

OCaIM : Optimisation des apports Calciques journaliers par Modélisation

Simuler l'utilisation du calcium alimentaire pour préserver le capital osseux des poules pondeuses.



Y GUYOT¹, B MEDA², E PAMPOUILLE¹

Contact : guyot@itavi.asso.fr

¹ ITAVI, 7 rue du Faubourg Poissonnière, 75009 PARIS

² INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 NOUZILLY

Etude financée par :



Résumé

La formation de la coquille d'œuf est un processus physiologique complexe qui nécessite une adéquation quotidienne entre les apports alimentaires de calcium et les besoins de l'animal. Avec l'allongement de la période productive des poules, la gestion de l'alimentation minérale est essentielle pour ajuster les apports en calcium afin de limiter la mobilisation osseuse et préserver la qualité de la coquille de l'œuf. Dans le cadre du projet CAS DAR OCaIM (2021-2023), cette étude visait à développer un modèle capable de prédire la mobilisation osseuse du calcium chez les poules pondeuses en fonction du plan d'alimentation (quantité, composition et horaire des repas) et de la cinétique de ponte (heure de ponte). Le modèle développé simule d'abord, à l'échelle de la journée pour un animal moyen, le devenir digestif du calcium alimentaire, en considérant notamment deux formes de calcium (fin vs. grossier). Une fois absorbés, les minéraux sont utilisés pour la production de l'œuf et en cas de déficit, ces derniers peuvent être mobilisés depuis la réserve osseuse. Puis, des modules « carrière » et « lot » permettent d'étendre les simulations sur toute la carrière d'un lot d'animaux entre 21 et 71 semaines d'âge, en considérant trois profils d'animaux (pondeuses qualifiées de « bonnes », « intermédiaires » et « mauvaises »). Cet outil d'aide à la décision innovant permettrait aux nutritionnistes d'identifier les meilleures stratégies alimentaires afin de préserver au mieux le capital osseux des animaux. Un prototype de l'outil a par ailleurs été développé et est disponible en ligne.

1 Contexte

La gestion de l'alimentation minérale chez la poule pondeuse, notamment en calcium (Ca) et phosphore (P), est essentielle pour permettre aux animaux d'exprimer leur potentiel génétique, c'est-à-dire maintenir un taux de ponte élevé tout en préservant une bonne qualité de coquille. C'est d'autant plus vrai qu'en France, on constate au fil du temps un allongement de la carrière des poules pondeuses, comme l'illustrent les objectifs de production de 500 œufs en 100 semaines (Bain *et al.*, 2016). Cette augmentation du nombre

d'œufs produits par poule induit une sollicitation intense et prolongée du métabolisme calcique des poules, dont la capacité d'absorption du calcium alimentaire est réduite avec l'augmentation de l'âge des poules. De plus, la formation de la coquille se produisant principalement pendant la phase nocturne, lorsque les poules n'ont plus accès à l'aliment, une partie importante du Ca exporté vers l'œuf provient de la résorption osseuse (Duclos *et al.*, 2022 ; Nys *et al.*, 2010 ; Whitehead, 2004). Cela entraîne d'une part une augmentation de la fréquence des fractures liées à une ostéoporose (Duclos *et al.* *et al.*, 2022

; Whitehead et Fleming, 2000) et d'autre part à la production d'œufs plus fragiles par la baisse de l'épaisseur de la coquille.

Pour les nutritionnistes, le défi actuel consiste donc à élaborer des stratégies alimentaires qui assurent une production soutenue d'œufs de bonne qualité tout en préservant le capital osseux des poules. Une première approche efficace passe par l'utilisation de Ca grossier, dont la cinétique de solubilisation et d'absorption est plus lente (Hervo et al., 2024a ; Rao et al., 1990). Cette stratégie permet de mieux couvrir les besoins en Ca pour la synthèse de la coquille durant la phase nocturne, tout en améliorant la qualité de la coquille et la solidité osseuse (Fleming et al., 2006 ; Hervo et al., 2022).

Dans ce contexte, la modélisation se révèle être un outil intéressant pour concevoir et évaluer rapidement et à coût réduit différentes stratégies d'alimentation minérale. Ainsi, le modèle mécaniste de Kebreab et al. (2009) permet de simuler, sur une journée, les flux de Ca et de P chez la poule pondeuse, offrant une meilleure compréhension des phénomènes de mobilisation du Ca depuis l'os médullaire pour la synthèse de la coquille. Cependant, ce modèle ne considère pas les différences de cinétiques digestives pouvant exister entre les diverses formes de carbonate de Ca présentes dans l'alimentation (carbonate fin vs. grossier).

L'objectif de cette étude était de perfectionner le modèle de Kebreab et al. (2009) en permettant de considérer différentes formes de carbonate de Ca ainsi que l'étendre à la carrière d'un lot. A partir de ce nouveau modèle, un second objectif était de développer un prototype d'outil d'aide à la décision capable de prédire la mobilisation osseuse du Ca chez les poules pondeuses en fonction de divers choix nutritionnels (quantité, composition et horaire des repas).

2 Matériels et méthodes

2.1 Etude *in vivo* des flux de minéraux chez les poules pondeuses et reproductrices

Afin de générer les données nécessaires au paramétrage du modèle (cf. section 2.2), un essai *in vivo* en station expérimentale a été conduit (Méda et al., 2024). L'essai visait à évaluer les flux de Ca et de P chez des poules pondeuses et des reproductrices lourdes selon différentes stratégies d'apport du carbonate de Ca grossier (« semoulette »).

Quatre groupes de 12 animaux ont été utilisés dans cette étude, incluant deux type génétiques (pondeuses commerciales Isa Brown, PC) et reproductrices lourdes d'une lignée chair (Hubbard, RC)) et deux âges (jeunes vs. vieilles). Les pondeuses commerciales avaient respectivement 26 et 58 semaines d'âge, tandis que les reproductrices lourdes avaient respectivement 35 et 50 semaines d'âge. Tous les animaux étaient logés en cage individuelle.

Quatre types d'aliments expérimentaux ont été formulés pour répondre aux besoins spécifiques des animaux en fonction de leur génétique et de leur âge, en particulier pour les niveaux de Ca total et de P disponible.

Les stratégies testées incluaient une alimentation de base avec ajout de carbonate de Ca grossier distribué à différents moments de la journée. Ainsi, le Ca grossier était distribué selon trois stratégies différentes : 100% entre 7h et 14h (MAT), 100% entre 14h et 21h (APM), et une répartition égale de 50% entre 7h et 14h et 50% entre 14h et 21h (50-50). Chacune des trois stratégies alimentaires a successivement été testée sur les quatre groupes d'animaux (1 semaine d'habituation + 1 semaine de mesure). Les paramètres zootechniques mesurés étaient : la consommation individuelle par

demi-journée, le taux de ponte, le poids d'œuf, le poids et la résistance de la coquille.

Des bilans digestifs ont été réalisés sur 4 jours, pour collecter les fientes individuelles. Les teneurs en Ca et en P des fientes ainsi que des refus du matin et de l'après-midi ont été mesurées. Les quantités totales de Ca et P ingérées et excrétées ont ensuite été calculées pour chaque animal, permettant de déterminer les rétentions apparentes (Méda *et al.*, 2024).

2.2 Modéliser l'effet de stratégies alimentaires sur les flux de minéraux chez la pondeuse

Le modèle OCaLM repose sur l'intégration de trois sous-modèles (Guyot *et al.*, 2024a). Le premier, de nature mécaniste et à l'échelle de l'animal, simule les flux de Ca et de P sur une journée. Ce sous-modèle, dénommé « animal », est ensuite utilisé pour modéliser les flux tout au long de la vie d'une poule, puis pour un lot d'animaux. Pour des raisons de disponibilité des données nécessaires au paramétrage du modèle complet (notamment l'extension à l'échelle du lot), seules les pondeuses commerciales sont représentées dans le modèle.

2.2.1 Sous-modèle « animal »

Le modèle « animal » s'appuie principalement sur le modèle mécaniste de Kebreab *et al.* (2009), qui prédit les flux de Ca et de P sur 24 heures. Ce modèle modifié (Figure 1) décrit le transfert des minéraux du jabot et du gésier vers l'intestin et tient compte des vitesses de transit selon la taille des particules de carbonate de Ca. Ainsi, la principale modification apportée au modèle d'origine consiste à représenter deux formes de carbonate de Ca dans l'aliment : le Ca fin, avec une vitesse de passage rapide vers l'intestin vs le Ca grossier (« semoulette »), avec une vitesse de passage lente (Hervo *et al.*, 2024a ; Rao *et al.*,

1990). L'absorption intestinale du Ca varie selon le moment de la journée, atteignant 70% à partir de 4 heures après l'oviposition et pendant toute la formation de la coquille contre 40% les 4 premières heures post-oviposition. Le P alimentaire est ici exprimé en P total, avec un coefficient d'absorption intestinale pour prédire les flux vers le plasma et les fèces. Son absorption est constante tout au long de la journée.

Au niveau métabolique, les minéraux absorbés passent dans le plasma, qui les distribue entre les os, les œufs et l'urine. En cas de besoin élevé en Ca, la réserve osseuse peut être mobilisée (résorption), avec reconstitution après la ponte lors de la reprise alimentaire (accrétion).

Le modèle a été paramétré en utilisant les données décrites précédemment (section 2.1), qui décrivent les flux de Ca et de P chez la poule en fonction de trois stratégies d'apport de Ca grossier. L'ajustement de sept paramètres du modèle « animal » (vitesses de passage et coefficient d'absorption intestinale) a été réalisé en recherchant à minimiser l'écart entre les excrétions de Ca et de P simulées et celles observées par Méda *et al.* (2024).

2.2.2 Extension du modèle à l'échelle de la carrière de l'animal

Afin d'étendre le modèle journalier à l'ensemble de la carrière d'un animal, un modèle reproduisant la trajectoire de ponte a été développé. Ce modèle s'appuie sur des résultats de classification déterminant un profil de poules pondeuses selon l'approche proposée par Guyot *et al.* (2024b) qui prend en compte : l'heure de ponte (moyenne et écart type), le taux de ponte, et le nombre de séries (période de ponte sans interruption) par période de 5 semaines entre 21 et 71 semaines d'âge.

La méthode de classification utilisée est la méthode *k-means*, qui permet de regrouper

des éléments similaires en ensembles appelés « clusters ». Cette méthode divise les données en sous-groupes de sorte que les éléments d'un même groupe soient plus similaires entre eux qu'avec ceux des autres groupes. Chaque cluster est représenté par son centroïde, le point central du cluster.

Plus précisément, la méthode *k-means* utilisée ici est une extension multivariée adaptée aux séries temporelles, permettant de regrouper simultanément plusieurs séries temporelles (les quatre variables citées précédemment) en fonction de leur distance euclidienne. Ainsi, elle regroupe des courbes similaires pour ces quatre variables. Contrairement à l'étude de Guyot et al. (2024b) qui considérait 5 clusters, le nombre de clusters a été ici fixé à 3 (« bonnes », « intermédiaires » et « mauvaises » pondeuses) pour maintenir un nombre restreint de profils tout en considérant des tendances distinctes.

Lors d'une simulation du modèle OCalM, grâce à ces quatre variables, le modèle de carrière génère aléatoirement, entre 21 et 71 semaines d'âge, des séquences de ponte sur 5 semaines consécutives, incluant des heures de ponte se décalant dans le temps et des périodes de pause de durées variées entre chaque série.

2.2.3 Extension du modèle à l'échelle du lot d'animaux

Pour simuler les flux à l'échelle d'un lot de production sur toute la durée de vie des poules, les courbes de ponte des trois profils distincts de poules déterminés précédemment sont

utilisées. À partir de ces courbes, les proportions relatives entre ces trois groupes d'animaux sont calculées pour reconstituer un lot permettant d'atteindre le taux de ponte réel du lot, fourni par l'utilisateur en entrée du modèle.

Pour simuler les flux à l'échelle du lot sur toute la carrière, les flux pour un animal issu de chaque profil sont d'abord calculés. Ensuite, les flux pour un animal « moyen » du lot sont obtenus en calculant la moyenne pondérée des flux des trois profils, en tenant compte des proportions relatives de chaque profil au sein du lot.

2.2.4 Exemple de simulations

Cinq simulations ont été réalisées entre 21 et 71 semaines d'âge, utilisant des aliments où la proportion de carbonate de Ca grossier augmentait progressivement pour représenter 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, ou 100 % du Ca total (Guyot et al., 2024a). La courbe de ponte ajustée pour les trois profils animaux suivait celle du guide sélectionneur de la souche Novogen Brown. Trois types d'aliments successifs ont été considérés, distribués à raison de 120 g par jour et par poule, en deux repas (40 % de la ration pendant 5 heures puis 60 % pendant 9 heures), avec les teneurs en Ca et en P adaptées à l'âge des animaux :

- 21- 30 semaines : 3,50 % de Ca et 0,47 % de P
- 31-45 semaines : 3,50 % de Ca et 0,44 % de P
- 45-71 semaines : 3,75 % de Ca et 0,43 % de P

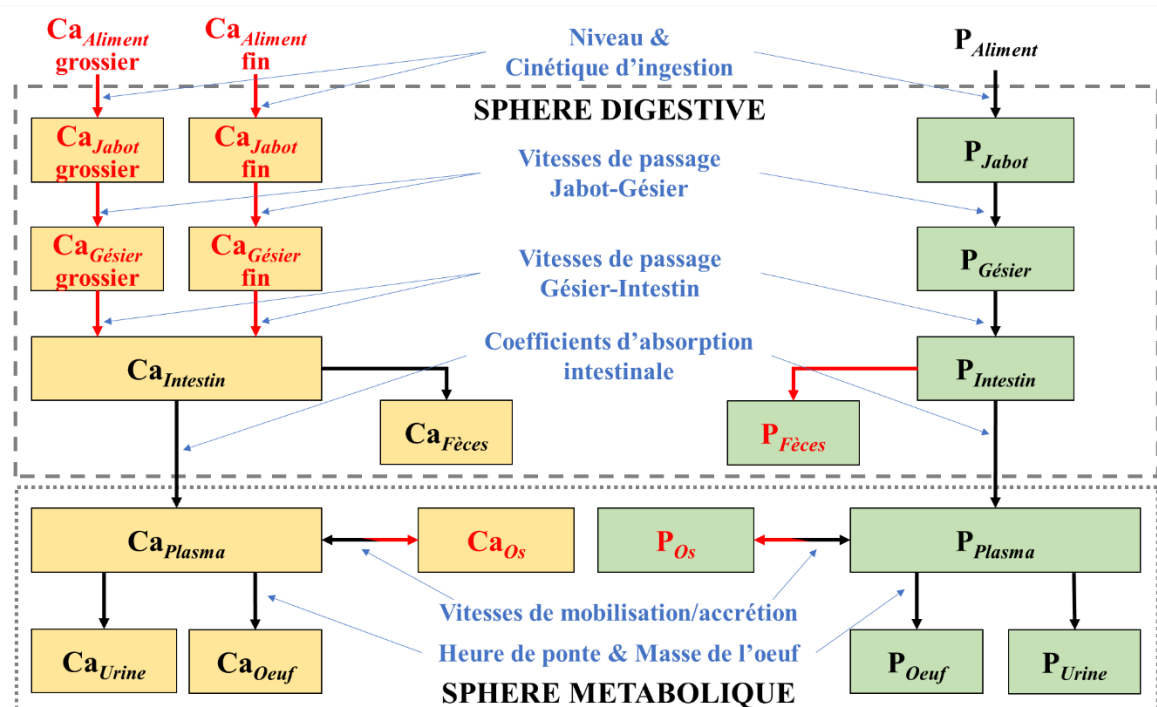


Figure 1 : Schéma conceptuel des flux de calcium (Ca) et de phosphore (P) à l'échelle de l'animal. Rouge : Modifications par rapport au modèle de Kebreab et al. (2009). Bleu : Paramètres clés régissant les flux digestifs et métaboliques (tiré de Guyot et al., 2024a)

3 Résultats et discussion

3.1 Rétention apparente du calcium et du phosphore

La rétention corporelle de Ca est fortement influencée par la génétique et la stratégie alimentaire. L'effet de cette dernière est particulièrement marqué sur la rétention de Ca chez les poules PC, qui consomment environ 30 % d'aliment en moins que les RC qui affichent un taux de ponte supérieur de 20 points (-mais avec des œufs légèrement plus légers ; Méda et al., 2024). Ainsi chez les poules PC, avec la stratégie MAT, qui consiste à fournir le Ca grossier uniquement le matin, l'ingestion de Ca est réduite de 32% environ par rapport aux stratégies APM et 50-50. Ainsi, les animaux ont dû mobiliser davantage de Ca provenant de leurs réserves osseuses pour compenser cet apport insuffisant tout en conservant un taux de ponte similaire (Figure 2). Cette mobilisation osseuse se traduit par une rétention corporelle négative de Ca (-0,29 g/j). Malgré une mobilisation osseuse supérieure, les poules PC nourries avec la stratégie MAT n'ont pas pu

compenser totalement le déficit en Ca alimentaire, et les poids relatifs de coquille étaient réduits d'environ 0,7 point (Méda et al., 2024). En revanche, les stratégies APM et 50-50, qui fournissent du Ca grossier l'après-midi ou en deux temps, ont permis une meilleure synchronisation entre apport de Ca et besoin pour le coquille, ce qui s'est traduit par une plus faible mobilisation apparente pendant la période de bilan digestifs. Pour les poules RC, les flux de Ca n'ont pas été affectés de manière significative par la stratégie alimentaire, et la majeure partie du Ca est excrétée (Figure 2), ceci est lié à une rétention corporelle et un taux de ponte faibles ainsi qu'un ingéré supérieur.

Concernant le phosphore, les poules RC ont ingéré environ 47 % de P en plus que les PC mais exportent moins de phosphore vers les œufs, excréant ainsi une plus grande partie (Figure 2 ; Méda et al., 2024). Les flux de P sont également affectés par la stratégie alimentaire : avec la stratégie APM, une plus forte proportion du P ingéré est excrété par rapport aux stratégies MAT ou 50-50 (Figure 2).

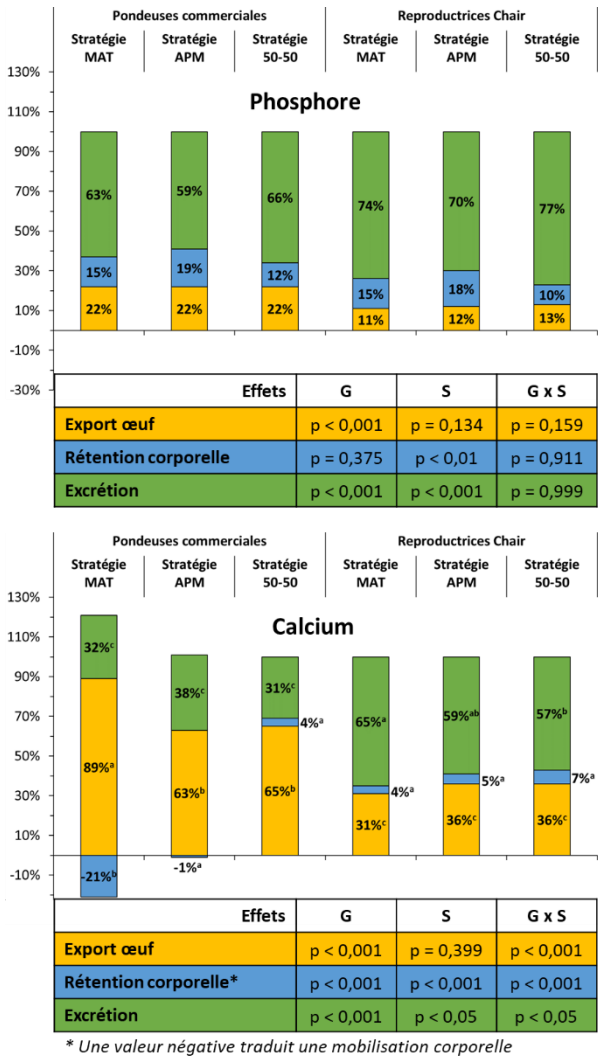


Figure 2 : Flux de phosphore et de calcium (en % du phosphore/calcium ingéré) en fonction de la génétique (G) et de la stratégie alimentaire (S) (tiré de Méda et al., 2024).

3.2 Paramétrage et validation du modèle « Animal »

À l'exception du Ca grossier entre le jabot et le gésier, les taux de passage des minéraux après ajustement sont nettement différents de ceux considérés par Kebreab et al. (2009 ; Tableau 1). En particulier, les taux de passage du P et du Ca fin, exprimés en h⁻¹, sont entre 2,6 et 4,7 fois plus élevés que ceux du modèle initial. En revanche, le taux de passage du Ca grossier du gésier vers l'intestin est 3 fois plus faible. Ces différences reflètent un temps de rétention plus court pour les particules fines de carbonate de Ca, ce qui confirme la capacité du modèle à bien représenter les différences de comportement du Ca en fonction de la taille des particules. Les valeurs optimisées sont également en accord

avec les données expérimentales de Hervo et al. (2024a), notamment pour le taux de passage du Ca grossier du gésier vers l'intestin (0,29 vs. 0,37 h⁻¹ ; Tableau 1). De plus, le coefficient d'absorption intestinale du P a été fixé à 75 %, une valeur élevée qui est cohérente avec les ratios entre P disponible et P total trouvés dans l'étude de Hervo et al. (2024a) et l'essai de Méda et al. (2024) décrit précédemment.

Tableau 1 : Comparaison des valeurs des paramètres digestifs du modèle OCaIM avec ceux du modèle de Kebreab et al. (2009) et les données in vivo d'Hervo et al. (2024a).

	MODELES		IN VIVO
	OCaIM	Kebreab et al. (2009)	Hervo et al. (2024)
Vitesse de passage jabot-gésier (h ⁻¹)			
Ca fin	2,41		2,07
Ca grossier	0,50	0,44	0,92
P	1,15		1,84
Vitesse de passage gésier-intestin (h ⁻¹)			
Ca fin	4,20		3,75
Ca grossier	0,29	0,90	0,37
P	3,78		3,33
Taux d'absorption (%)			
P	75	100	-

La validation interne, qui consiste à comparer les données observées et utilisées pour l'optimisation des paramètres avec les données prédites, est satisfaisante pour le Ca, bien qu'une surestimation de l'excrétion d'environ 30 % soit observée. En revanche, cette validation est insuffisante pour le P (Figure 3). La faible variabilité observée dans l'excrétion de P par rapport aux prédictions (0,7-2,1 g vs. 1,0-4,1 g ; Figure 3) pourrait indiquer une sous-estimation de la rétention corporelle du P, suggérant que la régulation du flux urinaire est mal représentée dans le modèle, comme le montrent les données de l'essai de Méda et al. (2024), qui indiquent une rétention de 12 à 19 % du P ingéré chez la poule pondeuse.

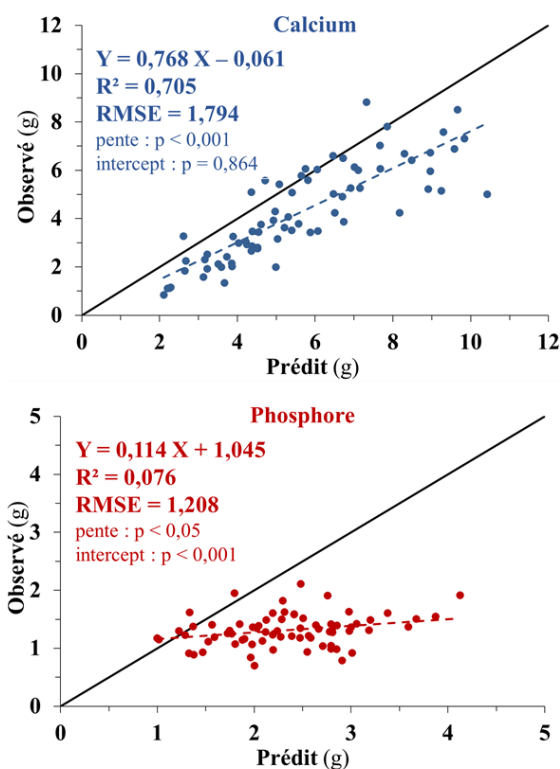


Figure 3 : Quantités excrétées de calcium et de phosphore mesurées comparées aux prédictions du sous-modèle « animal » après ajustement des sept paramètres digestifs (tiré de Guyot et al., 2024a).

3.3 Classification pour les modèles « Carrière » et « Lot »

A partir d'une courbe de ponte « sélectionneur », la réestimation de la composition du lot montre que le cluster de « bonnes » pondeuses est le groupe le plus important (environ 57 % de l'effectif total), composé d'individus avec un bon taux de ponte de 97 % jusqu'à 50 semaines d'âge, qui chute ensuite à un taux raisonnable de 85 % à 58 semaines d'âge. Ces individus montrent une bonne persistance de ponte, expliquée par une heure de ponte moyenne précoce (environ 11 heures après l'extinction de la lumière), un faible décalage de l'heure de ponte au cours de leur carrière (moins d'une heure), et un faible nombre de séries de ponte (inférieur ou égal à 2), correspondant à de longues séries de ponte (Figure 4). Le groupe des « intermédiaires », représentant environ 34 % de l'effectif total, regroupe des animaux avec un taux de ponte plus faible, passant de 94 à 76 % entre 25 et 58

semaines d'âge. Ils présentent une persistance de ponte plus faible, caractérisée par un décalage de l'heure de ponte plus important (plus de 2 heures) et une augmentation du nombre de séries (environ 5 à 58 semaines; Figure 4). Enfin le groupe des « mauvaises » pondeuses représente 9% de l'effectif total du lot et se caractérise particulièrement par son taux de ponte moyen qui, bien que relativement élevé en début de ponte (93%), s'effondre à 58 semaines d'âge pour atteindre les 30% (Figure 4).

A partir de ces 3 clusters, des profils de ponte quotidiens ont été recalculés avec le modèle pour chaque groupe d'animaux (Figure 4).

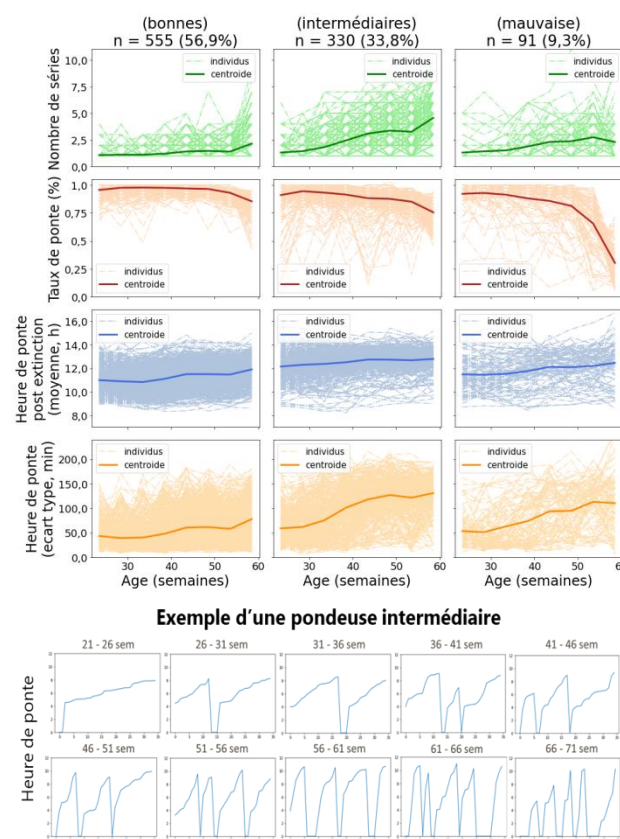


Figure 4 : Haut : Résultats de la classification multivariée à l'aide de la méthode k-means avec les individus dans chaque cluster et le centroïde correspondant. Bas : Reconstruction d'une cinétique de ponte individuelle.

3.4 Simulations

La réserve de Ca dans les os (en fin de journée) est affectée différemment selon la stratégie alimentaire pour chacun des trois profils de pondeuses simulés (Figure 5). Une stratégie alimentaire avec un apport nul (0 %) en

carbonate de Ca grossier entraîne une baisse rapide et significative de la réserve osseuse pour tous les profils. Toutefois, en fin de carrière, cette réserve se reconstitue chez les « mauvaises » pondeuses en raison de leur faible taux de ponte (moins d'export vers l'œuf). L'ajout de carbonate de Ca grossier à hauteur de 25% du Ca total limite cette baisse, mais les déficits restent importants pour les pondeuses « moyennes » et « bonnes », bien qu'un début de reconstitution du stock soit observé (Figure 5).

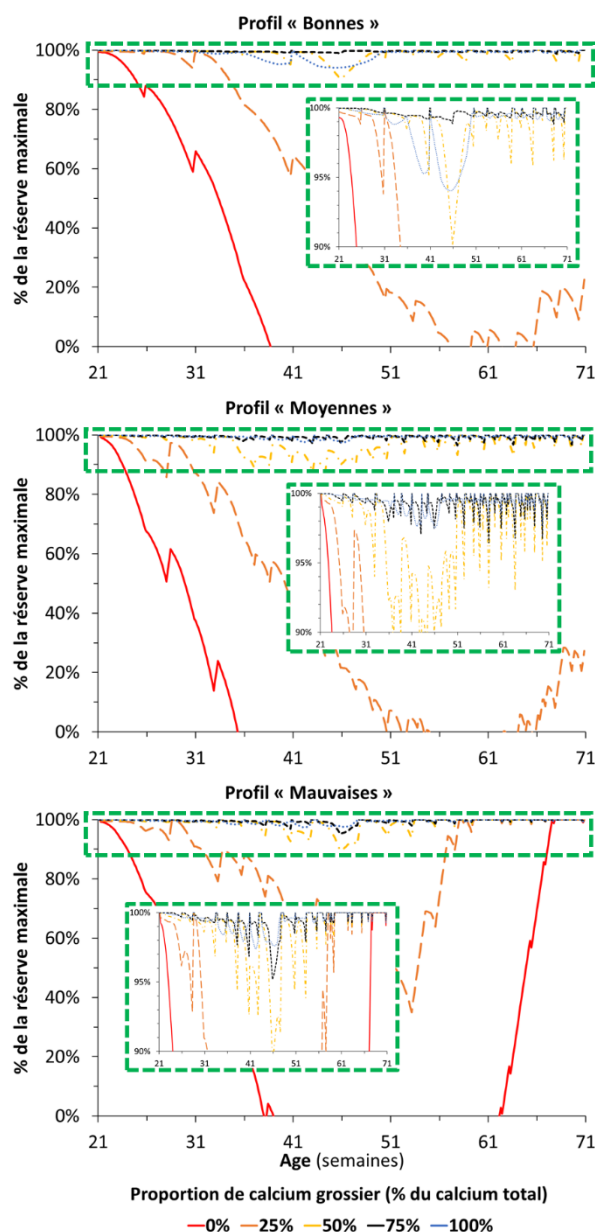


Figure 5 : Evolution de la réserve osseuse en calcium entre 21 et 71 semaines d'âge selon la proportion de calcium grossier dans l'aliment et le profil des animaux.

À partir de 50 % du Ca total apporté sous forme grossière, la réserve osseuse est beaucoup

moins sollicitée (en pourcentage de la réserve maximale). Ainsi, la réserve osseuse en Ca descend rarement sous les 90 % de la réserve maximale, et avec des stratégies apportant 75 % ou 100 % de Ca grossier, les valeurs se situent généralement entre 95 % et 100 % de la réserve maximale (Figure 5). Ces stratégies permettent de couvrir une partie des besoins en Ca grâce au Ca alimentaire, même pendant la phase nocturne, car le Ca grossier est absorbé plus lentement (Hervo et al., 2022, 2024a).

Pour les « bonnes » pondeuses, les simulations montrent que l'apport d'une partie du Ca sous forme fine (75 % de Ca grossier) permet de maintenir une réserve osseuse proche de son niveau maximal. Bien que ces pondeuses mobilisent du Ca osseux pendant la nuit, l'apport de Ca fin, rapidement utilisable après la ponte, permet de reconstituer la réserve osseuse, ce que la stratégie avec 100 % de Ca grossier ne permet pas.

3.5 Perspectives

Le modèle actuel ne prend pas en compte certaines caractéristiques alimentaires (ex. teneur en phytase) et certaines interactions entre nutriments (ex. Ca vs. P). L'intégration du modèle digestif développé par Hervo et al. (2024b) permettrait d'améliorer la prise en compte de ces facteurs, notamment l'impact de la taille des particules sur la solubilisation du Ca. Il serait également utile de considérer les variations de certains paramètres digestifs avec l'âge et l'impact de l'absorption réduite du Ca les jours sans ponte. En outre, le modèle pourrait être amélioré en modélisant séparément l'os médullaire et l'os cortical, pour mieux refléter leur mobilisation respective et les risques de fractures. Enfin, l'intégration d'une régulation de la ponte et du flux de Ca exporté vers la coquille en fonction de l'état des réserves osseuses permettrait de mieux représenter les effets à moyen/long termes de

la stratégie alimentaire sur le taux de ponte et la qualité de la coquille

4 Conclusion

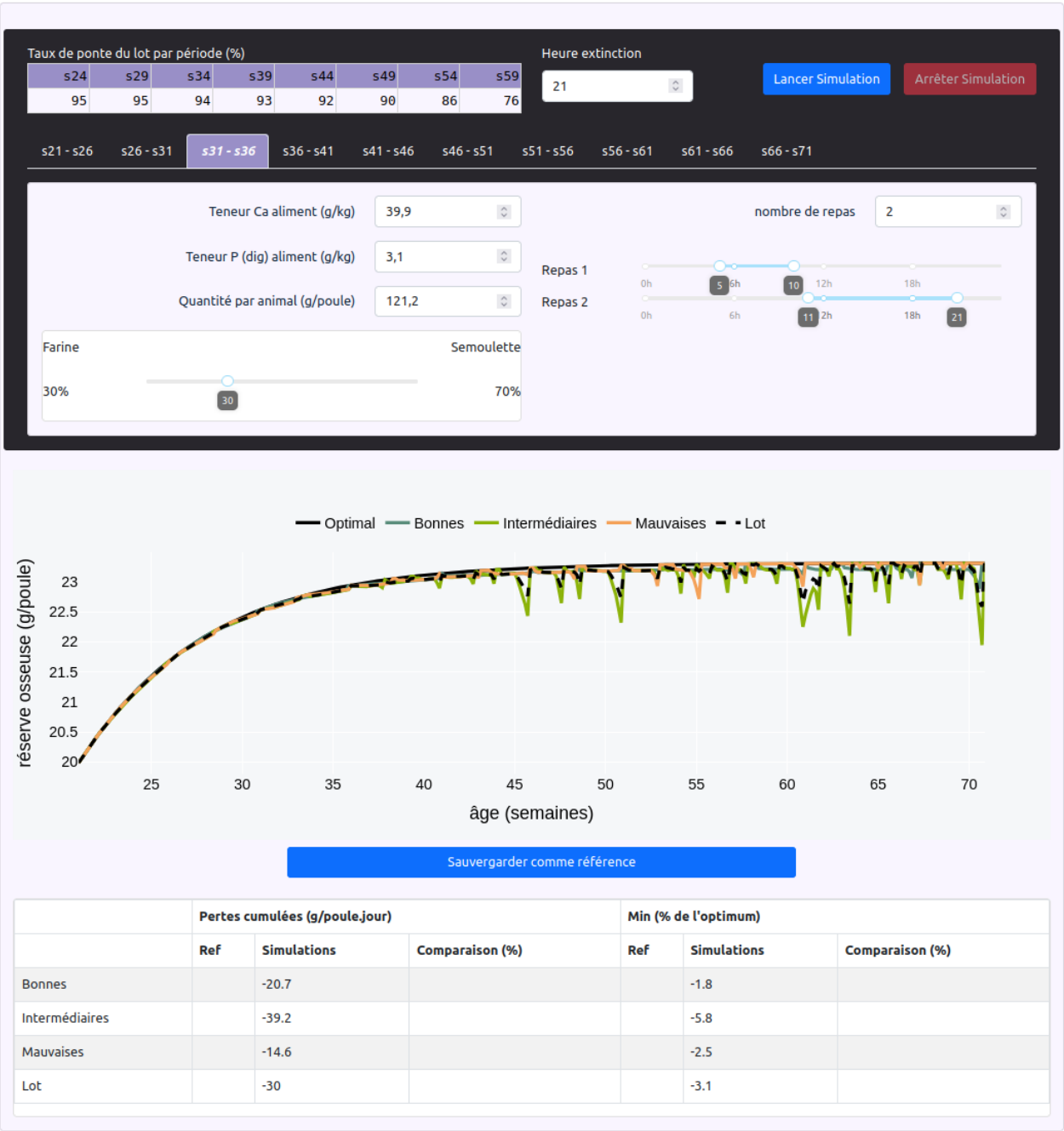
Le modèle OCaIM simule les flux de calcium chez les poules pondeuses tout au long de leur carrière, à la fois au niveau individuel et au niveau du lot. Il permet d'étudier comment le calcium ingéré est utilisé par les animaux en fonction de la stratégie d'alimentation minérale mise en place (teneurs alimentaires en minéraux, forme et cinétique d'apport du carbonate de calcium) et des performances de ponte (taux et heure de ponte). Ce modèle est donc un outil utile pour développer de nouvelles stratégies alimentaires destinées à maintenir la qualité des coquilles et l'intégrité osseuse des animaux, en particulier dans le contexte de l'allongement de la carrière des animaux. Un prototype avec une interface utilisateur (Figure 6) est disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://ocalm-1bf06f5b95c1.herokuapp.com/>. Ce calculateur peut notamment être vu comme un outil de diagnostic *a posteriori* de lots ayant rencontré des baisses de performance. En renseignant le taux de ponte et la stratégie alimentaire de ces

lots, l'utilisateur peut avoir une idée du niveau de la réserve osseuse des animaux et de la période à laquelle un défaut a eu lieu, pouvant ainsi prévoir une adaptation pour les lots suivants (nombre de repas et quantité distribuée par exemple).

5 Remerciements

Cette étude a été menée dans le cadre du projet CASDAR OCaIM (2021-2023) avec les soutiens financiers du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, du Comité National pour la Promotion de l'Œuf (CNPO) et de la société CCPA.

Les auteurs remercient chaleureusement le personnel de la station expérimentale Euronutrition pour le suivi de l'essai ainsi que la société Hubbard pour la fourniture des reproductrices « lignée chair ». Les auteurs remercient également la société Novogen pour la fourniture des données nécessaires à la réalisation du modèle ainsi que l'ensemble des partenaires du projet OCaIM pour l'expertise scientifique et technique apportées durant la durée du projet.



Références bibliographiques

- Bain, M. M., Nys, Y., & Dunn, I. C. (2016). Increasing persistency in lay and stabilising egg quality in longer laying cycles. What are the challenges? *British Poultry Science*, 57(3), 330-338.
- Duclos, M. J., Gloux, A., Narcy, A., & Quentin, M. (2022). La santé osseuse en fin de carrière des poules: un défi pour les nutritionnistes. 14^{èmes} JRA-PFG, 330-338.
- Fleming, R. H., McCormack, H. A., McTeir, L., & Whitehead, C. C. (2006). Relationships between genetic, environmental and nutritional factors influencing osteoporosis in laying hens. *British Poultry Science*, 47(6), 742-755.
- Guyot, Y., Pampouille, E., Burlot, T., Duclos, M., Guerini, C., Quentin, M., Narcy, A., & Méda, B. (2024a). OCaM : Un modèle pour étudier l'effet de stratégies alimentaires sur les flux de minéraux chez la poule pondeuse. 15^{èmes} JRA-PFG, 291-295.
- Guyot, Y., Burlot, T., Quentin, M., Méda, B., & Pampouille, E. (2024b). Vers une meilleure compréhension de la variabilité entre pondeuses : Classification selon les trajectoires de ponte. 15^{èmes} JRA-PFG, 513-517.
- Hervo, F., Narcy, A., Nys, Y., & Létourneau-Montminy, M.-P. (2022). Effect of limestone particle size on performance, eggshell quality, bone strength, and in vitro/in vivo solubility in laying hens: a meta-analysis approach. *Poultry Science*, 101(4), 101686.
- Hervo, F., Létourneau-Montminy, M.-P., Méda, B., & Narcy, A., (2024a). Effect of limestone particle size and microbial phytase on phosphorus and calcium digestion kinetics along the gastrointestinal tract in laying hens. *British Poultry Science*, sous presse.
- Hervo F., Méda B., Narcy A., & Létourneau-Montminy M.-P. (2024b). Modélisation de l'utilisation digestive du calcium et du phosphore chez la poule pondeuse, 15^{èmes} JRA-PFG, 286-290.
- Kebreab, E., France, J., Kwakkel, R. P., Leeson, S., Darmani K. H., & Dijkstra J. (2009). Development and evaluation of a dynamic model of calcium and phosphorus flows in layers. *Poultry Science*, 88(3), 680-689.
- Méda, B., Mireaux, M., Chevé, B., Duclos, M. J., Gambier, E., Guerini, C., Pampouille, E., Quentin, M., Souchet, C., Narcy, A., & Guyot, Y. (2024). Flux de minéraux chez les poules pondeuses et les reproductrices lourdes selon trois stratégies d'apport du carbonate de calcium. 15^{èmes} JRA-PFG, 727-731.
- Nys, Y., Hincke, M. T., Hernandez-Hernandez, A., Rodriguez-Navarro, A. B., Gomez-Morales, J., Jonchère, V., Garcia-Ruiz, J. M., & Gautron, J. (2010). Structure, propriétés et minéralisation de la coquille de l'œuf: rôle de la matrice organique dans le contrôle de sa fabrication. *INRAE Productions Animales*, 23(2), 143-154.
- Rao, K. S., & Roland Sr, D. A. (1990). In vivo limestone solubilization in commercial Leghorns: role of dietary calcium level, limestone particle size, in vitro limestone solubility rate, and the calcium status of the hen. *Poultry Science*, 69(12), 2170-2176.
- Whitehead, C. C. (2004). Overview of bone biology in the egg-laying hen. *Poultry Science*, 83(2), 193-199.
- Whitehead, C. C., & Fleming, R. H. (2000). Osteoporosis in cage layers. *Poultry science*, 79(7), 1033-1041.

OCaM : Optimization of Daily Calcium Intake through Modeling

Eggshell formation is a complex physiological process that requires a daily match between dietary calcium intake and animals requirements. With the extension of hens productive period, managing mineral nutrition is essential to adjust calcium intake, limit bone mobilization, and maintain eggshell quality. As part of the CAS DAR OCaM project (2021-2023), this study aimed to develop a model capable of predicting bone calcium mobilization in laying hens based on the feeding strategy (quantity, composition, and timing of meals) and laying kinetics (laying time points). The developed model first simulates, on a daily scale for an average animal, the digestive fate of dietary calcium, considering two forms of calcium (fine vs. coarse). Once absorbed, the minerals are used for egg production, and in case of deficiency, they can be mobilized from bone reserves. Subsequently, "career" and "batch" modules extend the simulations over the entire career of a batch of animals from 21 to 71 weeks of age, considering three animal profiles (classified as "good," "intermediate," and "poor" layers). This innovative decision-support tool could help nutritionists to identify the best feeding strategies to optimally preserve the animals bone capital. A prototype of the tool has also been developed and is available online.