

FLUX DE MINERAUX CHEZ LES POULES PONDEUSES ET REPRODUCTRICES LOURDES SELON TROIS STRATEGIES D'APPORT DU CARBONATE DE CALCIUM

**Méda Bertrand¹, Mireaux Mélanie², Chevé Bruno³, Duclos Michel J.¹,
Gambier Eric¹, Guerini Céline⁴, Pampouille Eva⁵, Quentin Maxime⁵,
Souchet Christophe⁴, Narcy Agnès¹, Guyot Yann⁵**

¹INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly

²Deltavit – Groupe CCPA, 35150 Janzé

³Euronutrition, 72240 Saint-Symphorien

⁴CCPA, 35150 Janzé

⁵Institut Technique de l'Aviculture, 37380 Nouzilly

bertrand.meda@inrae.fr

RÉSUMÉ

La formation de la coquille d'œuf est un phénomène complexe impliquant d'assurer quotidiennement l'adéquation entre les apports de calcium et les besoins de l'animal. Cette étude visait à évaluer les flux de calcium (Ca) et de phosphore (P) chez la poule pour deux génétiques (G) selon trois stratégies (S) d'apport du carbonate de calcium particulaire (CaPart). Afin de réaliser des bilans digestifs, 24 pondeuses « commerciales » (PC ; âgées de 26 ou 58 semaines) ainsi que 24 reproductrices lignée « chair » (RC ; âgées de 35 ou 50 semaines) ont été placées dans 48 cages individuelles (12 cages par âge et par génétique). Les trois stratégies ont successivement été testées (1 semaine d'adaptation + 4 jours de bilan par stratégie) : 100% du CaPart disponible entre 7 et 14h (MAT) vs. 100% entre 14 et 21h (APM) vs. 50% entre 7h et 14h puis 50% entre 14 et 21h (50-50). Les niveaux en Ca total de la ration étaient ajustés pour chaque génétique et âge. Malgré un ingéré minéral supérieur pour les trois stratégies chez les RC ($P<0,001$), les flux exportés dans les œufs étaient plus élevés chez les PC ($P<0,001$) en raison d'un taux de ponte supérieur. Ceci a conduit à une excrétion supérieure de P et Ca chez les RC dans les trois stratégies ($P<0,001$). Pour la rétention corporelle de Ca (en % du Ca ingéré), une interaction G x S a été observée ($P<0,001$). En effet, un flux négatif a été observé uniquement chez les PC avec la stratégie MAT ($P<0,001$), traduisant une mobilisation osseuse de Ca pour assurer la formation de la coquille. Ces données serviront à la validation d'un modèle de prédiction du devenir des minéraux chez la poule, dans une perspective d'amélioration des stratégies nutritionnelles visant à préserver son capital osseux.

ABSTRACT

Mineral fluxes in laying and heavy breeder hens according to three calcium carbonate supply strategies

Eggshell formation is a complex phenomenon requiring the daily adjustment of calcium intake with requirements. The aim of this study was to evaluate calcium (Ca) and phosphorus (P) fluxes in hens for two genetics (G) according to three feeding strategies (S) differing in the time for particulate calcium carbonate (CaPart) supply. Twenty-four commercial layers (LH; 26 or 58 weeks of age) and 24 heavy breeder hens (HB; 35 or 50 weeks of age) were housed in 48 individual cages for the assessment of apparent body retention (12 cages per age and per genetics). The three strategies were successively tested (1 week of adaptation + 4 days of faeces collection for each strategy): 100% of CaPart available between 7 and 14h (MOR) vs. 100% between 14 and 21h (AFT) vs. 50% between 7h and 14h then 50% between 14 and 21h (50-50). Total dietary Ca levels were adjusted for each genetics and age. Despite a higher mineral intake in HB ($P<0.001$), exported fluxes to eggs were higher in LH ($P<0.001$) due to a higher laying rate. This led to a higher P and Ca excretion in HB in all three strategies ($P<0.001$). For calcium body retention (in % of Ca intake), a significant G x S interaction was observed ($P<0.001$). Indeed, a negative flux was only observed for LH fed with the MOR strategy ($P<0.001$), reflecting the mobilization of Ca from bone, in relation with eggshell formation. These data will be used to validate a model predicting the fate of Ca and P in laying hens, aiming at the evaluation of nutritional strategies designed to preserve their bone capital.

INTRODUCTION

L'allongement de la durée de production des poules pondeuses est un enjeu fort de durabilité pour la filière ponte et un véritable challenge pour les éleveurs (Bain *et al.*, 2016). Pour préserver au maximum le capital osseux des animaux et maintenir une bonne qualité de la coquille au cours de leur carrière, les apports alimentaires de calcium doivent donc être synchronisés au mieux avec les besoins, notamment pour la formation quotidienne de la coquille (Nys *et al.*, 2010).

Ainsi, l'utilisation de calcium particulaire ayant une cinétique de solubilisation (et donc d'absorption) plus lente (Hervo *et al.*, 2024a ; Rao *et al.*, 1990) permet de mieux couvrir les besoins pour la synthèse de la coquille, en particulier durant la phase nocturne où les animaux ne mangent pas, tout en permettant d'améliorer 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 pertinent pour concevoir et évaluer *in silico* des stratégies d'alimentation minérale sur différentes variables de réponse des animaux (*e.g.* digestibilité des minéraux : Hervo *et al.*, 2024b ; rejets de phosphore : Kebreab *et al.*, 2009). En particulier, le modèle de Guyot *et al.* (2024) propose une démarche permettant d'étudier les flux de phosphore et de calcium à la fois aux niveaux digestif et métabolique (os, œuf) tout au long de la carrière des animaux.

L'objectif de cette étude était donc d'étudier *in vivo* les flux de calcium (Ca) et de phosphore (P) pour deux types d'animaux différents (pondeuses vs. reproductrices « chair ») selon plusieurs stratégies alimentaires d'apport du calcium particulaire, afin de générer des données pour le paramétrage et/ou la validation du modèle de Guyot *et al.* (2024).

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Animaux

Quatre lots de 12 animaux ont été utilisés pour cet essai, en considérant deux types génétiques (Pondeuses commerciales souche Isa Brown ; PC vs. Reproductrices lourdes « lignée chair » Hubbard ; RC) et deux âges (« jeunes » vs. « vieilles »). Les PC étaient âgées respectivement de 26 et 58 semaines (poids vif moyen : 1763 vs. 1907 g) et les RC respectivement de 35 et 50 semaines (poids vif moyen : 4265 vs. 4499 g).

Les animaux étaient tous hébergés dans le même bâtiment en cages individuelles permettant la collecte individuelle des fientes. Le programme lumineux était constitué d'une phase diurne de 14h (7h-21h) et d'une phase nocturne de 10h (21h-7h). Les animaux avaient un accès *ad libitum* à l'eau de boisson.

1.2. Aliments et stratégies alimentaires

Quatre aliments expérimentaux ont été formulés pour tenir compte des besoins des animaux, en fonction de leur génétique (PC vs. RC) et de leur âge (« jeunes »

vs. « vieilles » ; Tableau 1). La teneur en Ca des aliments de « base » (*i.e.* sans ajout de carbonate de Ca particulaire en semoulette) était d'environ 1,1%. Les teneurs des rations complètes étaient comprises entre 3 et 4% (valeurs formulées ; Tableau 1).

Les aliments ont été distribués aux animaux suivant trois stratégies de distribution de la semoulette : 100% entre 7h et 14h (MAT) vs. 100% entre 14h et 21h (APM) vs. 50% entre 7h et 14h puis 50% entre 14h et 21h (50-50). Les aliments de « base » étaient distribués sous forme de farine en deux repas pour les PC ou en un (stratégies MAT et APM) ou deux repas (stratégie 50-50) pour les RC. Les stratégies alimentaires ont successivement été testées avec, à chaque fois, 7 jours d'adaptation suivi de 4 jours de bilan digestif. Les quantités distribuées par jour aux animaux sont données dans le Tableau 1.

1.3. Mesures et analyses chimiques

Le taux de ponte et la masse d'œuf par animal ont été mesurés pour chaque stratégie alimentaire. Pour les œufs pondus pendant chaque phase de bilan digestif, le poids de coquille et sa résistance (mesure de la force à la rupture à l'aide d'un DET6000, NABEL, Co Ltd., Japon) ont également été mesurés.

Lors des phases de bilan digestif, après un jeûne en début/fin de collecte, les fientes individuelles de chaque animal ont été intégralement collectées et pesées. Elles ont ensuite été lyophilisées/broyées puis leurs teneurs en P et Ca ont été mesurées. Durant cette même phase, les refus du matin (7h-14h) et de l'après-midi (14h-21h) ont été collectés et pesés chaque jour puis leurs teneurs en P et Ca ont été mesurées.

1.4. Bilan de rétention apparente

Les quantités totales de P et Ca ingérées et excrétées ($X_{\text{ingestion}}$ et X_{fientes}) ont été calculées pour chaque animal, puis les rétentions apparentes ($X_{\text{rétention}}$) ont été calculées selon la formule suivante :

$$X_{\text{rétention}} = X_{\text{ingestion}} - (X_{\text{œuf}} + X_{\text{fientes}})$$

où $X_{\text{œuf}}$ désigne la quantité de P ou Ca exportée dans les œufs (en considérant les masses et teneurs en P et Ca dans la coquille, le blanc et le jaune proposées par Kebreab *et al.* (2009).

1.5. Analyses statistiques

Les effets de la génétique et de la stratégie alimentaire, ainsi que leur interaction, ont été testés à l'aide d'une analyse de variance réalisée avec le logiciel R. Lorsqu'un effet était significatif, les moyennes ont été comparées deux à deux à l'aide d'un test *post-hoc*. Compte-tenu des effectifs (12 animaux par âge par génétique), l'effet de l'âge n'a pas été testé dans cette étude.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Performances et qualité des œufs

Un effet significatif de la génétique sur la consommation journalière, le taux de ponte et le poids d'œuf a été observé (Tableau 2). Ces résultats étaient

attendus compte-tenu des deux génétiques utilisées dans l'essai. Ainsi, malgré une consommation journalière plus faible (de l'ordre de -30%), les PC avaient un taux de ponte plus élevé (+20 points), mais avec des œufs plus légers (-3,1 g soit -5%). Par ailleurs, un effet de la stratégie a été observé, avec une consommation significativement plus élevée pour la stratégie APM (Tableau 2).

En revanche, pour le poids de coquille (en g ou en % du poids d'œuf), une interaction significative entre la génétique et la stratégie alimentaire a été observée. En effet, le poids de coquille chez les PC était ainsi significativement plus faible pour la stratégie MAT comparativement aux stratégies APM et 50-50, tandis que le poids de coquille était similaire dans les trois stratégies pour les RC (Figure 1). Ce résultat peut s'expliquer par un ingéré calcique significativement plus faible pour les PC avec cette stratégie (Figure 2), qui correspond à un apport de l'intégralité du Ca particulière le matin, quand les besoins en Ca sont réduits (*i.e.* pas de synthèse de coquille). Enfin, les différences de poids relatif de coquille (*i.e.* en % du poids d'œuf) entre génétiques et stratégies alimentaires peuvent expliquer, en accord avec Sirri *et al.* (2018), les effets observés pour la résistance de la coquille (Tableau 2), avec des coquilles plus résistantes pour les stratégies APM et 50-50 (+12 et +8%) et chez les PC (+33%).

2.2. Bilan de rétention apparente du calcium

Une interaction entre génétique et stratégie alimentaire a été observée pour l'ingestion journalière de calcium (g/j ; Figure 2). Ainsi, pour les PC, un ingéré calcique significativement plus faible avec la stratégie MAT a été observé par rapport aux stratégies APM et 50-50 (-30% environ ; $P < 0,001$). Ce résultat est cohérent avec la littérature, puisque cette stratégie correspondait à un apport élevé de calcium après l'allumage et la ponte, à un moment où les besoins sont réduits puisque la coquille n'est pas en cours de formation (Nys *et al.*, 2010). De même, une interaction a été observée pour le Ca excrété, avec une réduction de l'excrétion du Ca chez les PC avec la stratégie MAT ($P < 0,001$; Figure 2), probablement en raison du taux de ponte élevé maintenu malgré l'ingéré calcique plus faible.

Enfin, concernant la rétention corporelle du Ca, une mobilisation (depuis l'os) a été observée chez les PC avec la stratégie MAT (*i.e.* rétention corporelle négative ; -0,29 g/j). Même si l'interaction entre la génétique et la stratégie alimentaire n'est pas significative en considérant le flux absolu (*i.e.* en g/j ; Tableau 3), cette interaction est significative, lorsque les flux de Ca sont exprimés relativement à l'ingéré calcique (-21% pour les PC avec la stratégie MAT ; $P < 0,001$; Figure 3). Ce résultat confirme qu'un apport du Ca particulière le matin a contraint les animaux à puiser dans leur stock de calcium osseux (à partir de l'os médullaire) pour continuer à exporter du Ca dans la coquille, en accord avec la littérature (Whitehead, 2004). A l'inverse, lorsque du Ca

particulière a été offert aux PC l'après-midi et le soir (stratégies APM et 50-50, entre 14h et 21h), aucune mobilisation osseuse n'a été observée, et le flux de Ca vers l'œuf représentait environ 64% de l'ingéré (Figure 3). Enfin, les flux de Ca chez les RC n'ont pas été affectés par la stratégie alimentaire, et une large partie du calcium a été excrété (57-65% ; Figure 3), en lien avec une rétention corporelle et un taux de ponte faibles ainsi qu'un ingéré supérieur (Tableau 2).

2.3. Bilan de rétention apparente du phosphore

Pour les flux quotidiens de P (en mg/j), seuls des effets simples de la génétique et de la stratégie alimentaire ont été observés (Tableau 3). Ainsi, l'ingéré était supérieur chez les RC (+47%), mais avec un flux exporté vers l'œuf moindre (-17%). En conséquence, les animaux ont excrété davantage de P comparativement aux PC (+73%). Ces résultats étaient attendus puisque les RC sont des animaux plus lourds, consommant plus d'aliment mais avec un taux de ponte inférieur de 20 points environ (Tableau 2). Par ailleurs, la stratégie alimentaire a eu un effet significatif sur les flux d'ingestion et de rétention corporelle de P avec des flux supérieurs avec la stratégie APM par rapport à la stratégie 50-50 ($P < 0,001$; Tableau 3). Les mêmes conclusions sont possibles avec les données exprimées relativement à l'ingéré, avec la majorité du P ingéré qui est excrété avec la stratégie 50-50 (66 % pour les PC et 77 % pour les RC vs. 59 et 70 % avec la stratégie APM ; Figure 3).

CONCLUSION

Cette étude confirme l'importance d'une bonne adéquation des formes et de la cinétique d'apport de carbonate de calcium avec les besoins de la poule pondeuse, en particulier lors de la phase de formation de la coquille. Sur le terrain, cette adéquation est essentielle pour limiter la mobilisation corporelle, et préserver leur « capital osseux » sur le long terme. Ainsi, l'utilisation de carbonate de calcium grossier permet de couvrir une partie des besoins de la poule durant la phase nocturne, grâce à une solubilisation et une absorption plus lente au niveau digestif. Ainsi, la disponibilité de ce carbonate grossier durant l'après-midi permet de limiter la mobilisation osseuse de Ca. Les données collectées dans cette étude seront donc précieuses pour développer des modèles d'évaluation de stratégies d'alimentation minérale chez la poule, comme par exemple celui de Guyot *et al.* (2024).

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (projet CASDAR OCALM ; 2022-2023). Les auteurs remercient chaleureusement Olivier Marçais (Euronutrition) pour le suivi de l'essai ainsi que la société Hubbard pour la fourniture des reproductrices « lignée chair » élevées dans le cadre de cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bain M. M., Nys Y., Dunn I.C., 2016. Brit. Poultry Sci., (57), 330-338.
 Fleming R.H., McCormack H.A., McTeir L., Whitehead C.C., 2006. Brit. Poult. Sci., (47), 742-755.
 Guyot Y., Pampouille E., Burlot T., Duclos M.J., Guerini C., Quentin M., Narcy A., Méda B., 2024. 15^{èmes} JRA-PFG, *sous presse*.
 Hervo F., Narcy A., Nys Y., Létourneau-Montminy M.-P., 2022. Poult. Sci., (101), 101686.
 Hervo F., Méda B., Létourneau-Montminy M.-P., Narcy A., 2024a. 15^{èmes} JRA-PFG, *sous presse*.
 Hervo F., Méda B., Létourneau-Montminy M.-P., Narcy A., 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.
 Nys Y., Hincke M.T., Hernandez-Hernandez A., Rodriguez-Navarro A.B., Gomez-Morales J., Jonchère V., Garcia-Ruiz J.M., Gautron J., 2010. INRAE Prod. Anim., (23), 143-154.
 Rao K.S., Roland Sr D.A., 1990. Poult. Sci., (69), 2170-2176.
 Sirri F., Zampiga M., Beradinelli A., Meluzzi A., 2018. Poult. Sci., (97), 1818-1823.
 Whitehead C.C., 2004. Poult. Sci., (83), 193-199.

Tableau 1. Quantité journalière d'aliment distribuée, composition et valeurs nutritionnelles des aliments.

	Génétique Âge (semaines)	Poules commerciales		Reproductrices « chair »	
		26	58	35	50
Quantité quotidienne d'aliment distribuée (g/j)		151	152	175	170
Matières premières (%)	Blé tendre	33,48	34,44	24,05	27,01
	Maïs	20,00	20,00	40,16	40,58
	Tourteau de soja	15,90	12,00	9,30	8,40
	Son de blé	10,00	11,00	10,00	7,00
	Tourteau de tournesol	4,00	5,60	6,20	6,00
	Drèches de maïs	5,00	5,00	0,00	0,00
	Huile de soja	1,20	1,00	1,50	1,20
	Minéraux (hors carbonate de calcium particulaire)	1,14	1,03	1,28	1,38
	Carbonate de calcium particulaire (<i>semoulette</i>)	7,05	7,65	5,15	6,08
	Autres (acides aminés, premix, etc.)	2,23	2,28	2,36	2,35
Valeurs nutritionnelles (%)	Energie métabolisable (kcal/kg)	2738	2700	2851	2848
	Protéines brutes / Matières grasses	16,7 / 3,5	15,7 / 3,3	13,5 / 3,7	12,9 / 3,3
	Lysine / Méthionine+Cystéine digestibles	0,70 / 0,64	0,65 / 0,58	0,55 / 0,60	0,53 / 0,57
	Calcium total ration	3,82 (3,36*)	4,02 (3,63*)	3,03 (2,63*)	3,42 (3,08*)
	Phosphore disponible / Phosphore total	0,35 / 0,48*	0,32 / 0,45*	0,40 / 0,51*	0,37 / 0,49*

* Valeurs analysées

Tableau 2. Effets simples de la génétique et de la stratégie alimentaire sur les performances et la qualité d'œufs.

	Génétique			Stratégie alimentaire			
	PC	RC	p-value	MAT	APM	50-50	p-value
Consommation journalière (g/j)	110,8 ^b	157,6 ^a	p < 0,001	131,2 ^b	137,5 ^a	133,0 ^b	p < 0,001
Taux de ponte (%)	95,0 ^a	75,0 ^b	p < 0,001	87,4	85,7	82,0	p = 0,248
Poids d'œuf (g)	61,2 ^b	64,3 ^a	p < 0,05	62,5	63,5	62,2	p = 0,648
Poids de coquille (g) ¹	5,7 ^a	5,6 ^b	p < 0,001	5,4 ^b	5,8 ^a	5,7 ^a	p < 0,001
Poids de coquille (% poids d'œuf) ¹	9,4 ^a	8,6 ^b	p < 0,001	8,8 ^b	9,3 ^a	9,1 ^a	p < 0,001
Résistance de la coquille (N)	40,0 ^a	30,1 ^b	p < 0,001	33,7 ^b	37,8 ^a	36,3 ^{ab}	p < 0,01

¹Interaction significative (cf. Figure 1). PC : Pondeuses commerciales ; RC : Reproductrices « chair ».

Tableau 3. Effets simples de la génétique et de la stratégie alimentaire sur les flux de phosphore et de calcium (P, mg/j ; Ca, g/j).

	Génétique			Stratégie alimentaire			
	PC	RC	p-value	MAT	APM	50-50	p-value
P ingéré	521 ^b	767 ^a	p < 0,001	635 ^{ab}	658 ^a	634 ^b	p < 0,05
P exporté dans l'œuf	112 ^a	93 ^b	p < 0,001	97	107	105	p = 0,066
P retenu	81	108	p = 0,058	95 ^{ab}	122 ^a	66 ^b	p < 0,01
P excrété	328 ^b	566 ^a	p < 0,001	444	430	462	p = 0,123
Ca ingéré ¹	3,04 ^b	4,48 ^b	p < 0,001	3,38 ^b	4,04 ^a	3,84 ^a	p < 0,001
Ca exporté dans l'œuf	2,00 ^a	1,54 ^b	p < 0,001	1,60 ^b	1,90 ^a	1,83 ^a	p < 0,01
Ca retenu ²	-0,03 ^b	0,23 ^a	p < 0,001	-0,05 ^b	0,12 ^{ab}	0,23 ^a	p < 0,05
Ca excrété ¹	1,06 ^b	2,72 ^a	p < 0,001	1,83 ^{ab}	2,03 ^a	1,78 ^b	p < 0,05

*Interaction significative (cf. Figure 2). ²Une valeur négative traduit une mobilisation corporelle.

PC : Pondeuses commerciales ; RC : Reproductrices « chair ».

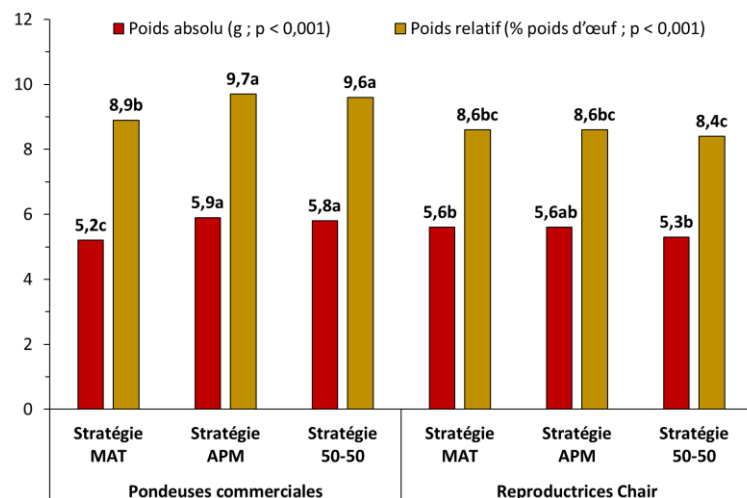


Figure 1. Effet de l'interaction génétique × stratégie alimentaire sur le poids de coquille.

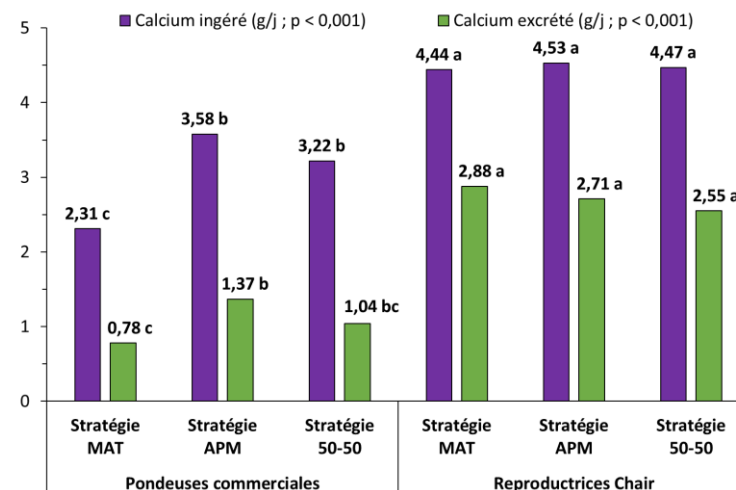
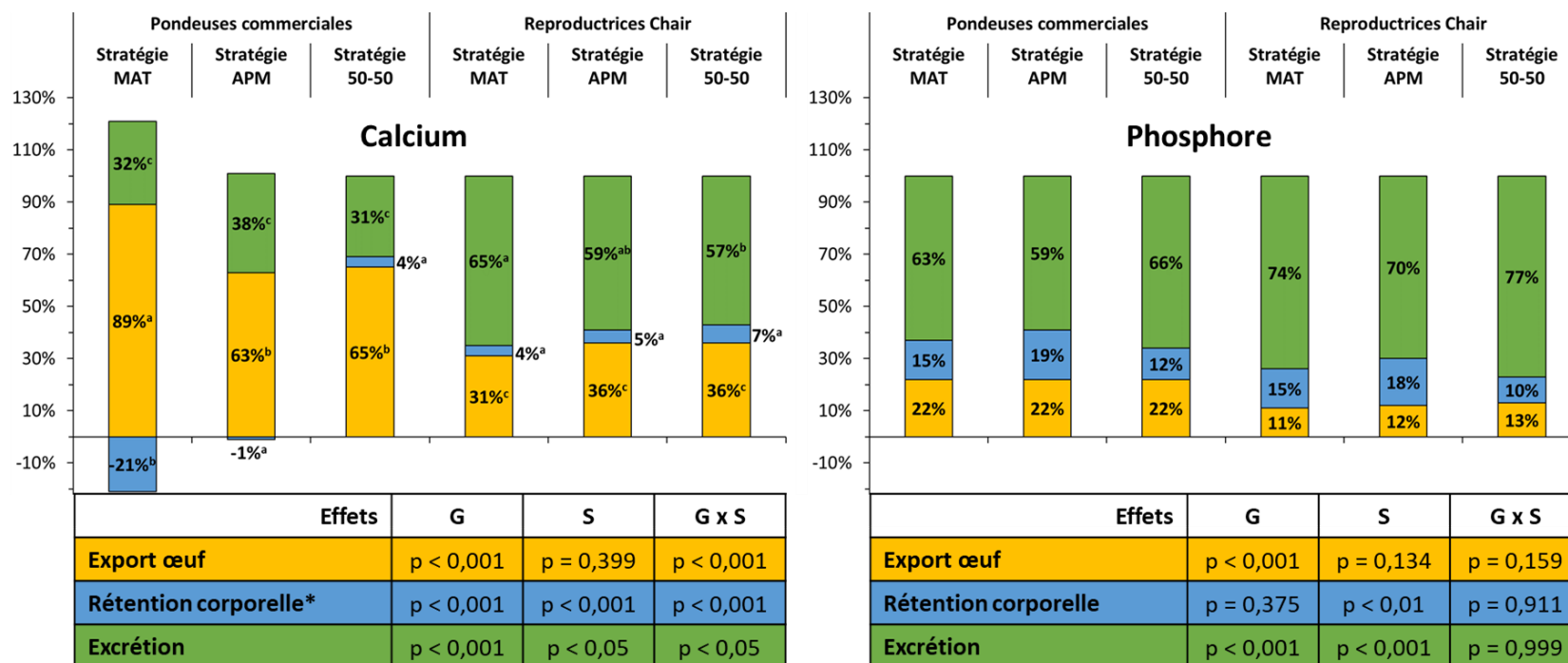


Figure 2. Effets de l'interaction génétique × stratégie alimentaire sur le calcium ingéré et excrété.



* Une valeur négative traduit une mobilisation corporelle

Figure 3. Flux de calcium et de phosphore relatifs (en % du calcium/phosphore ingéré) en fonction de la génétique (G) et de la stratégie alimentaire (S).