

MÉTA-ANALYSE DE L'INCORPORATION DE PHYTASES MICROBIENNES SUR L'UTILISATION DU PHOSPHORE CHEZ LES POULES PONDEUSES

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

¹ *Département des Sciences Animales, Université Laval, G1V 0A6, QUEBEC,*

² *INRAE, Université de Tours, BOA, 37380, NOUZILLY*

fabien.hervo@inrae.fr

RÉSUMÉ

Chez la poule pondeuse, le phosphore (P) est un nutriment essentiel ; une sub-carence en P conduit rapidement à une diminution de la production, voire une dégradation de la minéralisation osseuse. La majeure partie du P contenu dans les végétaux est stocké sous forme de P phytique (PP), peu absorbable pour la poule. Afin d'optimiser l'utilisation du PP, les phytases microbiennes (PhytM) sont incorporées à l'alimentation : ces enzymes sont capables d'hydrolyser le PP et de libérer des phosphates, *i.e.*, du P non phytique (PNP). Chez la poule pondeuse, la réponse aux PhytM n'étant pas bien quantifiée, une méta-analyse des données disponibles, soit 440 observations issues de 49 publications, a été réalisée. Ce travail visait à déterminer la réponse des paramètres de production, de minéralisation osseuse et de digestibilité du P à l'incorporation de PhytM (FTU/kg) et de PNP alimentaire (%). L'ajout de PhytM a augmenté la digestibilité iléale apparente du P de façon plus importante dans des régimes contenant peu de PNP (PhytM $\times$ PNP ; $P < 0,05$). De même, l'incorporation de PhytM a augmenté le taux de ponte de façon plus importante dans des régimes contenant peu de PNP (PhytM $\times$ PNP ; $P < 0,001$). L'incorporation de PhytM a réduit l'indice de conversion ($P < 0,05$), légèrement augmenté le taux de coquille ($P < 0,05$) et augmenté le taux de cendres tibiales ($P < 0,05$). En conclusion, les poules pondeuses répondent davantage aux PhytM dans un régime à faible teneur en PNP et la détermination des équivalences de la PhytM pour le P disponible dépend des critères de réponse considérés.

ABSTRACT

META-ANALYSIS OF THE INCORPORATION OF MICROBIAL PHYTASE ON PHOSPHORUS UTILISATION IN LAYING HENS. In laying hens, phosphorus (P) is an essential nutrient; a sub-carrence of P rapidly leads to a decrease in production and a deterioration in bone mineralisation. Most of plant P is stored as phytic P (PP), and is poorly available for the hen. To optimise the use of PP, microbial phytases (MPhyt) are added to the diet: these enzymes can hydrolyse the PP carried by phytic acid to release non-phytic P (NPP). In laying hens, the response to MPhyt is not well defined, thus, a meta-analysis of 440 observations from 49 publications was thus carried out. The aim of this work was to determine the response of production, bone mineralisation and P digestibility parameters to the incorporation of MPhyt (FTU/kg) and dietary NPP (%). MPhyt increased apparent pre-caecal P digestibility more significantly in low P-diets (MPhyt $\times$ PNP; $P < 0.05$). The incorporation of MPhyt increased egg production rate to a greater extent in low P-diets (MPhyt $\times$ PNP; $P < 0.001$). The incorporation of MPhyt reduced the FCR ($P < 0.05$), slightly increased the eggshell proportion ($P < 0.05$) and increased the tibia ash ($P < 0.05$). In conclusion, laying hens respond more to MPhyt on a low-P diet, and the determination of MPhyt equivalence for available P depends on the response criteria considered.

INTRODUCTION

Dans les céréales, la majeure partie du P (60-70 %) est stockée sous forme d'acide phytique (PP, Pointillart, 1994) et est peu absorbable. Le P est un nutriment essentiel intervenant dans de nombreuses fonctions biologiques (Li et al., 2017). Un niveau de P alimentaire sub-optimal conduit rapidement à une diminution du taux de ponte (Teng et al., 2020) et à des troubles de la minéralisation osseuse chez les poules pondeuses (Pongmanee et al., 2020). Pour couvrir les besoins en P, des phosphates sont couramment ajoutés à l'alimentation en raison de leur haute disponibilité en P. Néanmoins, un excès en P alimentaire entraîne une augmentation de son excrétion *via* les urines (Martinez-Rojas et al., 2018). Afin de réduire l'incorporation de phosphates et l'excrétion de P, les phytases microbiennes (PhytM) sont ajoutées à l'aliment pour valoriser le PP (Selle et Ravindran, 2007).

Bien que les PhytM aient un effet positif sur la rétention apparente du P chez la poule pondeuse (Lim et al, 2003), seules quelques études ont quantifié son effet sur la digestibilité iléale apparente (DIA) du P (Pongmanee et al, 2020). De plus, la réponse des paramètres de qualité de coquille et des paramètres de minéralisation osseuse à l'incorporation de PhytM est variable (Hughes et al., 2009 ; Jalal et Sheideler, 2001). L'objectif de ce travail était de quantifier par méta-analyse l'effet de l'incorporation de PhytM sur la DIA du P chez la poule pondeuse ainsi que sur les performances de production, la qualité de la coquille d'œuf et la minéralisation osseuse.

1. MATERIELS ET MÉTHODES

1.1. Collecte des données

Les publications portant sur l'effet des PhytM chez les poules pondeuses ont été recherchées dans différentes bases de données en ligne, en utilisant les mots clés suivants : « *poule pondeuse* », « *phytase* », « *phytase microbienne* », « *digestibilité iléale* » ou « *pré-caecale* », « *performance de production* », « *qualité de coquille* », « *minéralisation osseuse* ». Seules les publications évaluées par des pairs ont été conservées. Toutes les données ont été introduites dans une base de données comprenant des données qualitatives et quantitatives (composition des aliments, performances de production, digestibilité du P, *etc.*).

Dans toutes les publications, les régimes alimentaires ont été formulés pour couvrir les besoins de l'animal, à l'exception du phosphore total (**Pt**). Lorsqu'elles étaient fournies, les valeurs d'activités phytasiques analysées ont été privilégiées aux valeurs attendues. Toutes les études présentaient au moins trois régimes expérimentaux : un contrôle positif, avec un niveau adéquat de PNP alimentaire sans PhytM; un contrôle négatif, avec un niveau sub-optimal de PNP (0,2 % en

moyenne) sans PhytM; et un contrôle négatif + PhytM, avec un niveau sub-optimal de PNP avec PhytM. Pour étudier avec précision l'effet des PhytM, seuls les contrôles négatifs avec ou sans incorporation de PhytM ont été pris en compte. De plus, seules les publications où les poules pondeuses étaient dans le premier cycle de production ont été conservées. L'âge était alors compris entre 24 et 86 semaines. La base de données obtenue comprenait 440 observations provenant de 49 publications publiées entre 1997 et 2021.

1.2. Variables dépendantes et indépendantes

Pour chaque régime expérimental, les niveaux alimentaires de Ca, Pt, PP et PNP ont été re-calculés à partir des tables INRA-CIRAD-AFZ (2017). Six variables dépendantes ont été analysées à partir de 4 bases de données : 1) performance de production avec le taux de ponte (%) et l'indice de consommation (IC) ; 2) qualité de la coquille d'œuf avec le taux de coquille d'œuf (%) et la résistance à la rupture de la coquille (kg) ; 3) minéralisation osseuse avec le taux de cendres tibiales (%) ; et 4) digestibilité du P avec la DIA du P (%). Les variables indépendantes considérées étaient le niveau d'incorporation de PhytM (FTU/kg) et le niveau de PNP (% ; Tableau 1). Les interactions entre les variables indépendantes ont été testées lorsque cela était possible (*i.e.*, testées en intra-publication). En raison de la faible variabilité (inter et intra-expérimentation) des niveaux de PP et de Ca dans la base de données, ces facteurs n'ont pas pu être inclus dans l'analyse.

1.3. Analyses statistiques

Considérant que de nombreux facteurs externes (*e.g.*, le stade physiologique, la méthodologie) peuvent affecter les observations et biaiser les modèles, l'effet de l'expérimentation a été considéré comme un effet aléatoire (Sauvant et al., 2008). Ainsi, chaque variable dépendante a été analysée avec un modèle linéaire mixte comme suit :

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

avec Y_{ij} la variable dépendante du $j^{\text{ème}}$ traitement de la $i^{\text{ème}}$ étude, B_0 l'ordonnée à l'origine de l'expérimentation, X_{ij} la variable indépendante du $j^{\text{ème}}$ traitement de la $i^{\text{ème}}$ étude, S_i l'effet aléatoire de l'expérimentation sur l'ordonnée à l'origine, B_i le coefficient de régression global de Y sur X (un effet fixe), b_i l'effet aléatoire de l'expérimentation sur le coefficient de régression de Y sur X, et e_{ij} l'erreur résiduelle inexpliquée par le modèle.

La normalité des résidus a été testée selon le test de Shapiro-Wilk. Les valeurs aberrantes ont été identifiées à l'aide d'un test de déviation Student extrême. La performance des modèles a été évaluée en utilisant le niveau de signification des paramètres estimés, le coefficient de détermination (R^2), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative

(**relRMSE**), *i.e.*, le rapport entre la RSME et la moyenne de la variable étudiée (%).

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'efficacité des PhytM dépend de différents facteurs relatifs à l'aliment, tels que les matières premières ou le niveau alimentaire de PNP, ou bien à l'animal, tels que la génétique ou l'âge. Dans cette étude, les régimes expérimentaux étaient principalement à base de maïs et de tourteau de soja (83 %). Les niveaux alimentaires de Ca et de PP variaient peu entre les publications : $3,5 \pm 0,32$ % et $0,22 \pm 0,02$ % (moyenne $\pm$ écart-type), respectivement. Dans les publications sélectionnées, deux sources de phosphate ont été utilisées : le phosphate mono-Ca (30 %) et le phosphate bi-Ca (70 %). Plusieurs PhytM ont été utilisées dans les publications sélectionnées, dont Natuphos® (51 %), Quantum Blue® (15 %) et Ronozyme® (7 %).

Concernant la DIA du P, l'effet du PNP était positif et linéaire ($P < 0,05$) et celui de la PhytM quadratique ($P < 0,001$; Tableau 2) montrant un effet maximum aux alentours de 800 FTU/kg. La simulation d'un apport de 300 FTU/kg augmentait la DIA du P de 57 % alors que le passage de 300 à 600 FTU/kg ne l'augmentait que de 36 %. L'effet de la PhytM était également diminué lorsque le niveau de PNP augmentait (PhytM $\times$ PNP ; $P < 0,05$) ; l'ajout de 300 FTU/kg augmentait la DIA du P de 34 % avec 0,1 % de PNP et de 12 % avec 0,3 % de PNP. Cette observation est en accord avec des observations réalisées chez le poulet de chair (Majeed et al., 2020). Ce phénomène illustre le fait que la capacité de la poule à absorber le P diminue lorsque le PNP augmente (Rodehutsord et al., 2002). Le taux de cendres tibiales augmentait de façon linéaire avec le PNP ($P < 0,05$; Tableau 2) et la PhytM ($P < 0,05$) sans interaction entre PNP et PhytM. Comme seuls les témoins négatifs ont été conservés dans cette étude, le PNP des régimes expérimentaux était peut-être trop faible pour observer cette interaction, pourtant mise en évidence chez le poulet de chair (Létourneau-Montminy et al., 2010), liée à un maximum de minéralisation osseuse. Une étude récente conduite chez la poule pondeuse de 22 à 34 semaines d'âge a montré que sans PhytM, un apport de 0,1 % de PNP n'affectait pas la minéralisation osseuse par rapport à un apport de 0,3 % (Jing et al., 2021), laissant supposer que le besoin en P pour l'os serait faible.

Le taux de ponte répondait de façon similaire à la DIA du P avec un effet des PhytM qui diminuait lorsque le niveau de PNP augmentait (PhytM $\times$ PNP ; $P < 0,001$; Tableau 3), en accord avec Ahmadi et Rodehutsord (2012). L'ajout de 300 FTU/kg augmentait le taux de ponte de 5 % avec 0,1 % de PNP et de 2 % avec 0,3 % de PNP. Néanmoins, l'effet de PNP n'était pas significatif montrant la faible sensibilité de ce critère au P. Ceci est en accord avec

le faible besoin en P de la poule pondeuse (Rodehutsord et al., 2023).

L'incorporation de PhytM diminuait l'IC de façon quadratique avec un minimum aux alentours de 450 FTU/kg (PhytM² ; $P < 0,001$; Tableau 3). Par exemple, un apport de 300 FTU/kg diminuait l'IC de 3,1 % alors que le passage de 300 à 600 FTU/kg ne diminuait l'IC que de 2,3 %. De façon étonnante, le niveau de PNP alimentaire ne montrait pas d'effet sur l'IC. Cela peut s'expliquer par le fait que les régimes sélectionnés pour cette étude contenaient peu de PNP. Le taux de coquille n'était pas affecté par le niveau de PNP, ni par l'incorporation de PhytM (Tableau 4). Les PhytM augmentaient la résistance à la rupture de la coquille, et cet effet était plus important dans des régimes contenant peu de PNP (PhytM $\times$ PNP ; $P < 0,05$). La résistance à la rupture de la coquille d'œuf est un indicateur synthétique résultant à la fois du dépôt et de l'agencement de Ca et des protéines (Gautron et Nys, 2007). Les phytases, en hydrolysant l'acide phytique, peuvent libérer des acides aminés (Rutherford et al., 2002). L'effet positif des phytases sur la solidité de la coquille pourrait être expliqué par leur capacité à libérer des acides-aminés jouant un rôle dans l'ultrastructure de la coquille (Gautron et Nys, 2007).

CONCLUSION

Les réponses de la poule au PNP et aux PhytM varient en fonction du critère étudié. Ceci est dû au fait que chaque variable étudiée requiert un besoin en P différent, en accord avec Rodehutsord et al. (2023). La présente étude indique que 0,10 % de PNP supplémentés avec 300 FTU de PhytM/kg semble être suffisant pour maintenir un bon niveau de production et de minéralisation osseuse. D'autres études seront nécessaires pour définir précisément les besoins en P de la poule pondeuse.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Laboratoire International Associé « NutriMod ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmadi, H., M. Rodehutsord. 2012. Poult. Sci. (91), 2072–2078.
- Bello, A., Y. Dersjant-Li, D. R. Korver. 2020. Poult. Sci. (99), 5792–5801.
- Hughes, A. L., J. P. Dahiya, C. L. Wyatt, H. L. Classen. 2009. Poult. Sci. (88), 1191–1198.
- INRA-CIRAD-AFZ. 2017. In : Tables INRAE-CIRAD-AFZ – Composition et valeurs nutritionnelles des matières premières pour bovins, ovins, caprins, porcs, volailles, chevaux, lapins et salmonidés. D. Sauvant, J. M. Perez and G. Tran, Paris, pp 301.
- Gautron, J., Y. Nys. 2007. Pages 109–115 in Bioactive Egg Compounds. Huopalahti R., R. Lopez-Fandino, M. Anton and R. Schade, eds. Springer, New York, NY.
- Jalal, M. A., S. E. Scheideler. 2001. Poult. Sci. (80), 1463–1471.
- Jing, M., S. Zhao, A. Rogiewoicz, B. A. Slominski, J. D. House. 2021. Animal (15), 100010.
- Létourneau-Montminy, M.-P., A. Narcy, P. Lescoat, J. F. Bernier, M. Magnin, C. Pomar, Y. Nys, D. Sauvant, C. Joindreville. 2010. Animal (4), 1844–1853.
- Li, X., D. Zhang, et W. L. Bryden. 2017. Anim. Prod. Sci. (57), 2304–2310.
- Lim H. S., H. Namkung, I. K. Paik. 2003. Poult. Sci. (82), 92–99.
- Majeed, S., R. Qudsieh, F. W. Edens, J. Brake. 2020. Poult. Sci. (99), 1502–1514.
- Martinez-Rojas, I. Y., E. Avila Gonzalez, J. Arce Menocal, T. T. Dos Santos, J. Rubio Arguello C. Lopez Coello. 2018. J. Appl. Anim. Res. (46), 314–321.
- Ousterhout, L. E. 1980. Poult. Sci. (59), 1480–1484.
- Pointillart, A. 1994. INRA Prod. Anim. (7), 29–39.
- Pongmanee, K., I. Kühn, D. R. Korver. 2020. Poult. Sci. (99), 2595–2607.
- Rodehutsord, M., F. Sanver, R. Timmler. 2002. Arch. Tierz. (56), 189–198.
- Rodehutsord, M., V. Sommerfeld, C. R. Angel, D. R. Korver. 2023. Poult. Sci. (102), 102344.
- Rutherford, S. M., T. K. Chung, P. J. Moughan. 2002. Br. Poult. Sci. (43), 598–606.
- Sauvant, D., P. Schmidely, J. J. Daudin, N. R. St-Pierre. Animal (2), 1203–1214.
- Selle, P. H., V. Ravindran. 2007. Anim. Feed Sci. Technol. (135), 1–41.
- Selle, P. H., A. J. Cowieson, N. P. Cowieson, V. Ravindran. 2012. Nutr. Res. Rev. (25), 1–17.
- Snow, J. L., K. A. Rafacz, P. L. Utterback, C. W. Utterback, R. W. Leeper, C. M. Parsons. 2005. Poult. Sci. (84), 757–763.
- Suttle, N. F. 2010. In: Mineral Nutrition of Livestock. (4th edition). N. F. Suttle, Wallingford, pp 122–167.
- Teng, X., W., Zhang, D., Xu, Z., Liu, N., Yang, D., Luo, H., Wang, M., Ge, R., Zhang. 2020. Prev. Vet. Med. (181), 105049.
- van der Klis, J. D., H. A. J. Versteegh, P. C. M. Simons K. Kies. 1997. Poult. Sci. (76), 1535–1542.

Tableau 1. Statistiques descriptives¹

	n	N	Moyenne	ET	Min.	Max.
<i>Variables indépendantes</i>						
PhytM (FTU/kg)	440	49	246	302	0	1800
PNP (%)	440	49	0,2	0,093	0,078	0,502
<i>Variables dépendantes</i>						
Taux de ponte (%)	354	44	85,4	8,03	60,06	99,00
IC	295	38	2,03	0,318	1,282	3,120
Taux de coquille (%)	86	17	9,69	0,647	7,729	10,800
Force de fracture de la coquille (kg)	78	13	3,62	0,683	2,310	4,775
Cendres tibiales (%)	107	13	54,2	6,53	38,10	64,10
DIA du P (%)	34	5	46,9	12,36	21,90	69,80

¹n, nombre d'observations ; N, nombre de publications ; ET, écart-type ; Min., valeur minimale ; Max., valeur maximale ; PhytM, phytases microbiennes ; PNP, phosphore non-phytique ; IC, indice de consommation ; DIA, digestibilité iléale apparente.

Tableau 2. Réponse de la digestibilité iléale apparente du P (%) et du taux de cendres tibiales (%) aux niveaux de phytases microbiennes (FTU/kg) et de P non-phytique (%) alimentaires chez la poule pondeuse.¹

	DIA P (%)			Taux de cendres tibiales (%)		
	Coefficient	ET	p-value	Coefficient	ET	p-value
Intercept	30,89	7,63	< 0,001	47,21	5,89	< 0,001
PhytM	$5,93 \times 10^{-2}$	$5,85 \times 10^{-3}$	< 0,001	$0,40 \times 10^{-2}$	$0,12 \times 10^{-3}$	0,002
PNP	63,59	11,88	0,033	25,32	12,56	0,045
PhytM ²	$-0,20 \times 10^{-5}$	$0,50 \times 10^{-6}$	0,034			
PhytM × PNP	-0,11	0,02	0,011	-0,01	$0,61 \times 10^{-2}$	0,096
RMSE			5,392			5,16
relRMSE			11,49			9,52
R ²			0,697			0,796

¹DIA, digestibilité iléale apparente ; PhytM, phytases microbiennes ; PNP, phosphore non-phytique ; RMSE, erreur quadratique moyenne ; relRMSE, erreur quadratique moyenne relative ; ET, erreur type.

Tableau 3. Réponse du taux de ponte (%) et de l'indice de consommation aux niveaux de phytases microbiennes (FTU/kg) et de P non-phytique (%) alimentaires chez la poule pondeuse.¹

	Taux de ponte (%)			IC		
	Coefficient	ET	p-value	Coefficient	ET	p-value
Intercept	82,28	2,8	< 0,001	2,03	0,14	< 0,001
PhytM	0,019	$0,02 \times 10^{-1}$	< 0,001	$-0,238 \times 10^{-3}$	$0,52 \times 10^{-4}$	< 0,001
PNP	8,921	7,34	0,268	-0,164	0,23	0,480
PhytM ²	$-0,100 \times 10^{-4}$	$0,10 \times 10^{-5}$	< 0,001	$0,100 \times 10^{-6}$	$0,30 \times 10^{-8}$	< 0,001
PhytM × PNP	-0,045	$0,10 \times 10^{-1}$	< 0,001	$0,351 \times 10^{-3}$	$0,21 \times 10^{-3}$	0,081
RMSE			1,388			0,046
RelRMSE			1,63			2,26
R ²			0,922			0,967

¹IC, indice de consommation ; PhytM, phytases microbiennes ; PNP, phosphore non-phytique ; RMSE, erreur quadratique moyenne ; relRMSE, erreur quadratique moyenne relative ; ET, erreur type.

Tableau 4. Réponse du taux de ponte (%) et de l'indice de consommation aux niveaux de phytases microbiennes (FTU/kg) et de P non-phytique (%) alimentaires chez la poule pondeuse.¹

	Force de fracture de la coquille (kg)			Taux de coquille (%)		
	Coefficient	ET	p-value	Coefficient	ET	p-value
Intercept	2,504	0,28	< 0,001	9,950	0,25	< 0,001
PhytM	$0,748 \times 10^{-3}$	$0,22 \times 10^{-3}$	0,001	$0,139 \times 10^{-3}$	$0,64 \times 10^{-4}$	0,048
PNP	8,601	1,67	0,007	-0,747	0,65	0,672
PhytM × PNP	$-0,354 \times 10^{-2}$	$0,14 \times 10^{-2}$	0,015			
RMSE			0,134			0,128
relRMSE			3,70			1,32
R ²			0,909			0,836

¹PhytM, phytases microbiennes ; PNP, phosphore non-phytique ; RMSE, erreur quadratique moyenne ; relRMSE, erreur quadratique moyenne relative ; ET, erreur type.