenu corporel en P, Ca et CMO, celui du pour son aptitude à prédire le contenu corporel en P et Ca et ceux de INRAE et NRC seulement pour le P corporel.

1.4. Statistiques

La qualité de prédiction a été évaluée en comparant les valeurs de P et Ca corporels prédites par les modèles avec les valeurs observées toutes les 2 semaines dans l'essai avec le logiciel SAS (v9.4, Inst. Inc. Cary, NC). La capacité de prédiction des modèles a été évaluée selon l'ordonnée à l'origine, la pente et l'erreur quadratique moyenne de prédiction relative (MSPE) exprimée en pourcentage de la moyenne observée. La MSPE a été divisée en trois composantes : 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 (Theil, 1966). Une prédiction adéquate se caractérise par une MSEF faible et une EB la plus élevée possible par rapport à ETC et ER.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1. Évaluation de la qualité de prédiction des modèles au cours de la première phase

Dans la première phase d'alimentation ou plus précisément entre 55 à 95 kg de PV, les résultats montrent que le modèle de Lautrou *et al.* (2020) prédit de façon adéquate le contenu corporel en P (MSPE = 2,26%, ETC = 0,016%, ER = 13,4% et ED = 86,5% ; Tableau 2). La précision est également bonne pour le modèle NRC (MSPE = 5,03%, ETC = 1,99%, ER = 27,6% et

ED = 70,4%). Les deux autres modèles sous-estiment systématiquement les données observées avec des valeurs d'ETC qui représentent 73,9% et 82,7% de la MSPE, respectivement pour le modèle INRAE et les équations du CVB (Figure 2a).

Une bonne adéquation a été notée pour le CMO (MSPE = 3,47%, ETC = 12,8%, ER = 12,4% et ED = 74,7%) et le contenu en Ca corporel (MSPE = 3,51%, ETC = 13,8%, ER = 13,7% et ED = 72,5% ; Figure 2b) entre les données observées et les données prédites par le modèle de Lautrou *et al.* (2020). Ces résultats montrent clairement que, comme chez les porcs en croissance, pour une cochette nourrie *ad libitum* entre 60 à 95 kg de PV avec des niveaux de P et Ca suffisants pour maximiser la minéralisation, les dépôts minéraux osseux peuvent suivre une trajectoire linéaire (Lautrou *et al.*, 2020 ; Figure 1). En accord avec ces résultats, les travaux de Mahan et Shields (1998) et ceux de Jondreville *et al.* (2004) montrent que les teneurs corporelles minérales augmentent linéairement avec le poids de la cochette. Ces conclusions corroborent également l'étude de Ruiz-Ascacibar *et al.* (2018) qui soutiennent que l'effet connu du sexe sur le gain des tissus mous n'est pas présent sur les teneurs corporelles en cendres ou en P. Cependant, il est intéressant de noter que la rétention de P simulée par le modèle NRC estimé à 100% des besoins (15% de plus que les porcs en croissance) était très proche de celle observée entre 55 et 95 kg de PV (Figure 1). Pour le contenu en Ca corporel prédit par l'équation du CVB, la MSPE s'élevait à 10,0% et l'ETC à 82,3%, montrant que cette équation sous-estimait les données expérimentales.

2.2. Évaluation de la qualité de prédiction des modèles au cours de la seconde phase

La qualité de prédiction de toutes les variables évaluées durant la seconde phase, et ce par tous les modèles, était réduite. Plus précisément, une surestimation avec Lautrou *et al.* (2020) et une sous-estimation dans le cas des autres modèles étaient observées (Figure 3 et 4). La surestimation des données par le modèle de Lautrou *et al.* (2020) pourrait être le résultat de la restriction alimentaire appliquée en limitant les apports énergétiques pour contrôler le GMQ qui a diminué de 1100 g/j à 700 g/j de la première à la seconde phase. En effet, les résultats montrent que la rétention corporelle de P pour les deux groupes d'animaux (F100 et F160) suit la même trajectoire que le dépôt protéique (NRC, 2012). Ceci est en accord avec les travaux de Dourmad *et al.* (2021) qui montrent que la masse de protéine corporelle pourrait être un très bon indicateur du contenu corporel en minéraux chez les truies en production.

Bien que l'impact d'une restriction sur le métabolisme soit encore très peu étudié, certains travaux chez la cochette ont rapporté une réduction de la minéralisation osseuse lorsqu'elles étaient rationnées à 85% du régime à volonté (Arthur *et al.*, 1982). Chez l'homme, il a été montré qu'une restriction énergétique entraînait un découplage du turnover

Tableau 2 - Résultats¹ de comparaison des données observées chez les cochettes de renouvellement avec les modèles de prédiction des besoins disponibles dans la littérature selon les différentes phases de croissance

Modèle	INRAE	NRC	Bikker et Block		Lautrou et al. (2020)		
	P	P	P	Ca	P	Ca	CMO ²
Traitement C100³							
Ordonnée à l'origine	-11,7	51,2	12,1	33,0	18,3	33,6	80,5
Pente	1,11	0,869	0,949	0,992	0,956	0,933	0,937
MSPE	8,70	5,03	11,4	10,0	2,26	3,51	3,47
Erreur de tendance centrale	73,9	1,99	82,7	82,3	0,016	13,8	12,8
Erreur de régression	4,12	27,6	3,46	1,24	13,4	13,7	12,4
Erreur de bruit	22,0	70,4	13,8	16,4	86,5	72,5	74,7
Traitement F100³							
Ordonnée à l'origine	-59,5	-38,9	7,15	-9,26	187	327	536
Pente	1,21	1,08	1,08	1,06	0,693	0,621	0,754
MSPE	12,37	4,90	10,89	9,92	8,29	14,25	8,67
Erreur de tendance centrale	69,7	12,0	63,4	27,6	34,0	52,8	42,4
Erreur de régression	2,673	3,171	0,666	0,528	46,2	34,1	27,0
Erreur de bruit	27,6	84,9	35,9	71,9	19,8	13,1	30,7
Traitement F160³							
Ordonnée à l'origine	-217	-95	-137	-322	129	225	392
Pente	1,52	1,19	1,36	1,44	0,81	0,76	0,84
MSPE	14,6	6,35	12,8	11,4	4,14	7,21	4,39
Erreur de tendance centrale	86,7	54,6	88,7	76,7	5,53	37,9	20,7
Erreur de régression	11,5	13,0	9,04	18,5	69,9	50,1	48,4
Erreur de bruit	1,71	32,4	2,30	4,76	24,6	12,1	30,9

¹MSPE : erreur quadratique moyenne de prédiction relative.

²CMO : contenu minéral osseux ou cendres minérales osseuses estimées à partir de la somme du dépôt de Ca, de P et des minéraux divers (Lautrou et al., 2020).

³C100 : régime distribué entre 55 et 95 kg de poids vif (PV) avec 2,1 g de P digestible/kg ; F100 : régime distribué entre 95 et 140 kg de PV avec 2,1 g de P digestible/kg ; F160 : régime distribué entre 95 et 140 kg de PV avec 3,5 g de P digestible/kg.

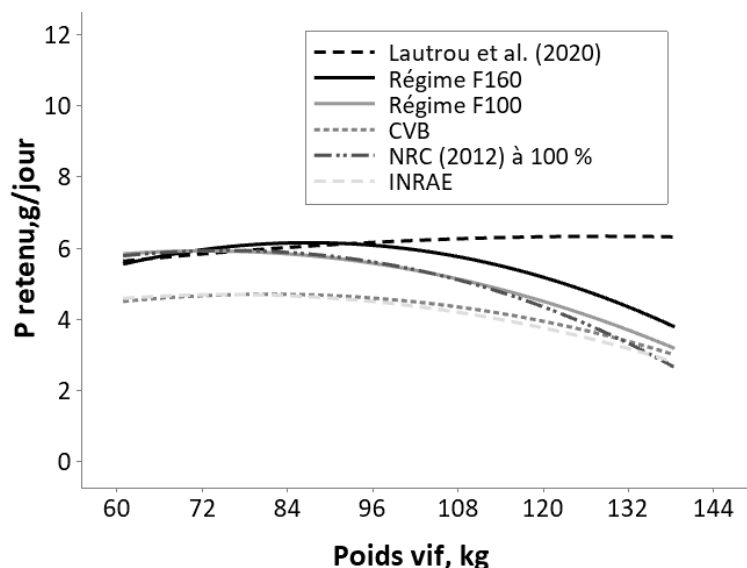


Figure 1 - Rétention corporelle en P simulée par le modèle INRAE, le modèle du NRC, de Lautrou et al. (2020), les équations du CVB (Bikker et Blok, 2017) ainsi que celle observée chez les cochettes alimentées le régime F100 et F160

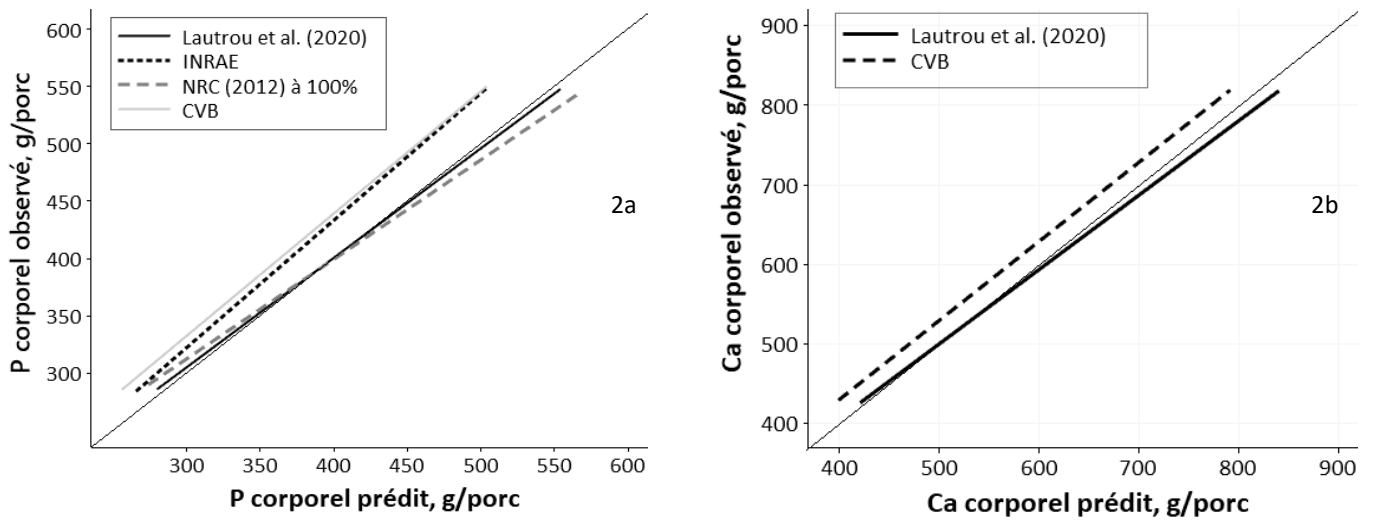


Figure 2 - Masses de P (a) et Ca (b) corporels observées en fonction de celles prédites par les modèles durant la première phase d'alimentation. La ligne grise pleine au milieu correspond à la bissectrice $Y = X$.

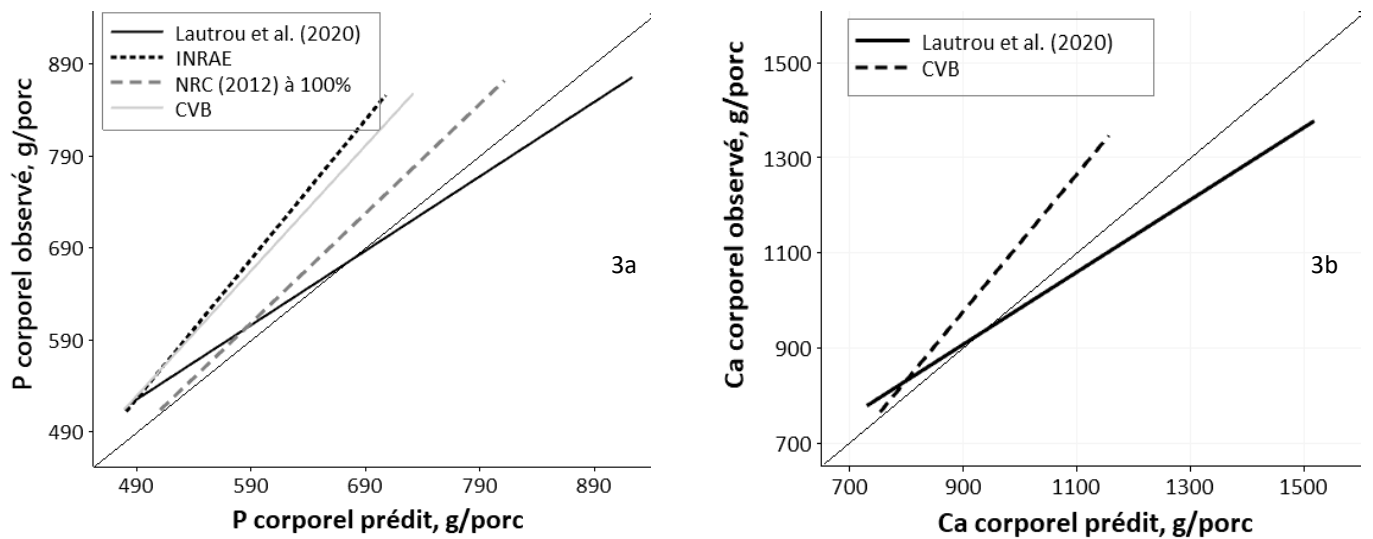


Figure 3 : Masses de P (a) et Ca (b) corporels observées en fonction de celles prédites par les modèles durant la seconde phase d'alimentation chez les cochettes soumises au régime F100. La ligne grise pleine au milieu correspond à la bissectrice $Y = X$.

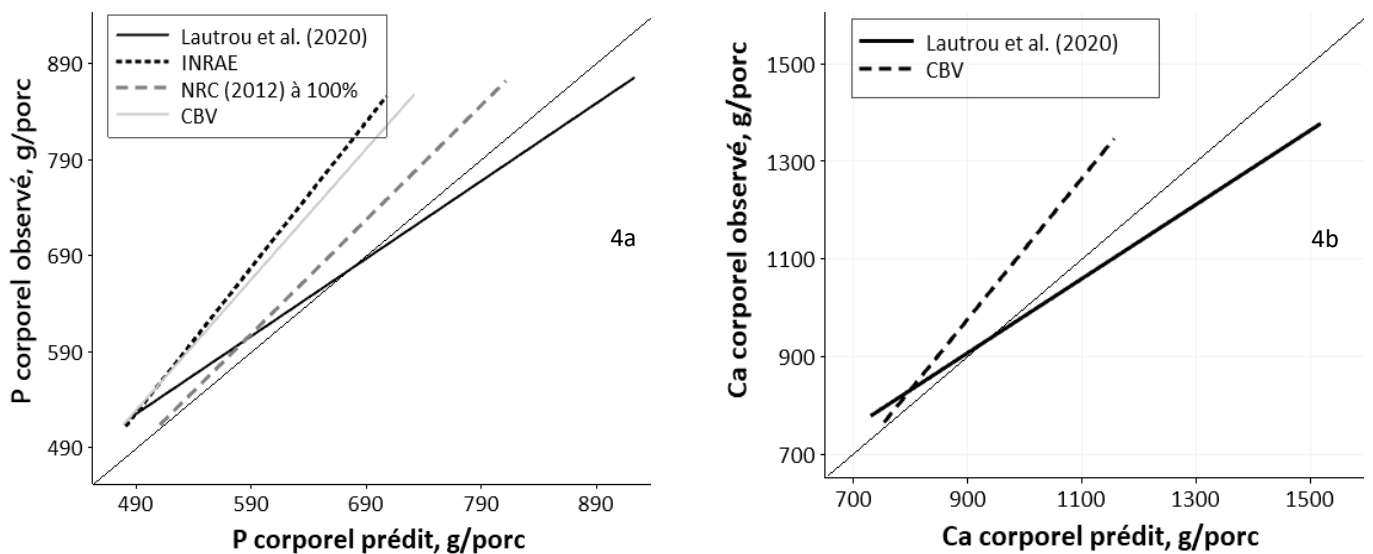


Figure 4 - Masses de P (4a) et Ca (4a) corporels observées en fonction de celles prédites par les modèles durant la seconde phase d'alimentation chez les cochettes soumises au régime F160. La ligne grise pleine au milieu correspond à la bissectrice $Y = X$.

osseux montrant une augmentation de la résorption osseuse conjointement à une diminution de la formation osseuse (Ihle et Loucks, 2004 ; Papageorgiou et *al.*, 2018) et ceci serait plus fréquent chez la femme. De même, chez la brebis en croissance, une baisse d'œstrogène due à une perte de poids ralentit l'accrétion osseuse et l'absorption intestinale de Ca et P (Fleet et Schoch, 2010).

Les résultats montrent aussi que pour le P corporel, la MSPE entre les données observées et prédites par le modèle de Lautrou et *al.* (2021) était partagée à 34,0 pour l'ETC et à 46,2 pour l'ER pour le traitement F100 (Figure 3a) et était majoritairement une ER (69,9%) pour F160 (Figure 4a). Ces observations montrent que l'augmentation du niveau de P digestible de 2,1 à 3,5 g/kg et du Ca dans les mêmes proportions si le ratio est le même entre F100 et F160 pourrait permettre de rattraper l'écart de minéralisation osseuse constaté entre les données observées et prédites par le modèle de Lautrou et *al.* (2021). En parallèle, ce dernier surestime également le Ca corporel (Figures 3b et 4b) et le CMO, alors que Ca corporel a été sous-estimé dans le cas du CVB.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le présent travail de comparaison des résultats des modèles mathématiques disponibles chez le porc en croissance pour estimer la rétention corporelle de P et Ca constitue une étape essentielle dans l'affinement de modèles adaptés aux cochettes de renouvellement. Les résultats montrent que, entre tous les modèles évalués, seulement celui de Lautrou et *al.* (2020) parvient à prédire la quantité de P et de Ca retenue chez la cochette entre 55 à 95 kg de PV avec une précision satisfaisante. Cependant, aucun des modèles évalués ne prédit de façon adéquate le P retenu en conditions de restriction énergétique chez les cochettes pendant la période de finition. Des études supplémentaires pour mieux comprendre et représenter l'impact d'une restriction énergétique seront nécessaires, dont les résultats permettront d'adapter les modèles aux cochettes de remplacement et formuler des recommandations robustes pour maximiser la minéralisation osseuse avant l'âge de la première saillie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agroscope, 2004. Apports alimentaires recommandés pour les porcs. Disponible en ligne sur : https://www.agroscope.admin.ch/dam/agroscope/fr/dokumente/themen/nutztiere/futtermittel/futtermitteldatenbank/referenzwerte-schweine-2016-10-25.xlsx.download.xlsx/Referenzwerte%20Einzelfutter%20Stand%2020180124_v1.xlsx. Consulté le 08/08/2020.
- Arthur S.R., Kornegay E.T., Thomas H.R., Veit H.P., Notter D.R., Webb Jr K.E., Baker J.L., 1983. Restricted energy intake and elevated calcium and phosphorus intake for gilts during growth. IV. Characterization of metacarpal, metatarsal, femur, humerus and turbinates of sows during three parities. *J. Anim. Sci.*, 57(5), 1200-1214.
- Bikker P., Blok M.C., 2017. Phosphorus and calcium requirements of growing pigs and sows. Wageningen Livestock Research (CVB documentation report 59), Wageningen, the Netherlands, 72 p.
- Fleet J.C., Schoch R.D., 2010. Molecular mechanisms for regulation of intestinal calcium absorption by vitamin D and other factors. *Crit. Rev. Clin. Lab. Sci.*, 47, 181-195.
- Floradin P., Pomar C., Létourneau-Montminy M.P., Schlegel P., 2021. Modulation du contenu minéral osseux chez les cochettes par un protocole de déplétion et de réplétion. *Journées Rech. Porcine*, 53, 121-126.
- Dourmad J. Y., Etienne M., Noblet J., Dubois S., Boudon A., 2021. Contenu corporel en minéraux des truies reproductrices. *Journées Rech. Porcine*, 53, 203-204.
- Ihle R., Loucks A.B., 2004. Dose-response relationships between energy availability and bone turnover in young exercising women. *J. Bone Miner. Res.*, 19(8), 1231-1240.
- Jondreville C., Dourmad J.Y., 2005. Phosphorus in pig nutrition. *INRA Prod. Anim.*, 18, 183-192.
- Jondreville C., Revy P., Dourmad J.Y., Nys Y., Hillion S., Pontrucher F., 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. Porcine*, 36, 17-24.
- Jongbloed A.W., Diepen J.T.M., van Kempe P.A., 2003. Fosfornormen voor varkens: herziening 2003. CVB-documentatierapport nr. 30, 66 p.
- Jongbloed A. W., Everts H., Kempe P. A., Mroz Z., 1999. Quantification of absorbability and requirements of macroelements. In: I. Kyriazakis (Ed), *A quantitative biology of the pig*, 275-298, . CABI pub., Wallington, Oxon, UK.
- Kasper C., Schlegel P., Ruiz-Ascacibar I., Stoll P., Bee G. , 2021. Accuracy of predicting chemical body composition of growing pigs using dual-energy X-ray absorptiometry. *Animal*, 15(8), 100307.
- Kraeling R.R., Webel S.K., 2015. Current strategies for reproductive management of gilts and sows in North America. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 6, 1-14.
- Lautrou M., Pomar C., Dourmad J.Y., Létourneau-Montminy M.P., 2019. Modèle mécaniste de l'utilisation métabolique du phosphore et du calcium alimentaires et de la dynamique de dépôt des cendres corporelles: version 2.0. *Journées Rech. Porcine*, 51, 135-140.
- 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, s313-s322.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Dourmad J.Y., Crenshaw, T.D., Pomar C., 2015. Modeling the metabolic fate of dietary phosphorus and calcium and the dynamics of body ash content in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 933, 1200-1217.
- NRC (National Research Council), 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Ed. National Academies Press, Washington D.C., 400 p.
- Papageorgiou M., Dolan E., Elliott-Sale K.J., Sale C., 2018. Reduced energy availability: implications for bone health in physically active populations. *Eur. J. Nutr.*, 57(3), 847-859.
- Ruiz-Ascacibar I., Stoll P., Bee G., Schlegel P., 2019. Dynamics of the mineral composition and deposition rates in the empty body of entire males, castrates and female pigs. *Animal*, 13, 950-958.
- Theil H., 1966. Applied economic forecasting. Studies in mathematical and managerial economics. Ed?? Amsterdam, The Netherlands, 503 p.
- Quiniou N., 2016. La cochette entre 30 et 110 kg n'est pas un porc charcutier. *TechPorc*, 32, 2-3.
- Quiniou N., Noblet J., 1995. Prediction of tissular body composition from protein and lipid deposition in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 73, 1567-1575.
- 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. Technol.*, 143, 387-405.
- Whittemore C.T., Fawcett R.H., 1976. Theoretical aspects of a flexible model to stimulate protein and lipid growth in pigs. *Anim. Sci.*, 22, 87-96.