

OCALM : UN MODELE POUR ETUDIER L'EFFET DE STRATEGIES ALIMENTAIRES SUR LES FLUX DE MINERAUX CHEZ LA POULE PONDEUSE

Guyot Yann¹, Pampouille Eva¹, Burlot Thierry², Duclos Michel J.³, Guerini Céline⁴,
Quentin Maxime¹, Narcy Agnès³, Méda Bertrand³

¹ITAVI, 7 rue du Faubourg Poissonnière, 75009 PARIS

²NOVOGEN, 5 rue des compagnons, Secteur du Vau Ballier, 22960 PLEDRAH

³INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 NOUZILLY

⁴CCPA, 35150 Janzé

guyot@itavi.asso.fr ; bertrand.meda@inrae.fr

RÉSUMÉ

La formation quotidienne de la coquille de l'œuf met en jeu différents mécanismes digestifs et métaboliques. Afin d'étudier ces processus et d'identifier des stratégies nutritionnelles minérales adaptées, cette étude propose un modèle dynamique simulant les flux de calcium (Ca) et phosphore (P) chez la poule pondeuse au cours de sa carrière. Les flux digestifs sont tout d'abord simulés, en considérant notamment deux formes de Ca alimentaire (Ca fin vs. particulaire) au niveau de jabot et du gésier. Au niveau intestinal, le Ca et le P sont absorbés vers le plasma. Au niveau métabolique, les flux depuis/vers l'os dépendent des besoins pour l'œuf. Ainsi, après la ponte, l'animal peut stocker du Ca dans l'os (accrétion) tandis que le Ca osseux peut être mobilisé lorsque les besoins pour la synthèse de la coquille sont élevés. Les minéraux non utilisés sont excrétés via l'urine. Le modèle simule ensuite ces flux sur la carrière de l'animal en considérant l'évolution de la ponte dans le temps (taux et heure de ponte). Enfin, une approche « troupeau » est également proposée en considérant trois « profils » animaux (« bon », « moyen » et « mauvais »). Un ajustement des principaux paramètres digestifs a été réalisé afin notamment de tenir compte de l'effet de la taille des particules sur les vitesses de passage du Ca entre compartiments digestifs. Des simulations pour différents niveaux de Ca particulaire dans la ration sont proposées et soulignent l'importance de proposer le minéral sous une forme permettant une absorption progressive sur une plus longue durée. Toutefois, les simulations confirment le rôle du Ca fin pour la reconstitution de la réserve osseuse. Ce modèle constitue donc un outil précieux pour aider les nutritionnistes à concevoir des stratégies d'alimentation minérale permettant de préserver la santé osseuse des animaux lors de carrières longues.

ABSTRACT

OCaLM: A model to study the effect of feeding strategies on mineral flows in laying hen.

The daily formation of eggshell is associated with several digestive and metabolic mechanisms. In order to study those processes and design adapted mineral nutrition strategies, this study proposes a dynamic model simulating calcium (Ca) and phosphorus (P) fluxes in laying hens during their productive career. Digestive fluxes are first simulated, considering two different forms of dietary Ca (fine vs. particulate Ca) in the crop and the gizzard. Ca and P are absorbed from the intestine to the plasma. At the metabolic level, fluxes to/from the bone depend on egg requirements. Thus, after oviposition, Ca can be stored in the bone (accretion), while bone Ca can be mobilized when requirements for shell formation are high. Unused minerals are excreted in the urine. The model then simulates these fluxes over the animal's career, taking into account the evolution of laying over time (rate and hour of laying). Finally, a "flock" approach is also proposed, considering three animal "profiles" ("good", "average" and "poor"). The main digestive parameters were adjusted to consider the effect of particle size on the passage rate of Ca between digestive compartments. Simulations for different levels of particulate Ca in the feed are proposed, stressing out the importance of supplying Ca in a form allowing a progressive absorption over time. However, the simulations confirm the role of fine Ca in replenishing bone reserves. This model is thus a tool for nutritionists to design mineral feeding strategies preserving bone health in laying hens with long productive careers.

INTRODUCTION

Chez la poule pondeuse, la gestion de l'alimentation minérale des animaux (calcium et phosphore) est primordiale pour permettre aux animaux d'exprimer leur potentiel génétique (*i.e.* taux de ponte) tout en maintenant une bonne qualité de coquille, et ce d'autant plus avec l'allongement de la carrière productive des animaux (*cf.* objectif de 500 œufs en 100 semaines ; Bain *et al.*, 2006). Etant donné que la formation de la coquille a principalement lieu pendant la phase nocturne, durant laquelle les animaux ne s'alimentent pas, une partie du calcium exporté vers la coquille provient de la résorption osseuse (Duclos *et al.*, 2022 ; Nys *et al.*, 2010 ; Whitehead, 2004). Aussi, un enjeu actuel pour les nutritionnistes est de proposer des stratégies nutritionnelles permettant d'assurer sur le long terme la ponte et la qualité de la coquille, tout en préservant le capital osseux des animaux (*i.e.* limiter la mobilisation osseuse), pour réduire les phénomènes d'ostéoporose et les risques de fractures (Duclos *et al.*, 2022 ; Whitehead et Fleming, 2000).

Dans ce contexte, les approches de modélisation représentent des outils puissants pour la conception et l'évaluation rapide et à moindre coût de stratégies nutritionnelles, en particulier pour l'alimentation minérale. Ainsi, le modèle mécaniste proposé par Kebreab *et al.* (2009) permet de simuler, sur une journée, les flux de calcium et de phosphore chez la poule pondeuse en production, et de mieux comprendre les phénomènes de mobilisation du calcium depuis l'os médullaire pour permettre la synthèse de la coquille (Whitehead, 2004).

Cependant, ce modèle ne permet pas en l'état de considérer les différences de cinétiques digestives (temps de transit, solubilisation) pouvant exister entre les différentes formes de carbonate de calcium présentes dans l'aliment (*i.e.* carbonate « fin » vs. « particulaire »). En effet, comme montré par Hervo *et al.* (2022, 2024a), la taille des particules est un paramètre clé pour assurer une solubilisation et une absorption progressive du calcium. De plus, la variabilité inter-individuelle sur les paramètres de ponte et leur évolution dans le temps (*i.e.* décalage progressif de l'heure de ponte ; *cf.* Guyot *et al.*, 2024) ne sont pas non plus considérées dans ce modèle.

L'objectif de cette étude était donc de faire évoluer le modèle de Kebreab *et al.* (2009) pour permettre de considérer deux formes différentes de carbonate de calcium, puis de développer une approche « carrière » à l'échelle d'un animal et du troupeau pour pouvoir évaluer l'effet de stratégies alimentaires minérales sur la mobilisation osseuse à long terme.

1. DESCRIPTION DU MODELE

Le modèle OCalM repose sur le couplage de trois sous-modèles. Un premier sous-modèle mécaniste à l'échelle de l'animal, simule les flux de calcium (Ca) et phosphore (P) sur une journée avec un pas de temps de 3 min. Ce sous-modèle « animal » est ensuite

mobilisé pour simuler les flux sur la carrière d'un animal puis d'un lot d'animaux. Il a été implémenté informatiquement en Python (version 3.9) à l'aide des bibliothèques *numpy*, *pandas* et *scipy*.

1.1. Sous-modèle « Animal »

Le modèle « animal » repose principalement sur le modèle mécaniste prédisant sur 24 heures les flux de Ca et P proposé par Kebreab *et al.* (2009), dont une version modifiée du modèle conceptuel est donnée en Figure 1. Au niveau digestif, le passage des minéraux ingérés via le jabot et le gésier vers l'intestin, lieu de l'absorption, sont décrits en considérant les vitesses de transit. Par ailleurs, l'absorption intestinale du Ca est modulée en fonction du moment de la journée, avec une absorption accrue (70%) à partir de 4h post-oviposition et pendant toute la durée de formation de la coquille (*vs.* 40% entre 0 et 4h post-oviposition). L'absorption intestinale du phosphore est, quant à elle, considérée constante tout au long de la journée.

Au niveau métabolique, les minéraux arrivent dans le plasma qui jouent le rôle de compartiment central de distribution entre l'os, l'œuf et l'urine. Lorsque les besoins en Ca sont élevés (*i.e.* pendant la phase de formation de la coquille), le pool de Ca osseux peut être mobilisé tandis que la reconstitution des réserves est également possible, en particulier pendant les premières heures suivant la ponte (Figure 1).

La principale adaptation par rapport au modèle initial de Kebreab *et al.* (2009) réside ici dans la représentation explicite de deux formes de Ca d'origine alimentaire, en fonction de la taille des particules de carbonate de calcium (Figure 1) : d'une part, du calcium fin, dont la vitesse de passage du gésier vers l'intestin est élevée, et de l'autre du calcium particulaire (*i.e.* « semoulette ») dont la vitesse de passage est faible (Hervo *et al.*, 2024a ; Rao *et al.*, 1990). Par ailleurs, contrairement au modèle original de Kebreab *et al.* (2009), le phosphore alimentaire est ici exprimé en P total, et un coefficient d'absorption au niveau intestinal est considéré pour permettre de prédire les flux absorbés vers le plasma et excrétés dans les fèces. Enfin, au niveau osseux, des stocks maximaux de Ca et de P, ont été représentés dans le modèle (11,9 g Ca et 5,4 g P par kg de poids vif ; Figure 1).

1.2. Passage à la carrière d'un animal

Dans le but d'étendre le modèle journalier à la carrière de l'animal, un modèle reproduisant la trajectoire de ponte d'un animal a été construit. Le modèle se base sur les résultats de classification présentés par Guyot *et al.* (2024), permettant de connaître, pour un profil de pondeuses donné, l'heure de ponte (moyenne et écart type), le taux de ponte et le nombre de séries par période de 5 semaines à partir de 21 semaines d'âge. A partir de ces quatre variables, le modèle de carrière recrée aléatoirement une cinétique de ponte sur 5 semaines consécutives avec des pauses plus ou moins longues entre chaque série

d'œufs et un nombre d'œuf total égal au taux de ponte de la période. Par la suite, pour chaque série au sein de la période, une heure de ponte croissante est calculée à partir de l'heure de ponte moyenne et l'écart type, en appliquant une distribution uniforme. Enfin, cette procédure est appliquée successivement sur 10 périodes de 5 semaines pour reconstituer la totalité de la carrière de l'animal.

1.3. Passage à un modèle troupeau

Afin de simuler les flux à l'échelle d'un lot en production sur l'ensemble d'une carrière, les trajectoires de ponte pour 3 profils de poules ont été utilisées (pondeuses « bonnes », « intermédiaires » et « mauvaises »). A l'aide de ces courbes, les proportions relatives entre ces trois profils sont calculées pour reproduire un taux de ponte du lot, fourni en entrée du modèle. Chaque profil de poules est également décrit par l'ensemble des variables permettant de faire varier la ponte au cours de la carrière, comme présenté dans la section 1.2. Les trois profils ont été obtenus à l'aide des données et de la méthode de classification de Guyot *et al.* (2024), avec un nombre de clusters fixé à 3. La simulation des flux à l'échelle du lot sur une carrière est ensuite réalisée en simulant les flux pour un animal de chaque profil (cf. section 1.2). Les flux pour un animal « moyen » du lot sont calculés comme la moyenne pondérée en considérant les proportions relatives de chaque profil.

2. PARAMETRAGE ET SIMULATIONS

2.1. Paramétrage du sous-modèle « Animal »

Le paramétrage du modèle a été réalisé en utilisant les données de Méda *et al.* (2024) décrivant chez la poule pondeuse les flux de Ca et de P en fonction de trois stratégies d'apport du Ca particulaire. A l'aide de la librairie Python *pymoo*, l'objectif était ici de minimiser l'écart entre les excréments simulés et observés de Ca et de P, en ajustant sept paramètres du sous-modèle « Animal » :

- vitesses de passage jabot-gésier et gésier-intestin du P, du Ca fin et du Ca particulaire ;
- coefficient d'absorption intestinale du P.

2.2. Plan de simulation

Cinq simulations ont été réalisées entre 21 et 71 semaines d'âge avec des aliments dans lequel le Ca particulaire représentait une proportion croissante du Ca total (0, 25, 50, 75 ou 100% du Ca total). La courbe de ponte utilisée pour ajuster les proportions des 3 profils animaux est celle du guide sélectionneur de la souche Novogen Brown. Trois aliments successifs ont été distribués à raison de 120 g/j/poule en deux repas (40% de la ration pendant 5h puis 60% pendant 9h) avec des teneurs totales en Ca et P de :

- jusqu'à 30 semaines d'âge : 3,50% Ca et 0,47% P ;
- de 31 à 45 semaines d'âge : 3,50% Ca et 0,44% P ;
- de 45 à 71 semaines d'âge : 3,75% Ca et 0,43% P.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Paramétrage et validation interne

Hormis pour le Ca particulaire entre le jabot et le gésier, les ordres de grandeur des taux de passage des minéraux après ajustement sont très différents de ceux de Kebreab *et al.* (2009). Ainsi, les taux de passage du P et du Ca fin (exprimés en h^{-1}) après optimisation sont entre 2,6 et 4,7 fois plus élevés que ceux du modèle d'origine, tandis que le taux de passage du Ca particulaire du gésier vers l'intestin est 3 fois plus faible (Figure 1). Ceci traduit respectivement un temps de rétention (*i.e.* $1/\text{taux de passage}$) plus faible pour les particules fines, confirmant la capacité du modèle à bien représenter le comportement différent du Ca en fonction de la taille des particules. Les valeurs obtenues après optimisation sont par ailleurs cohérentes avec les données de Hervo *et al.* (2024a), en particulier pour le Ca particulaire, du gésier vers l'intestin de $0,37 h^{-1}$. Enfin, le coefficient d'absorption intestinale du P a été fixé à 75%. Cette valeur est très élevée mais correspond à l'ordre de grandeur du ratio entre P disponible et P total chez Hervo *et al.* (2024a) et Méda *et al.* (2024).

La validation interne (*i.e.* comparaison des données observées vs. prédites utilisées pour l'optimisation des paramètres) s'avère satisfaisante pour le Ca, malgré une surestimation de l'excrétion ($\approx 30\%$), mais pas pour le P (Figure 2). Compte-tenu de la cohérence des valeurs des paramètres digestifs, la faible capacité prédictive du modèle pour le P pourrait s'expliquer au niveau métabolique. La faible variabilité de l'excrétion observée de P par rapport aux prédictions (0,7-2,1 g vs. 1,0-4.1 g) pourrait être expliquée par une sous-estimation de la rétention corporelle du P (*i.e.* régulation du flux urinaire mal représentée dans le modèle), en accord avec les données de Méda *et al.* (2024) utilisées pour ajuster les paramètres digestifs du modèle (rétention de 12 à 19% du P ingéré).

3.2. Résultats de simulations

La réserve en Ca dans les os (en fin de journée) n'est pas affectée de la même façon par la stratégie alimentaire pour chacun des trois profils de pondeuses simulés (Figure 3). La stratégie à 0% de Ca particulaire conduit à une baisse rapide et forte de la réserve osseuse pour les trois profils, même si en fin de carrière, elle se reconstitue chez les « mauvaises » pondeuses car le taux de ponte est faible. Cette reconstitution est probablement surestimée par le modèle puisque l'ingéré d'animaux ne pondant pas ou peu est généralement réduit (*i.e.* ingéré équivalent dans les simulations pour les trois profils). L'apport de 25% de Ca particulaire permet de limiter ce phénomène mais le déficit chez les pondeuses « moyennes » et « bonnes » est encore conséquent, malgré un début de reconstitution du stock (Figure 3). A partir d'un apport de 50% du Ca total apporté sous forme particulaire, la réserve osseuse est beaucoup moins sollicitée (en % de la réserve maximale). Ainsi,

la réserve osseuse en Ca ne passe que très rarement sous le seuil de 90% de la réserve maximale, avec des valeurs généralement comprises entre 95 et 100% de la valeur maximale avec les stratégies apportant 75% ou 100% du Ca sous forme particulaire (Figure 3). En effet, avec ces stratégies, une partie des besoins en Ca peut être couverte par le Ca alimentaire, même pendant la phase nocturne car le Ca particulaire est absorbé plus lentement (Hervo *et al.*, 2022, 2024a). Pour les « bonnes » pondeuses, les simulations confirment en outre que l'apport d'une partie du Ca sous forme fine (*i.e.* 75% de Ca particulaire) permet de maintenir une réserve osseuse proche de son niveau maximal, puisque malgré une mobilisation osseuse pendant la phase nocturne, l'apport de Ca fin, rapidement utilisable par l'animal après la ponte, permet de reconstituer la réserve osseuse, ce que la stratégie avec 100% de Ca particulaire ne permet pas.

3.3. Perspectives d'évolution du modèle

Les phénomènes digestifs tels que représentés ne permettent pas de prendre en compte certaines caractéristiques de l'aliment et les interactions entre les nutriments (*e.g.* taille des particules, phytase, interactions Ca-P...). Ainsi, un couplage avec le modèle de Hervo *et al.* (2024b) permettrait de mieux prendre en compte les caractéristiques de l'aliment, notamment l'effet de la taille des particules, qui joue un rôle crucial dans la solubilisation du Ca (Hervo *et al.*, 2022, 2024a). En outre, il conviendrait de considérer l'évolution avec l'âge de certains paramètres digestifs, comme par exemple l'absorption intestinale du Ca (Duclos *et al.*, 2022). De même, il serait intéressant de considérer une absorption réduite du Ca les jours de « pause » (*i.e.* pas de formation d'œuf). Enfin, l'ingestion est considérée comme constante sur la durée d'un repas. Aussi, la modélisation fine de l'ingestion (*e.g.* tri des particules, ingestion accrue en début/fin de journée, ingestion régulée en fonction de la formation ou non d'un œuf...) permettrait de mieux prédire les flux digestifs. Par ailleurs, au niveau métabolique, les réserves dans l'os sont aujourd'hui représentées comme des pools uniques de Ca et de P (Figure 1). Or, la résorption et

l'accrétion osseuse se font depuis/vers l'os médullaire, une structure propre aux oiseaux. Toutefois, dans certaines situations, l'os cortical, garant de la solidité de l'os, peut également être mobilisé, avec des risques accrus de fractures (Duclos *et al.*, 2022 ; Whitehead, 2004). Ainsi, il serait intéressant de représenter explicitement ces deux structures osseuses avec une mobilisation préférentielle de l'os médullaire, mais avec la possibilité de solliciter l'os cortical en cas de déficit minéral. Ceci permettrait de mieux mettre en évidence des situations nutritionnelles « à risque ». En outre, la formation de l'œuf (et en particulier de la coquille) est la force motrice du modèle *i.e.* la formation de l'œuf est systématiquement réalisée. Or, la stratégie d'apport du Ca peut avoir une incidence sur la qualité de la coquille (Hervo *et al.*, 2023 ; Méda *et al.*, 2024), voire le taux de ponte (Douglas *et al.*, 1972 ; Williams *et al.*, 1985). Aussi, une régulation de la ponte et du flux de Ca vers l'œuf, en lien avec l'état de la réserve osseuse, serait une évolution majeure du modèle, permettant d'éviter un « stock négatif » (*cf.* Figure 3).

CONCLUSION

Le modèle OCalM simule les flux de calcium et de phosphore chez la pondeuse au cours de sa carrière, à l'échelle de l'animal et du lot. Il permet d'étudier le devenir des minéraux ingérés en fonction de la stratégie nutritionnelle (*i.e.* teneurs et modalités d'apport) et des performances de ponte (taux et heure de ponte). Ce modèle constitue donc un outil pour la conception de nouvelles stratégies alimentaires visant à maintenir la qualité de la coquille et l'intégrité osseuse des animaux, en particulier dans le contexte d'allongement des carrières. Un prototype avec une interface « utilisateur » est disponible en ligne : <https://ocalm-1bf06f5b95c1.herokuapp.com/>.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (projet CASDAR OCalM ; 2021-2023).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Douglas C.R., Harms R.H., Wilson H.R., 1972. *Poult. Sci.*, (51), 2015-2020.
Duclos M.J., Gloux A., Narcy A., Quentin M., 2022. 14^{èmes} JRA-PFG, 330-338.
Guyot Y., Burlot T., Quentin M., Méda B., Pampouille E., 2024. 15^{èmes} JRA-PFG, sous presse.
Hervo F., Narcy A., Nys Y., Létourneau-Montminy M.-P., 2022. *Poult. Sci.*, (101), 101686.
Hervo F., Létourneau-Montminy M.-P., Mème N., Méda B., Duclos M.J., Narcy A., *Poult. Sci.*, (102), 102613.
Hervo F., Méda B., Létourneau-Montminy M.-P., Narcy A., 2024a. 15^{èmes} JRA-PFG, sous presse.
Hervo F., Méda B., Narcy A., Létourneau-Montminy M.-P., 2024b. 15^{èmes} JRA-PFG, sous presse.
Kebreab E., France J., Kwakkel R.P., Leeson S., Darmani Kuhi H., Dijkstra J., 2009. *Poult. Sci.*, (88), 680-689.
Méda B., Mireaux M., Chev   B., Duclos M.J., Gambier E., Guerini C., Pampouille E., Quentin M., Souchet C., Narcy A., Guyot Y., 2024. 15^{èmes} JRA-PFG, sous presse.
Nys Y., Hincke M.T., Hernandez-Hernandez A., Rodriguez-Navarro A.B., Gomez-Morales J., Jonch  re V., Garcia-Ruiz J.M., Gautron J., 2010. *INRAE Prod. Anim.*, (23), 143-154.
Whitehead C.C., 2004. *Poult. Sci.*, (83), 193-199.
Whitehead C.C., Fleming R.H., 2000. *Poult. Sci.*, (79), 1033-1041.
Williams J.B., Etches R.J., Rzas   J., 1985. *Brit. Poult. Sci.*, (26), 25-34.

Figure 1. Représentation conceptuelle des flux de calcium (Ca) et de phosphore (P) à l'échelle de l'animal.
Rouge : adaptations par rapport à Kebreab *et al.* (2009). Bleu : principaux paramètres régissant les flux.

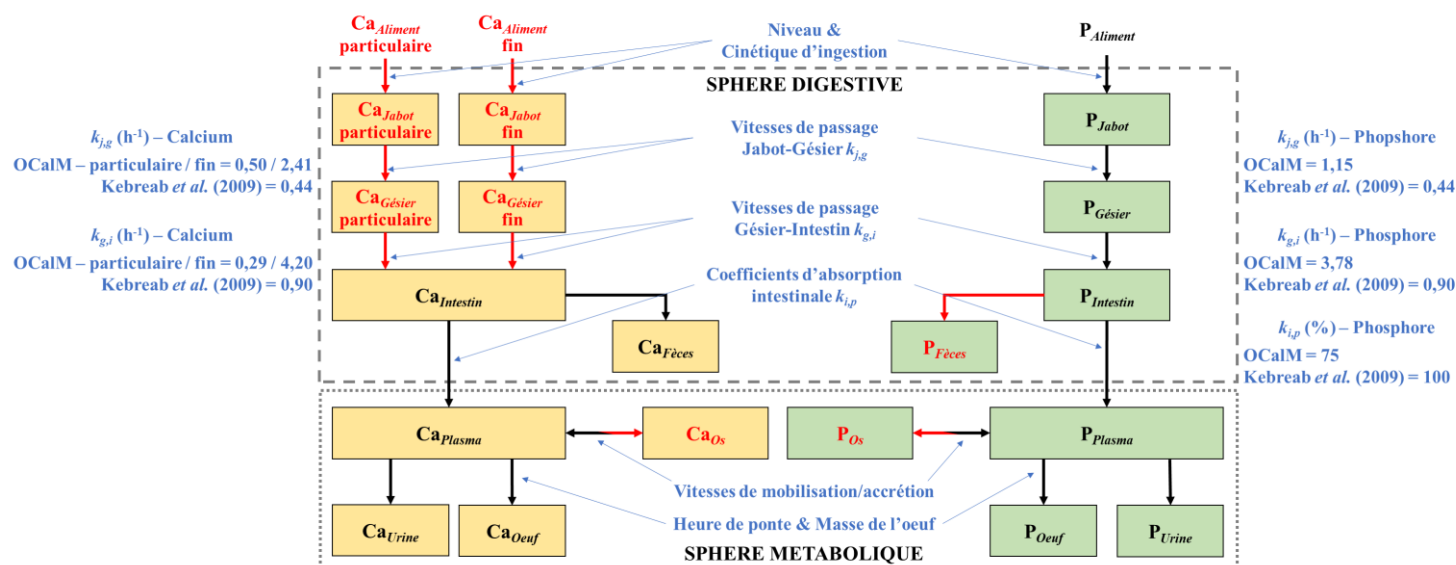


Figure 2. Quantités excrétées de calcium et phosphore mesurées par Méda *et al.* (2024) en fonction des prédictions du sous-modèle « Animal » après ajustement des sept paramètres digestifs (cf. Figure 1).

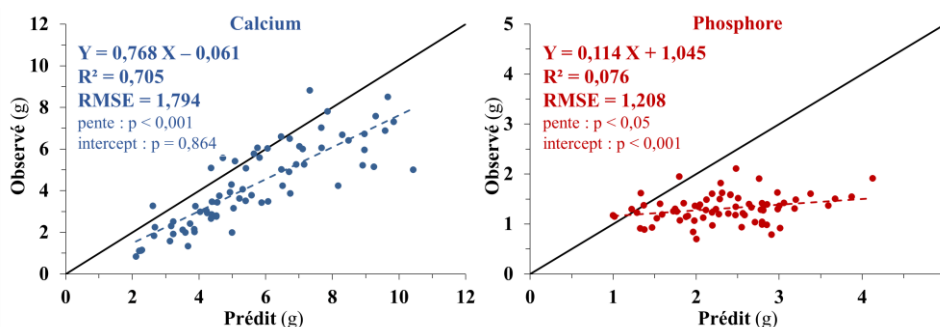


Figure 3. Evolution de la réserve osseuse en calcium entre 21 et 71 semaines d'âge selon la proportion de calcium particulaire dans l'aliment pour chaque profil animal composant le lot.

