

UN NOUVEAU SYSTEME D'UNITE PHOSPHORE POUR LE POULET DE CHAIR

Narcy Agnès¹, Reis Matheus², Khaksar Vahid³, Méda Bertrand¹,
Létourneau-Montminy Marie-Pierre⁴

¹ INRAE, Université de Tours, BOA, 37380 Nouzilly, France

² Trouw Nutrition R&D – El Viso de San Juan, 45215, Toledo, Espagne

³ ADM Animal Nutrition, Rue de l'Eglise, 02400 Chierry, France

⁴ Département des Sciences Animales, Université Laval, G1V 0A6, Québec, Canada

agnes.narcy@inrae.fr

RÉSUMÉ

Le phosphore (P) représente un élément essentiel à la croissance et à la minéralisation du tissu osseux chez le poulet de chair. Son apport doit donc être optimisé pour répondre aux besoins des animaux tout en maîtrisant les rejets et l'usage de phosphates minéraux. Pour répondre à ces enjeux, un nouveau système d'alimentation pour le P combinant des outils de modélisation mécaniste et empirique est proposé sur la base du phosphore digestible apparent. Tout d'abord, un modèle mécaniste, simulant le devenir du P alimentaire grâce à trois sous-modules (digestion, tissus mous et cendres), a été développé. Le module des tissus mous simule la croissance des protéines et des lipides. Le module des cendres simule la répartition du calcium (Ca) et du P absorbés dans les compartiments osseux, protéique et lipidique, ainsi que l'excrétion urinaire. Dans un deuxième temps, ces besoins doivent être satisfaits par la formulation des régimes, ce qui nécessite la connaissance de leur valeur en P digestible. Cette dernière doit tenir compte des interactions avec les autres composants de l'alimentation. Une équation empirique prédisant le P digestible iléal apparent et développée sur la base des données de la littérature a ainsi été évaluée *in vivo*. Elle permet de prendre en compte l'impact des différentes formes de P alimentaire et des teneurs en Ca et phytases exogènes, ainsi que de leurs interactions sur la digestibilité de P. Ce nouveau système permettant à la fois de caractériser les aliments pour leur valeur P et de prédire les réponses des animaux ouvre ainsi des perspectives en termes de formulation et d'alimentation de précision.

ABSTRACT

A new phosphorus feeding system for chicken nutrition

Phosphorus (P) is essential for growth and bone mineralization in broiler chickens. Its supply must therefore be optimized to meet animal requirements, while controlling excretion and the use of mineral phosphates. To tackle these challenges, a new feeding system for P combining mechanistic and empirical modeling tools is proposed based on apparent digestible phosphorus. Firstly, a mechanistic model has been developed, simulating the fate of dietary P through three sub-modules (digestion, soft tissue and ash). The soft tissue module simulates protein and lipid growth. The ash module simulates the distribution of absorbed calcium (Ca) and P in the bone, protein and lipid compartments, as well as urinary excretion. Secondly, these requirements must be met by the formulation of diets, which requires knowledge of their digestible P value. The latter must consider interactions with other dietary components. An empirical equation predicting the apparent ileal digestible P, developed based on literature data, has been evaluated *in vivo*. It considers the impact of different forms of dietary P, exogenous Ca and phytase contents, and their interactions on P digestibility. This new system, which both characterizes feeds for their P value and predicts animal responses, opens up new prospects in terms of formulation and precision feeding.

INTRODUCTION

Un apport alimentaire suffisant en phosphore (P) est nécessaire pour optimiser la croissance et l'intégrité du squelette. Sa teneur dans l'aliment doit donc être optimisée au regard des besoins des animaux tout en maîtrisant les rejets dans l'environnement et l'usage de phosphate minéral (Dourmad *et al.*, 2019). Dans ce contexte, une bonne prédiction des quantités de P alimentaire valorisable par l'animal ainsi qu'une estimation précise des besoins en P des animaux sont nécessaires.

Dans les systèmes d'alimentation actuels, une valeur P unique est fournie pour chaque ingrédient ou pour définir le besoin et ce, indépendamment des interactions avec les autres composants du régime alimentaire. C'est notamment le cas du calcium (Ca) qui intervient de façon majeure à la fois sur l'utilisation digestive et métabolique du P (Khaksar *et al.*, 2022 ; Létourneau *et al.*, 2010).

L'enjeu des nouveaux systèmes est donc de prendre en compte l'effet du calcium (Ca) en plus des différentes formes du P et de la phytase microbienne. Pour y répondre, un nouveau système combinant des outils de modélisation mécaniste et empirique est proposé, pour le poulet de chair, sur la base du phosphore digestible apparent.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Modélisation des besoins en phosphore

Un modèle de simulation du devenir métabolique de P et Ca alimentaire a, dans un premier temps, été développé (Reis *et al.*, 2023a). Le modèle est organisé en trois modules (Figure 1) : 1) un module digestif, qui prédit l'absorption de Ca et P alimentaires disponibles pour le dépôt dans les tissus (Khaksar *et al.*, 2022) ; 2) un module « tissus mous » qui simule la croissance des protéines, des lipides, des cendres et de l'eau (Reis *et al.*, 2023b) ; et 3) un module de cendres corporelles qui représente l'accumulation des minéraux dans les tissus mous et les os séparément (adapté de Létourneau-Montminy *et al.*, 2015). Ce modèle a ensuite été inversé, *i.e.* les entrées qui sont les apports phosphocalciques deviennent les sorties et les sorties qui étaient les dépôts de P et Ca dans les tissus deviennent les entrées (Figure 1). Une approche similaire a été réalisée chez le porc (Lautrou *et al.*, 2020). L'outil permet de prédire les besoins de P et Ca pour différents objectifs de minéralisation osseuse. Ces besoins sont exprimés en P et Ca digestible nécessitant une bonne prédiction de ces valeurs dans les aliments.

1.2. Raffinement de la prédiction du phosphore digestible des aliments

Sur la base des données de la littérature, une équation de prédiction du P digestible en fonction des teneurs de P phytique (PP), P non-phytique (PNP), Ca et phytase microbienne a précédemment été développée

(Khaksar *et al.*, 2022). Afin de tester la validité de la prédiction, une expérimentation *in vivo* a été réalisée. Selon l'équation de Khaksar *et al.* (2022), huit régimes contenant des niveaux croissants de P digestible (P_{dig}) ont été formulés en modulant la teneur en P non-phytique (PNP), Ca et phytase microbienne sur une plage comprise entre 2,1 à 4,2 g P_{dig} /kg (Narcy *et al.*, 2023). Au total, 576 poussins d'un jour ont été répartis dans 48 parquets à raison de six parquets par traitement et 12 poulets par parquet. Ils ont été nourris *ad libitum* jusqu'à 21 jours d'âge. L'aliment incluait un marqueur indigestible (célite) pour déterminer la digestibilité iléale du P (WPSA, 2013). La consommation et le poids vif ont été enregistrés au début et à la fin de l'expérimentation. Le contenu digestif de la moitié distale de l'iléon a été prélevé (8 pools de 8 animaux par traitement). Les teneurs en cendres insolubles (CI) et P des aliments et des contenus iléaux ont été déterminées par gravimétrie et dosage à l'ICP, respectivement, après mise en solution des éléments au four micro-onde. La digestibilité iléale apparente du P (DIA , %) et la teneur en P_{dig} de l'aliment (g/kg) ont ensuite été déterminés de la façon suivante :

$$DIA = 100 - [100 \times (CI_{aliment} \times P_{digesta}) / (CI_{digesta} \times P_{aliment})]$$

$$P_{dig} = DIA \times P_{aliment} / 100$$

où $CI_{aliment}$ et $CI_{digesta}$ représentent la teneur en cendres insolubles de l'aliment et du digesta iléal, $P_{digesta}$ et $P_{aliment}$, la teneur en P du digesta iléal et de l'aliment.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Simulation du devenir métabolique de phosphore en fonction de l'équilibre phosphocalcique de l'aliment

Sur la base du modèle mécaniste développé à l'échelle de l'animal, différentes situations alimentaires ont été simulées pour évaluer simultanément les dépôts au niveau des tissus mous et osseux ainsi que les excréments urinaire et fécale de P (Reis *et al.*, 2023a). Chez les poulets recevant un apport adéquat de P et des apports croissants de Ca (Figure 2A), le P dans les tissus mous est relativement constant, alors que le P dans les cendres osseuses augmente avec l'augmentation du Ca alimentaire. En l'absence de Ca, le P disponible ne peut être complètement déposé au niveau osseux. Les deux minéraux sont en effet intégrés conjointement à la trame minérale de l'os sous forme de cristaux d'hydroxyapatite ($Ca_5(PO_4)_3(OH)$). L'excès de P qui ne peut être déposé en raison d'un manque de Ca est excrété dans l'urine (Manangi *et al.*, 2018). La réduction des cendres osseuses chez les poulets ayant consommé un régime déficient en Ca alimentaire a été démontrée par Li *et al.* (2020) et par méta-analyse (Létourneau-Montminy *et al.*, 2010). De la même façon, la teneur en cendres osseuses est réduite chez les poulets ayant consommé

des aliments réduits en P pour une teneur constante en Ca (Figure 2B).

Lorsque les niveaux de PNP augmentent, avec une teneur en Ca alimentaire constante, l'excrétion de P augmente de façon linéaire, en accord avec la littérature (Proszkowiec-Weglarz et Angel, 2013). Les mécanismes d'absorption, d'excrétion et de dépôt de Ca et P sont complexes et ne sont pas complètement élucidés. Les variations de l'équilibre entre Ca et P dépendent des niveaux plasmatiques de Ca^{2+} et de phosphate, modulés par des hormones telles que l'hormone parathyroïdienne (PTH), les métabolites de la vitamine D et la calcitonine. Lorsque les taux plasmatiques de Ca^{2+} diminuent (hypocalcémie ou hypophosphatémie), la PTH est sécrétée dans le sang par les glandes parathyroïdes, ce qui augmente la conversion de la vitamine D dans le rein. La PTH et la vitamine D actives augmentent la résorption osseuse, et la vitamine D augmente la réabsorption du Ca dans les reins et l'absorption dans l'intestin (Proszkowiec-Weglarz et Angel, 2013). Les actions combinées augmentent les taux sanguins de Ca et l'excrétion de P (Combs et McClung, 2008 ; Proszkowiec-Weglarz et Angel, 2013). Les mécanismes régulant le métabolisme de P sont également influencés par la PTH et la vitamine D, avec des conséquences sur le métabolisme du P très similaires à celles mentionnées pour le Ca. Ainsi, un faible niveau de P dans le plasma diminuera l'excrétion de P mais augmentera l'excrétion de Ca dans les reins et augmentera l'absorption de P et de Ca dans l'intestin et la résorption osseuse.

La régulation de l'absorption de P et Ca doivent donc encore être incluses dans le modèle. Par conséquent, l'excrétion fécale de Ca peut être surestimée et l'excrétion urinaire de Ca sous-estimée dans les régimes fortement déficients en P. Enfin, l'excrétion fécale de P peut être surestimée, conduisant à une rétention plus faible de Ca.

2.2. Prédiction du phosphore digestible

La digestibilité iléale apparente de P était plus faible pour les régimes qui ne contenaient pas de phytase microbienne par rapport aux autres (Figure 3). En outre, la DIA du P était particulièrement élevée chez les oiseaux nourris avec B en raison de l'effet cumulatif de la phytase ajoutée (500 FTU) et de l'amélioration de l'absorption par le biais du processus de régulation décrit précédemment.

Comme prévu, la réduction de Ca de 2 g/kg dans les régimes contenant 1000 FTU de phytase microbienne / kg d'aliment (D vs. E) a amélioré de manière significative la DIA du P (de 61 à 72%) ainsi que la teneur en P digestible. Le flux le plus élevé de P absorbé a été observé avec G et H en raison du niveau réduit de Ca et de la présence de phytase microbienne. Les valeurs mesurées de P digestible étaient proches des valeurs attendues (Figure 3), sauf pour les régimes B et F, qui ont été respectivement sous-estimés et

surestimés. Pour le régime B, les processus de régulation peuvent avoir augmenté l'absorption de P à un niveau plus élevé que prévu dans la prédiction (moins d'expériences représentatives de ces processus dans la base de données de méta-analyse). De plus, l'équation sous-estime la digestibilité du P phytique (PP) dans les traitements les moins concentrés en P (Narcy *et al.*, 2023). Ceci s'explique par la capacité de l'oiseau à augmenter la dégradation de PP en cas d'apports insuffisants de Ca et P (McCuaig *et al.*, 1972; Applegate *et al.*, 2003; Shastak *et al.*, 2014). La prise en compte de la digestibilité mesurée du PP dans l'expérience permet néanmoins d'obtenir une prédiction précise (R^2 , 83 %). Pour le régime F, le phosphate pourrait avoir été moins digestible que prévu.

CONCLUSION

Le travail réalisé permet d'estimer la valeur en phosphore digestible des aliments destinés au poulet de chair en tenant compte des principales interactions avec les autres constituants de la matrice alimentaire, *i.e.* calcium et phytase microbienne. En parallèle, le développement d'un modèle de prédiction des besoins de l'animal permet de déterminer les apports optimaux de phosphore digestible en fonction des objectifs de formulation (croissance vs minéralisation vs rejets). Ce nouveau système ouvre ainsi des perspectives d'optimisation de l'utilisation de phosphore par le poulet de chair et est essentiel au développement d'approches d'alimentation de précision. Des travaux complémentaires de validation seront nécessaires avant l'implémentation de telles stratégies.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la société ADISSEO, et plus particulièrement Maamer Jali, pour son soutien dans le cadre des travaux relatifs à la prédiction du P digestible. Nous remercions également Clara Roselina Angel (U. Maryland, US) et Nilva Sakomura (UNESP, BR) pour leur contribution à la réflexion scientifique et le partage de données. Nous remercions Eric Gambier pour son aide technique et son expertise sur l'analyse élémentaire, ainsi que l'unité expérimentale PEAT, et plus particulièrement Nathalie Mème, Florine Pinault, Jérémy Bernard, Nicolas Besné et David Gourichon.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Applegate T. J., Angel R., Classen H. L., 2003. Poult. Sci., (82), 1140–1148.
- Combs Jr G.F., McClung J.P., 2008. Elsevier Academic Press, Burlington, MA, USA, 613 p.
- Dourmad J.-Y., Garcia-Launay F., Méda B., Lessire M., Narcy A., 2019. Nutrition and environmental sustainability. In Poultry and Pig Nutrition. Hendriks W.H., Verstegen M.W.A., Babinsky L., Wageningen Academic Publishers, 315–339.
- Khaksar V., Narcy A., Jlali M., Preynat A., Couture C., Létourneau-Montminy M.-P., 2022. 14^{èmes} Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, 175–179.
- Létourneau-Montminy M.-P., Narcy A., Dourmad J.-Y., Crenshaw T. D., Pomar C., 2015. J. Anim. Sci., (93), 1200–1217.
- Lautrou M., Pomar C., Dourmad J.-Y., Narcy A., Schmidely P., Létourneau-Montminy M.-P., 2020. Animal, (14), 313–322.
- Létourneau-Montminy M.-P., Narcy A., Lescoat P., Bernier J.F., Magnin M., Pomar C., Nys Y., Sauvant D., Jondreville C., 2010. Animal, (4), 1844–1853.
- Li T., Xing G., Shao Y., Zhang L., Li S., Lu L., Liu Z., Liao X., Luo X., 2020. Poult. Sci., (99), 3207–3214.
- Manangi M. K., Maharjan P., Coon C. N., 2018. Poult. Sci., (97), 2798–2806.
- McCuaig L.W., Davies M.I., Motzok I., 1972. Poult. Sci. (51), 526–530.
- Narcy A., Khaksar V., Preynat A., Jlali M., Létourneau-Montminy M.-P., 2023. 23rd European Symposium on Poultry Nutrition, Rimini, Italy, 89.
- Proszkowiec-Weglarz M., Angel R., 2013. J. Appl. Poult. Res., (22), 609–627.
- Reis M. P., Couture C., Sakomura N. K., Hauschild L., Angel C., Narcy A., Létourneau-Montminy, M.-P., 2023a. Animal, *in press*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100896>.
- Reis M.P., Gous R.M., Hauschild L., Sakomura N.K. 2023b. Animal, 101016.
- Shastak Y., Zeller E., Witzig M., Schollenberger M., 2014. Poult. Sci., (93), 2548–2559.
- WPSA Working group 2 -nutrition- of the European federation, 2013. World's Poult. Sci. J., (69), 687–698.

Figure 1. Diagramme de prédiction des besoins de phosphore (P) et calcium (Ca) basé sur l'inversion du modèle de Reis *et al.* (2023a).

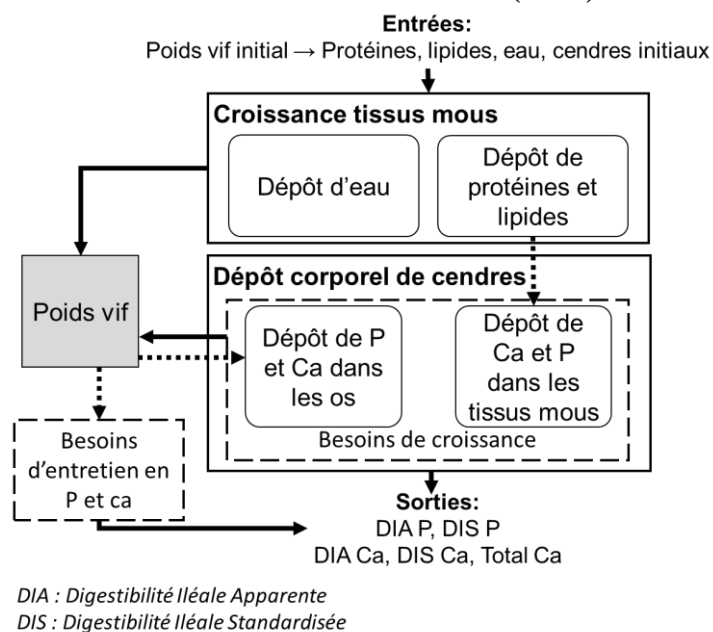


Figure 2. Evaluation des dépôts au niveau des tissus mous et osseux, ainsi que des rejets urinaires et fécaux de phosphore du poulet de chair consommant A) des niveaux croissants de calcium alimentaire (de 2,3 à 9,0 g/kg) avec un niveau de phosphore non-phytique constant (4,5 g/kg) ou B) des niveaux croissants de phosphore non-phytique (de 1,1 à 4,5 g/kg) avec un apport constant de calcium (9 g/kg) (d'après Reis *et al.*, 2023a).

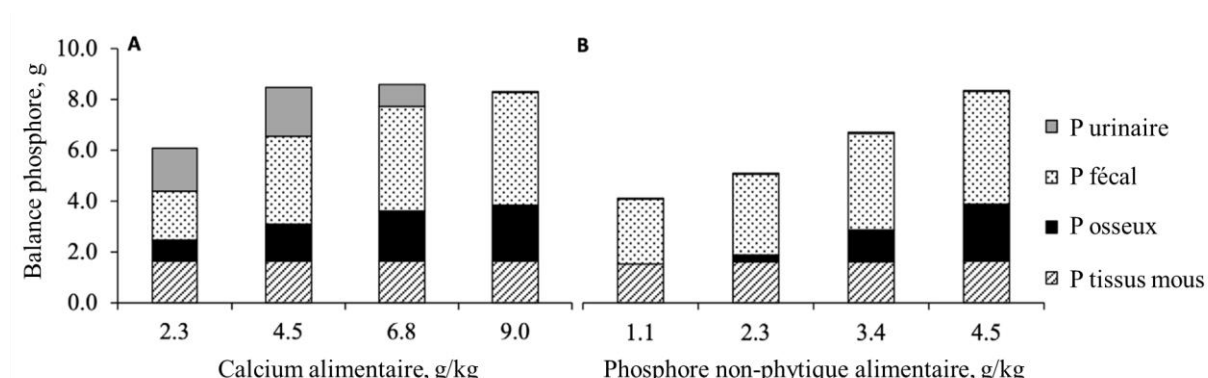
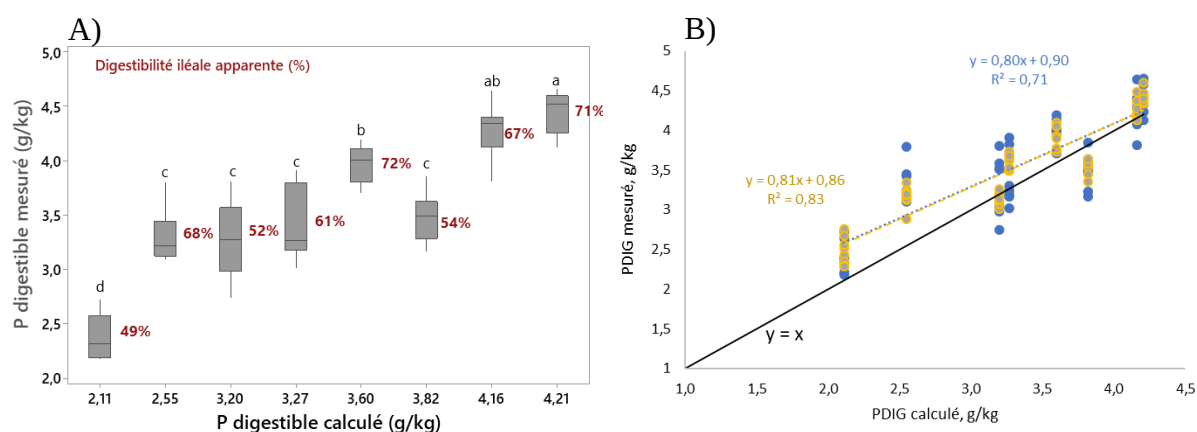


Figure 3. Phosphore digestible mesuré (g/kg) et digestibilité iléale apparente de P (%) en fonction des huit régimes expérimentaux (A) et relation entre le phosphore digestible formulé et le phosphore digestible mesuré (g/kg ; B) chez les poulets de 21 jours d'âge.



Régimes	A	B	C	D	E	F	G	H
PNP, g/kg	2	2	3,25	3	3	4	4	4
Ca, g/kg	8,0	8,0	8,0	8,0	6,0	5,5	5,5	5,5
Phytase, FTU/kg	0	500	0	1000	1000	0	500	1000

PNP : phosphore non-phytique
Ca : calcium