

EFFET DU CALCIUM PARTICULAIRE ET DE L'ÂGE SUR LA QUALITÉ DE LA COUILLE DE L'ŒUF ET LA MINÉRALISATION OSSEUSE CHEZ LA POULE PONDEUSE : APPROCHE PAR META-ANALYSE

Hervo Fabien^{1,2}, Narcy Agnès², Létourneau-Montminy Marie-Pierre¹

¹UNIVERSITÉ LAVAL - Département des sciences animales, 2425 rue de l'Agriculture, G1V 0A6, QUÉBEC, Canada,

² UMR BOA – INRA - Université de Tours, BOA, 37380, NOUZILLY, France
fabien.hervo@inrae.fr

RÉSUMÉ

Chez la poule pondeuse, l'export massif de calcium (Ca) pour la formation de la coquille en période nocturne entraîne une mobilisation importante du Ca osseux induisant une fragilisation du squelette. L'utilisation de Ca particulaire (*i.e.* > 0,8 mm) est une pratique courante en élevage permettant d'éviter en partie que la poule ne puise dans ses réserves osseuses. De nombreuses études traitent de l'effet du Ca particulaire sur la qualité de la coquille et la minéralisation osseuse, mais une grande variabilité de réponse est observée, indiquant la nécessité de quantifier les effets du Ca particulaire sur différents paramètres d'intérêt et d'identifier les facteurs de modulation. Une méta-analyse incluant cinquante-cinq études représentant 192 expérimentations a été réalisée. Quatre catégories de variables réponses ont été étudiées : la solubilité du Ca dans la sphère digestive, les performances de production, la qualité de la coquille et la minéralisation osseuse. Pour chaque variable, les facteurs taille de particules, âge et leur interaction ont été testés. L'analyse montre que la solubilité *in vitro* baisse linéairement avec la taille des particules ($P < 0,001$; $R^2 = 0,91$) tandis que la solubilité *in vivo* augmente linéairement ($P < 0,001$; $R^2 = 0,91$). En étant retenu plus longtemps dans le gésier, le Ca particulaire ($P < 0,001$; $R^2 = 0,60$) est mieux dissout assurant ainsi une diffusion prolongée de Ca soluble au cours de la nuit. L'incorporation de Ca particulaire ne montre pas d'effet sur les performances de production, mais augmente les paramètres de qualité de coquille ; des particules de 1,5 mm améliorent la gravité spécifique de 0,8%, l'épaisseur de coquille de 1,1% et la force de fracture de la coquille de 3% par rapport à des particules de 0,15 mm. Enfin, l'incorporation de Ca particulaire augmente la force de fracture du tibia et de façon plus marquée avec l'âge ($P < 0,001$; $R^2 = 0,89$). Cette étude a permis de quantifier l'effet du Ca particulaire sur les paramètres de qualité de coquille et de minéralisation osseuse en fonction de l'âge des oiseaux. Ces résultats sont particulièrement utiles dans une perspective de modélisation de l'utilisation de Ca chez la poule pondeuse.

ABSTRACT

Effect of limestone particle size on performance, eggshell quality, bone mineralization, and *in vitro/in vivo* solubility in laying hens: a meta-analysis approach

Numerous publications over the five last decades have investigated the effect of limestone particle size (LmPS) on production performance, bone mineralization, and limestone solubilization in laying hens. Coarse limestone particles have been shown to improve eggshell quality and bone mineralization. However, there is a large variability of responses in birds to this factor, indicating the need to better quantify the effect of modulating factors related to coarse particles that could explain this variability. The objective of this meta-analysis was to study the impact of LmPS on the digestive and metabolic fate of Ca to optimize calcium utilization by laying hens. Forty-nine papers published between 1971 and 2019, including 192 experiments were included in this study. Four categories of dependent variables were identified: Ca solubility, production performance, eggshell quality, and bone strength. Independent variables tested were LmPS and Age. Results showed that the *in vitro* solubilization of limestone linearly decreased ($P < 0.001$; $R^2 = 0.91$) while *in vivo* solubilization linearly increased with LmPS ($P < 0.001$; $R^2 = 0.91$). Coarse limestone particles were retained longer in the gizzard ($P < 0.001$; $R^2 = 0.60$), inducing higher Ca solubilization by gastric juices than fine limestone. LmPS showed no effect on production performance while all eggshell quality parameters increased with LmPS ($P < 0.001$; $R^2 > 0.91$). The most relevant effect of LmPS was on tibia breaking strength. This effect was age dependent (Age $\times$ LmPS, $P < 0.001$; $R^2 = 0.89$) with coarse limestone particles increasing tibia breaking strength with aging compared to fine limestone particles. The current study renders it possible to quantify the effects of age and LmPS on eggshell quality and bone mineralization. This work showed an interaction between eggshell quality and bone mineralization and showed that LmPS increases bone strength in older laying hens.

INTRODUCTION

Chez la poule pondeuse, la formation de la coquille de l'œuf se déroule de façon cyclique à l'échelle de la journée et requiert une grande quantité de calcium (Ca ; ~2g/jour). La majeure partie du Ca est apportée par l'alimentation (70%). Néanmoins, il existe une désynchronisation entre l'apport de Ca alimentaire le jour et la forte demande en Ca pour la coquille la nuit. Ainsi, la poule puise le Ca nécessaire dans une réserve transitoire : l'os médullaire. La résorption de l'os médullaire par les ostéoclastes s'accompagne d'une résorption de l'os cortical. Ce dernier n'étant pas reconstitué au cours du temps, la mobilisation du Ca osseux entraîne une fragilisation du squelette avec l'âge. En plus des troubles osseux, le vieillissement chez la poule induit une baisse de la production, accompagnée d'une baisse de la qualité de coquille. Les effets positifs de l'incorporation de Ca particulaire (*i.e.* particules de calcaire de 0,8 mm de diamètre ou plus) sur les paramètres de production, de qualité de coquille et de minéralisation osseuse ont été montrés, mais ces effets restent variables et pas toujours compris. Afin de quantifier l'effet du Ca particulaire chez la poule pondeuse en fonction de l'âge, une méta-analyse a été réalisée.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Collecte de données et calculs

Les études utilisées pour cette méta-analyse proviennent de différentes bases de données : CAB Abstracts, Google Scholar, MedLine et Food Science and Technology Abstracts. Suite à cette recherche, 82 publications ont été sélectionnées. Seules les publications qui traitaient de la poule pondeuse et qui utilisaient le calcaire comme source de Ca ont été conservées. Du fait de faibles variabilités (intra et inter expérimentation) du Ca et phosphore total (Pt) alimentaires, seules les publications où les poules étaient au besoin (selon le NRC, 1994) en Ca et Pt ont été conservées. Cette sélection a conduit à la formation d'un jeu de données contenant 58 publications parues entre 1971 et 2019.

A partir du jeu de données principal, 3 sous bases ont été construites. La première traitait de l'effet de la taille des particules de Ca sur les paramètres de solubilisation *in vitro* et *in vivo*, ainsi que sur la rétention de Ca dans le gésier. Cette base de données comprenait 13 publications parues entre 1971 et 2011. Parmi ces publications, 8 traitaient de la solubilisation *in vitro*, 5 de la solubilisation *in vivo* dont 2 traitaient de la solubilisation *in vitro* et *in vivo* simultanément. Dans toutes les publications sélectionnées, la solubilisation *in vitro* du Ca était mesurée selon la méthode décrite

par Zhang et Coon (1997). La solubilisation *in vivo* était mesurée selon la méthode de Rao et Roland (1989). La deuxième sous base traitait de l'effet de la taille des particules sur les performances de production et les paramètres de qualité de la coquille. Cette base de données incluait 42 publications parues entre 1971 et 2019. La troisième sous base traitait de l'effet de la taille des particules sur les paramètres de minéralisation osseuse. Elle comprenait 9 publications parues entre 1990 et 2011.

Basé sur les données de la littérature, les larges particules sont définies comme étant supérieures ou égales à 0,8mm (Rao et Roland, 1990). Environ un quart des études utilisées combinait l'effet de la taille des particules de Ca et le taux d'incorporation des larges particules dans la ration. Afin de standardiser l'effet taille de particules, nous avons calculé et utilisé comme variable explicative la taille moyenne des particules (TMP) de Ca de la façon suivante :

$$TMP = (\text{taille des larges particules} \times \text{taux d'incorporation}) + (\text{taille des fines particules} \times \text{taux d'incorporation})$$

1.2. Analyses statistiques

Les variables dépendantes mesurées dans les publications ont été classées en 4 catégories (**Tableau 1**) : 1) le devenir des particules de Ca dans le tractus digestif, avec les données de solubilité *in vitro* et *in vivo* et de rétention du Ca dans le gésier. 2) Les performances de production, avec le taux de ponte (%) et le poids des œufs (g). 3) Les paramètres de qualité de coquille, avec la gravité spécifique, l'épaisseur (mm) et la force de fracture de la coquille (kg). 4) Les paramètres de minéralisation osseuse avec la force de fracture du tibia (kg). Chaque variable dépendante a été analysée avec le modèle linéaire généralisé mixte suivant :

$$Y_{ij} = B_0 + S_i + B_i X_{ij} + b_i X_{ij} + e_{ij} ,$$

avec Y_{ij} la variable dépendante du $j^{\text{ème}}$ traitement de la $i^{\text{ème}}$ étude, B_0 l'intercept de l'étude, X_{ij} la variable indépendante du $j^{\text{ème}}$ traitement de la $i^{\text{ème}}$ étude, S_i l'effet aléatoire de l'étude sur l'intercept, b_i l'effet aléatoire de l'étude sur le coefficient de régression et e_{ij} l'erreur résiduelle non expliquée par le modèle. Pour chacune des variables dépendantes, l'effet taille des particules de Ca, âge et leur interaction ont été testés. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R version 3.02 (R core team, 2013). Les modèles linéaires mixtes ont été étudiés avec la fonction *lme* du package *nlme* version 3.1 – 117 (Pinheiro et al., 2015).

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Devenir des particules de Ca dans le tractus digestif

La solubilité *in vitro* baisse quand TMP augmente ($P < 0,001$), alors que la solubilité *in vivo* augmente ($P < 0,001$). Les résultats indiquent que la quantité de Ca retenue après 24 heures augmente avec la taille des particules ($P < 0,001$). Le terme de « solubilité *in vivo* », souvent repris dans la littérature, confond les notions de disparition physique de la particule du gésier (en lien avec la vitesse de transit), et la notion chimique de dissolution de la particule (en lien avec le milieu acide). La différence de solubilité *in vivo* entre les larges et les fines particules peut ainsi être expliquée par deux mécanismes. Premièrement, les larges particules stimulent les sécrétions acides du proventricule par distension des parois du gésier (Svihus, 2011). Guinotte et al. (1993) ont montré que l'incorporation de larges particules de Ca augmente la sécrétion d'acide chlorhydrique de 11%, ce qui favoriserait la dissolution du Ca. Deuxièmement, les larges particules sont spécifiquement retenues dans le gésier (Scott et al., 1971), elles présentent un temps moyen de rétention plus long par rapport aux fines particules. Basé sur les données de rétention du Ca dans le gésier en fonction de la taille des particules décrites par Rao et al. (1992), nous avons calculé le temps moyen de rétention des particules de Ca dans le gésier : 345 min et 65 min pour des larges et fines particules respectivement. Ainsi, due à leur accumulation transitoire dans le gésier, les larges particules de Ca restent plus longtemps au contact d'un milieu acide, favorisant leur solubilisation (Bo-Linn et al., 1994). Les larges particules fournissent du Ca soluble plus longtemps à l'intestin par rapport aux fines particules.

2.2. Performances de production

La TMP ne montre pas d'effet sur le taux de ponte ou le poids des œufs, en accord avec la littérature. Ces paramètres sont significativement affectés par l'âge (Âge et Âge^2 ; $P < 0,001$). Ainsi, le taux de ponte augmente linéairement jusqu'à 30 – 35 semaines puis baisse progressivement entre 35 et 80 semaines (–10 %). La baisse du taux de ponte peut être expliquée par une diminution de la durée de la séquence de ponte, et une augmentation de l'intervalle entre deux séquences de ponte (Johnston et Gous, 2003). Le poids des œufs augmente de 4,77g entre 35 et 80 semaines pour atteindre un plateau aux alentours de 80 semaines. La hausse du poids de l'œuf peut être liée à l'augmentation relative du poids du jaune avec l'âge (Travel et al., 2010).

2.3. Qualité de la coquille

La gravité spécifique, la force de fracture et l'épaisseur de la coquille augmentent avec TMP ($P < 0,001$). Par exemple, une augmentation de la taille des particules

de Ca de 0,15 à 1,5mm augmente la gravité spécifique, la force de fracture et l'épaisseur de la coquille de 0,8%, 1,1% et 3,0%, respectivement (**Figure 1**). L'augmentation des paramètres de qualité de la coquille avec la taille des particules peut être expliquée par la plus longue diffusion de Ca soluble dans l'intestin. Les larges particules réduisent l'écart entre l'apport de Ca le jour et le besoin en Ca pour la coquille la nuit. L'âge ne montre pas d'effet sur la force de fracture ni même sur l'épaisseur de la coquille. La gravité spécifique de la coquille baisse significativement de 0,6% entre 35 et 70 semaines ($P < 0,001$). La littérature indique pourtant une baisse de la qualité de la coquille avec l'âge (Zita et al., 2012). Cette baisse de la qualité de coquille semble être liée à la baisse de la capacité de l'intestin à absorber le Ca (Franco-Jimenez et Beck, 2005). L'absence d'effet de l'âge sur les paramètres de qualité de coquille dans notre étude s'explique par le méta-design compte tenu du peu de variabilité intra-expérimentation de l'âge.

2.4. Minéralisation osseuse

La force de fracture du tibia baisse significativement avec l'âge ($P < 0,05$; **Figure 2**), en accord avec la littérature (Yamada et al., 2021). Un taux de ponte élevé associé à un décalage entre l'apport et le besoin en Ca pour la coquille accroît la mobilisation osseuse (Kim et al., 2012). De plus, la baisse de la capacité de l'intestin à absorber le Ca avec l'âge implique une mobilisation osseuse du Ca plus importante pour assurer la production de la coquille. La baisse de la force de fracture avec l'âge est moins prononcée chez des poules recevant des larges particules de Ca (TMP $\times$ Âge ; $P < 0,001$), en accord avec la littérature (Fleming, 2008). Ainsi, la force de fracture du tibia baisse de 20% et 15% entre 35 et 80 semaines pour des particules de 0,15mm et 1,5mm, respectivement. L'accumulation temporaire des larges particules de Ca dans le gésier permet une diffusion progressive du Ca soluble dans l'intestin. Ainsi, contrairement aux fines particules qui constituent une source rapidement utilisable de Ca, les larges particules permettent de réduire l'écart temporel entre l'apport de Ca alimentaire le jour et le besoin pour la production de la coquille la nuit. De cette manière, l'incorporation de larges particules permet de réduire la mobilisation des réserves osseuses.

CONCLUSION

Ce travail permet de quantifier les effets de la taille des particules de Ca et de l'âge sur différents paramètres physiologiques et de production. Cela permettra de développer les équations d'un modèle mathématique mécaniste simulant le devenir du Ca et P dans le tractus digestif de la poule pondeuse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bo-Linn, G. W., G. R., Davis, D. J., Buddrus, S. G., Morawski, C., Santa Ana, and S. F., Fordtranm. 1984. J. Clin. Investig. 73 (3): 640 – 647.
- Fleming, R. H. 2008. Proceedings of the Nutrition Society 67: 177 – 183.
- Franco-Jimenez, D. J., and M. M., Beck. 2005. Int. J. Poult. Sci. 4 (8): 518 – 522.
- Guinotte, F., J., Gautron, A., Soumarmon, J. C., Robert, G., Peranzi, and Y., Nys. 1993. Comp. Biochem. Phy. A 106 (2): 319 – 327.
- Johnston, S. A., and R. M., Gous. 2003. Br. Poult. Sci. 44 (5): 752 – 760.
- Kim, W. K., S. A., Bloomfield, T., Sugiyama, T., and S. C., Ricke. 2012. World Poult. Sci. Journal 68 (1) : 71 - 82.
- National Research Council. 1994. Nutrients requirements of Poultry. 9th rev. ed. National Academy Press, Washington, DC.
- Pinheiro, J., D., Bates, S., DebRoy, D., Sarkar, and R Core Team. 2015. R package, version 3.1–117.
- R Core Team. 2013. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rao, K. S., and D. A., Roland, Sr. 1989. Poult. Sci. 68 (11): 1499 – 1505.
- Rao, K. S., and D. A., Roland, Sr. 1990. Poult. Sci. 69 (12): 2170 – 2176.
- Rao, K. S., D. A., Roland, Sr., J. L., Adams, and W. M., Durboraw. 1992. J. Appl. Poult. Res.1 (1): 6 – 10.
- Scott, M. L., S. J., Hull, and P. A., Mullenhoff. 1971. Poult. Sci. 50 (4): 1055 – 1063.
- Svihus, B. 2011. World Poult. Sci. J. 67 (2): 207 – 224.
- Travel, A., Y., Nys, and E., Lopes. 2010. INRA Prod. Anim. 23 (2): 155 – 166.
- Yamada, M., C., Chen, T., Sugiyama, and W. K., Kim. 2021. Animals 11 (2): 570.
- Zhang, B., and C. N., Coon. 1997. J. Appl. Poult. Res. 6 (12): 94 – 99.
- Zita, L., Z., Ledvinka, E., Tumova, and L., Klesalova. 2012. Rev. Bras. de Zootec.41 (9): 2079 – 2084.

Tableau 1 : Statistiques descriptives du jeu de données.

	Nombre d'observations	Nombre de publications	Moyenne	SD	Min.	Max.
Variables indépendantes						
Taille des particules de Ca	367	49	1,312	1,248	0,039	6,500
Âge	367	49	54,35	18,06	26,00	90,00
Variables dépendantes						
Solubilité <i>in vitro</i> du Ca (%) ¹	61	8	50,76	15,66	24,20	100,00
Solubilité <i>in vivo</i> du Ca (%) ²	43	5	79,23	9,47	54,00	96,00
Rétention du Ca dans le gésier (g)	32	2	4,50	3,48	0,10	15,40
Taux de ponte (%)	251	42	81,7	10,4	52,0	98,5
Poids des œufs (g)	251	37	62,44	3,56	54,70	70,20
Gravité spécifique	85	15	1,081	0,005	1,070	1,091
Épaisseur de la coquille (mm)	137	19	0,370	0,035	0,260	0,446
Force de fracture de la coquille (kg)	127	16	3,71	0,42	2,58	5,13
Force de fracture du tibia (kg)	55	9	20,80	3,29	15,40	27,30

¹La solubilité *in vitro* des particules de Ca a été déterminée selon la méthode de Zhang and Coon (1997).

²La solubilité *in vivo* des particules de Ca a été déterminée selon la méthode de Rao and Roland (1989).

Figure 1 : Effet de la taille des particules de Ca (mm) sur les paramètres de qualité de la coquille de l'œuf chez la poule pondeuse. La ligne pleine représente l'épaisseur de la coquille de l'œuf (mm) : $Y = 0,371 + 0,003 \times \text{TMP}$; $R^2 = 0,982$; $\text{RMSE} = 0,005$. La ligne pointillée représente la force de fracture de la coquille (kg) : $Y = 3,452 + 0,093 \times \text{TMP}$; $R^2 = 0,910$; $\text{RMSE} = 0,168$.

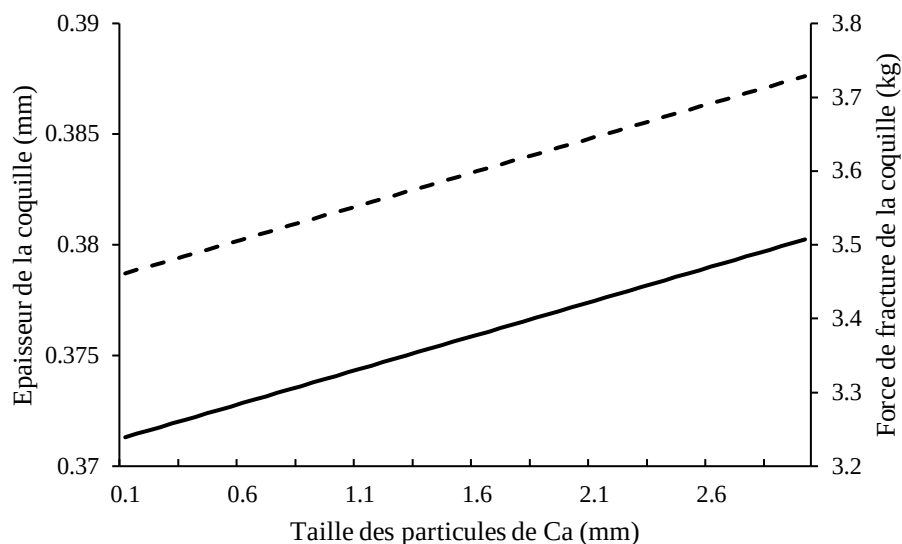


Figure 2 : Force de fracture du tibia (kg) en fonction de l'âge de la poule (semaines) et de la taille des particules de Ca (mm) : $Y = 16,291 - 0,045 \times \text{TMP} + 0,291 \times \text{Age} - 0,004 \times \text{Age}^2 + 0,016 \times \text{TMP} \times \text{Age}$; $R^2 = 0,894$; $\text{RMSE} = 1,306$; $P < 0,001$. La ligne pointillée noire représente une poule recevant des fines particules de Ca (0,20 mm). La ligne pleine représente une poule recevant des larges particules de Ca (1,30 mm). La ligne pointillée grise représente une poule recevant de très larges particules de Ca (2,80 mm).

