

MÉTA-ANALYSE DE LA DIGESTIBILITÉ ILÉALE DU PHOSPHORE CHEZ LE POULET DE CHAIR : EFFET DU PHOSPHORE ALIMENTAIRE, DU CALCIUM ET DE LA PHYTASE

Couture Catherine¹, Narcy Agnès², Chiasson Rachel¹, Létourneau-Montminy Marie-Pierre¹

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

²UMR BOA - INRA - Université de Tours - UR83 Recherches Avicoles - 37380 NOUZILLY (France)

marie-pierre.letourneau@fsaa.ulaval.ca

RÉSUMÉ

Un des éléments clé d'une production avicole durable est une utilisation optimale du phosphore (P) alimentaire compte tenu de ses enjeux environnementaux. L'optimisation de l'utilisation de P nécessite d'améliorer d'une part la prédiction de la quantité de P absorbée et retenue en tenant compte des principaux facteurs de modulation et d'autre part la connaissance des besoins. Une méta-analyse a été réalisée afin de quantifier l'impact des formes alimentaires de P (P non-phytique (PNP) et P phytique (PP)), de l'apport de calcium (Ca) et de phytase microbienne (PhytM) sur la digestibilité iléale apparente de P chez le poulet de chair. Une base de données comportant 480 traitements provenant de 95 expériences dans 59 articles publiés a été utilisée et une sous-base sans phytase a aussi été créée à partir de cette dernière. Un modèle de régression linéaire multiple du P digestible (P total x Coefficient de digestibilité iléale apparente (DIA), g/kg) avec l'expérience en effet aléatoire ($R^2 = 0,94$) a montré qu'en l'absence de phytase, les DIA de P sont de 70% pour le phosphate monocalcique, 69% pour le P d'origine animale, 66% pour le PNP végétal et 55% pour le phosphate bicalcique. Lorsque PNP est exprimé comme la somme des sources végétale, minérale et animale, un effet linéaire est observé sur P digestible ($P < 0,001$). La DIA de PP dépend du niveau de Ca (Ca x PP, $P < 0,001$); montrant une DIA de 23% pour 10 g Ca/kg et 45% pour 6 g Ca/kg. Le Ca alimentaire réduit la DIA de PNP et de PP (Ca x PNP et Ca x PP, $P < 0,001$). La réponse en termes de P digestible à l'ajout de PhytM est quadratique et dépend de la quantité de substrat (PP x PhytM, $P = 0,002$) et aussi de l'apport de Ca (Ca x PP x PhytM, $P < 0,001$) avec une réponse en termes de P digestible à la PhytM plus importante dans le cas d'aliments riches en PP et en Ca. Cette méta-analyse permet de mieux comprendre et quantifier l'utilisation digestive de P alimentaire. Les informations générées seront utiles pour le développement d'un modèle permettant la formulation d'aliments prenant en compte les multiples interactions entre P, Ca et PhytM pour le poulet de chair.

ABSTRACT

Meta-analysis of phosphorus ileal digestibility in growing broilers: effect of dietary phosphorus, calcium and phytase supply

One of the key elements to achieve sustainable poultry production is an optimal utilisation of dietary phosphorus (P) given its environmental challenges. Optimizing the use of P requires, on the one hand, improving the prediction of the amount of absorbed and retained P taking into account the main modulation factors and, on the other hand, the knowledge of P requirements. A meta-analysis was performed to quantify the impact of dietary P (Non-phytic P (PNP) and Phytic P (PP)), calcium (Ca) and microbial phytase (PhytM) on apparent ileal digestibility of P in broilers. A database of 480 treatments from 95 experiments in 59 published articles was used. A linear multiple regression model of digestible P (total P x apparent ileal digestibility coefficient (DIA), g / kg) with the experiment as random effect ($R^2 = 0.94$) showed that in the absence of phytase DIA are 70% for PNP from monocalcium phosphate, 69% for animal PNP, 66% for plant PNP, and 55% for PNP from dicalcium phosphate. The DIA of PP depends on the level of Ca (Ca x PP, $P < 0.001$); showing an DIA of 23% for 10 g Ca / kg and 45% for 6 g Ca / kg. In the global database with phytase, when PNP is expressed as the sum of plant, mineral and animal sources, a linear effect is observed on digestible P ($P < 0.001$). Dietary Ca reduces the DIA of PNP and PP (Ca x PNP and Ca x PP, $P < 0.001$). The response in terms of digestible P with the addition of PhytM is quadratic and depends on the amount of substrate (PP x PhytM, $P = 0.002$). This effect is influenced by the intake of Ca (Ca x PP x PhytM, $P < 0.001$) and shows that the response in terms of P digestible to PhytM increases with high PP and Ca diet. This meta-analysis gives a better understanding and quantifying of the utilisation of dietary P. The information generated will be useful for the development of a model helping with feed formulation for broilers in P, Ca and PhytM.

INTRODUCTION

Compte tenu de l'impact négatif que peut avoir le phosphore (P) sur l'environnement et du prix des phosphates qui demeure élevé et le fait que cette ressource soit non-renouvelable (Cordell et al., 2009), l'optimisation de son utilisation par les poulets est essentielle dans un contexte d'amélioration de la durabilité de cette production. Afin d'optimiser l'utilisation de P par les poulets, il est d'une part, important d'améliorer notre capacité à prédire les quantités absorbées et retenues en considérant les principaux facteurs influents, notamment les formes alimentaires de P, les niveaux d'apports de P et de calcium (Ca) et le potentiel génétique de minéralisation osseuse. Le présent travail a pour objectif d'affiner la prédiction de l'absorption de P en prenant en compte les facteurs de modulation les plus importants. Le nombre élevé de données publiées de digestibilité iléale depuis la standardisation de leur mesure au niveau international (Rodehutscord, 2013) favorise l'utilisation de la méta-analyse pour résumer et quantifier les connaissances acquises précédemment (Sauvant et al., 2008).

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Collecte de données et codage

Des articles présentant des résultats de digestibilité iléale de P chez le poulet de chair entre 2000 et 2017 ont été utilisés. La base de données inclut des informations générales (ex. : noms des auteurs, année de publication, journal scientifique) et des données qualitatives (ex. : génétique, sexe, type d'aliment) et quantitatives (ex. : composition de l'aliment, digestibilité de P, performances de croissance) sur ces publications. Elle comporte 480 traitements provenant de 95 expériences issues de 59 articles publiés. Une sous-base sans phytase a été créée pour estimer la digestibilité des différentes formes de P et comportait 323 traitements et 80 expériences issues de 48 articles publiés. Chaque publication dans la base de données possède un code unique. En présence de plus d'une expérience dans une même publication, un code spécifique était assigné à chaque expérience. Une observation représente la moyenne du groupe par traitement.

1.2. Calculs et détermination des variables dépendantes et indépendantes

Pour chaque aliment expérimental, le Ca total alimentaire, le Ca végétal (Cav), minéral (Camin) et animal (Caanim), le P total alimentaire, le P phytique (PP), le P non-phytique (PNP) ainsi que le PNP végétal (PNPv), minéral (PNPmin) et animal

(PNPanim) ont été recalculés (Sauvant et al., 2004). Lorsqu'un ingrédient utilisé dans un aliment expérimental était analysé, cette valeur était préférentiellement considérée. Pour les ingrédients absents, les données des bases Feedipedia et Feedbase étaient utilisées. Un peu plus de la moitié (56%) des traitements expérimentaux étaient supplémentés en phosphate (59% sous la forme de phosphate bicalcique et 41% sous la forme de phosphate monocalcique) et 8% contenaient du P animal sous forme de farine de viande et d'os. Sur les 480 traitements, 116 étaient supplémentés en phytase microbienne (PhytM).

Les variables indépendantes suivantes ont été utilisées : Ca total alimentaire (g/kg d'aliment), formes d'apports de P et PhytM (FTU/kg d'aliment). La variable à prédire était le P digestible (g/kg).

1.3. Analyses statistiques et du méta-dispositif

Les statistiques descriptives des différentes variables du modèle sont présentées dans le Tableau 1. Une analyse du méta-dispositif a été faite en étudiant graphiquement les variables indépendantes deux à deux. Celle-ci a permis de vérifier l'étendue des données, de déceler les valeurs aberrantes et de vérifier s'il y avait des colinéarités entre les différentes variables indépendantes. Une analyse graphique de l'effet intra- et inter-expérience du P digestible en fonction de la variable indépendante la plus influente (PNPtot) a ensuite été réalisée. Les données ont été analysées au moyen de la procédure mixed de Minitab (2018). L'expérience a été introduite dans le modèle comme un effet aléatoire. Basé sur un examen graphique de la réponse intra-expérience un modèle quadratique a été ajusté comme suit:

$$Y_{ij} = \alpha + \alpha_i + b_1 X_{ij} + b_2 X_{ij}^2 + e_{ij}$$

où Y_{ij} est la valeur de la variable dépendante Y dans l'expérience i avec le traitement j de P alimentaire; α est l'ordonnée à l'origine globale; α_i est l'effet de l'expérience i sur l'ordonnée à l'origine α avec la condition que la somme de chaque α_i soit égale à 0; b_1 et b_2 sont les coefficients linéaires et quadratiques de la relation, respectivement; et e_{ij} est l'erreur résiduelle. Le modèle quadratique a également été ajusté aux données en incluant le produit croisé de chaque variable dépendante. Toutes les variables jugées significatives ou en tendance ($P < 0,10$) ont été conservées et les interactions entre ces variables ont été testées.

La normalité des résidus a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Les valeurs aberrantes ont été identifiées d'abord sur la base des résidus, puis de la distance de Cook et de la méthode DFITS.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Effets des niveaux de phosphore phytique et non-phytique et du calcium sur le phosphore digestible

L'augmentation de l'apport de PP augmente le P digestible de façon linéaire ($P < 0,001$; Tableau 2), effet qui dépend du niveau de Ca (PP x Ca, $P < 0,001$) conformément à de précédents travaux (Tamim et al., 2004 ; McCuaig et al., 1972) dans lesquels on observait une formation de complexes Ca-PP et une diminution de l'activité de la phosphatase alcaline intestinale et de l'activité de la phytase intestinale résultant en une réduction de l'hydrolyse de PP à haut niveau de Ca. Le PP est partiellement digestible pour le poulet, et ce, d'autant plus que l'apport de Ca est faible ; pour un apport de 2,3 g/kg de PP la digestibilité de PP sera de 45% avec 6 g Ca/kg de Ca et de 23% avec 10 g Ca/kg. Ce résultat illustre la baisse de disponibilité de PP du fait de sa propension à former des complexes Ca-phytate non hydrolysables (Selle et al., 2009a). De plus, des niveaux élevés de Ca diminuent l'activité de la phytase endogène de la muqueuse intestinale des poulets de chair (Applegate et al., 2003).

La relation entre le P digestible et le PNP est linéaire ($P < 0,001$; Tableau 2). Cette relation linéaire montre que l'absorption intestinale de P provenant de PNP n'est pas limitée dans les plages de la base de données, possiblement car près de la moitié des traitements ne contenaient pas de phosphates. L'augmentation de l'apport de Ca diminue la digestibilité de PNP, et ce, d'autant plus que PNP est élevé (Ca, Ca x Ca, Ca x PNP, $P < 0,001$; Figure 1). Le Ca peut se lier aux molécules de P (Heaney et Nordin, 2002; Selle et al., 2009a) et l'insolubiliser limitant ainsi son absorption. Cependant, l'effet du Ca sur le P digestible est plus marqué à haut niveau de PNP alimentaire (Figure 1). Ce résultat s'expliquerait par le fait qu'une carence en P provoquerait des régulations qui se traduiraient par une capacité d'absorption de P accrue et donc une moindre susceptibilité à la formation de complexes phosphocalciques (Rousseau et al., 2016).

2.2. Effet de la phytase microbienne et de ses interactions sur le phosphore digestible

L'augmentation de l'apport de phytase augmente la digestibilité de P de façon linéaire et quadratique ($P < 0,001$). L'effet de la phytase ne dépend pas de la teneur en PNP confirmant que l'absorption n'est pas saturée. L'effet de la phytase dépend de la quantité de PP, son substrat (PP x Phyt, $P < 0,001$) ; plus il y a

de substrat plus la phytase apporte de P digestible. Cette relation est cependant dépendante de l'apport de Ca (Ca x PP x PhytM, $P < 0,001$), montrant que plus il y a du Ca et du PP dans l'aliment, plus l'effet de la phytase est élevé en raison d'une quantité plus élevée de substrat (PP soluble) pouvant être hydrolysé par l'enzyme. Dans des aliments riches en Ca et PP, la phytase apporte davantage de P digestible. Par exemple, l'ajout de 500 FTU/kg de phytase dans un aliment apportant 2,5 g PP et 10 g Ca/kg apportera 11% plus de P digestible comparativement à un aliment contenant 6 g Ca/kg. Dans des aliments sans phytase microbienne, le Ca réduirait le P digestible apporté par PP en raison d'une moindre efficacité de la phytase endogène. Le fait que l'effet soit inversé pour la phytase microbienne pourrait provenir d'une moindre production de phytase par la muqueuse proximale de l'intestin lorsque le Ca est élevé (Applegate et al., 2003) laissant ainsi davantage de substrat à hydrolyser pour la phytase microbienne.

2.3. Digestibilité iléale des différentes formes de P

L'objectif de ce travail était également d'estimer la digestibilité iléale des formes d'apports de P. Les résultats montrent une digestibilité élevée de toutes les formes de PNP avec le phosphate monocalcique et les farines de viande qui présentent les digestibilités les plus élevées (70 et 69% respectivement ; Tableau 3) suivis du PNP d'origine végétale (66%) et du phosphate bicalcique (55%). Cette hiérarchie est cohérente avec les valeurs biologiques relatives publiées pour les phosphates (Sauvant et al., 2004), mais il n'existe pas de données publiées pour celle du PNP végétal. Une approche similaire chez le porc montre également une digestibilité élevée de PNP végétal (Létourneau-Montminy et al., 2012).

CONCLUSION

Le présent travail permet d'estimer le P digestible chez le poulet de chair en prenant en considération différents facteurs de modulation tel que les différentes formes de P, le Ca total et la présence de phytase microbienne. Cette équation sera incluse dans un modèle mécaniste (Couture et al., 2019) du devenir de P alimentaire chez les poulets de chair permettant ainsi de prendre en compte les interactions digestives du Ca et du P, entres autres en formulation d'aliment sur le terrain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdollahi M.R., Ravindran V., Svihus B., 2013. Anim. Feed Sci. Technol., (186), 193–203.
- Adedokun S.A., Sands J.S., Adeola O., 2004. Can. J. Anim. Sci., (84), 437–444.
- Adeola O., Walk C.L., 2013. Poult. Sci., (92), 2109–2117.
- AFZ, CEREOPA. 2013. Feedbase -Economic and technical feed data. www.feedbase.com
- Amerah A.M., 2014. Poult. Sci., (93), 906–915.
- Amerah A. M., Ravindran V., 2009. Anim. Prod. Sci. (49), 704–710.
- Applegate T. J., Angel R., Classen H.L., 2003. Poult. Sci., (82), 1140–1148.
- Bahadoran R., Gheisari A., Toghyani M., 2011. African J. Biotechnol., (10), 6655–6662.
- Bikker P., Spek J.W., Van Emous R.A., Van Krimpen M.M., 2016. Br. Poult. Sci., (57), 810–817.
- Cordell D., Drangert J.O., White S., 2009. Glob. Environ. Chang., (19), 292–305.
- Couture C., Méda B., Narcy A., Létourneau-Montminy M.-P., 2019. Journées de la Recherche avicole et Palmipèdes à foie gras, (13), sous presse.
- Cowieson A. J., Adeola O., 2005. Poult. Sci., (84), 1860–1867.
- Dilger R. N., Adeola O., 2006. Poult. Sci., (85), 661–668.
- Dilger R. N., Onyango E. M., Sands J. S., Adeola O., 2004. Poult. Sci., (83), 962–970.
- Heaney R.P., Nordin B.E.C., 2002. J. Am. Coll. Nutr., (21), 239–244.
- Igbasan F. A., Simon O., Miksch G., Manner K., 2001. Arch. für Tierernaehrung, (54), 117–126.
- INRA CIRAD AFZ, FAO. 2017. Feedipedia - Animal Feed Resources Information System. www.feedipedia.org
- Iyayi E. A., Fru-Nji F., Adeola O., 2013. Poult. Sci., (92), 1595–1603.
- Khodambashi Emami N., Zafari Naeinib S., Ruiz-Feria C.A., 2013. Livest. Sci., (157), 506–513.
- Kiarie E., Woyengo T., Nyachoti C.M., 2015. Asian-Australas. J. Anim. Sci., (28), 1479–1487.
- Létourneau-Montminy M.P., Jondreville C., Sauviant D., Narcy A., 2012. Animal, (6), 1590–1600.
- Leytem A. B., Widyaratne G.P., Thacker P.A., 2008. Poult. Sci., (87), 2466–2476.
- Liu J. B., Chen D.W., Adeola O., 2013. Poult. Sci., (92), 1572–1578.
- Liu N., Ru Y., Wang J., Xu T., 2010. Br. J. Nutr., (103), 862–868.
- Lu H., Adedokun S.A., Preynat A., Legrand-Defretin V., Geraert P.A., Adeola O., Ajuwon K.M., 2013. Can. J. Anim. Sci., (93), 243–249.
- Manobhavan M., Elangovan A.V., Sridhar M., Shet D., Ajith S., Pal D.T., Gowda N.K., 2016. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.), (100), 93–100.
- Mccormick K., Walk C.L., Wyatt C.L., Adeola O., 2017. Anim. Nutr., (3), 77–84.
- McCuaig L. W., Motzok I., 1972. Can. J. Physiol. Pharmacol., (50), 1152–1156.
- Mutucumarana R. K., Ravindran V., Ravindran G., Cowieson A.J., 2014a. J. Anim. Sci., (92), 5520–5529.
- Mutucumarana R. K., 2014b. Poult. Sci., (93), 412–419.
- Mutucumarana R. K., Ravindran V., Ravindran G., Cowieson A.J., 2014c. J. Poult. Sci., (51), 392–401.
- Mutucumarana R. K., Ravindran V., Ravindran G., Cowieson A.J., 2015a. Anim. Feed Sci. Technol., (206), 76–86.
- Mutucumarana R. K., Ravindran V., Ravindran G., Cowieson A.J., 2015b. Poult. Sci., (94), 1611–1618.
- Mutucumarana R. K., Ravindran V., 2016. Anim. Feed Sci. Technol., (219), 249–256.
- Naderinejad S., Zaefarian F., Abdollahi M.R., Hassanabadi A., Kermanshahi H., Ravindran V., 2016. Anim. Feed Sci. Technol., (215), 92–104.
- Olukosi O. A., Cowieson A.J., Adeola O., 2007. Poult. Sci., (86), 77–86.
- Olukosi O. A., Combémoré C., Kightley S., Wiseman J., Houdijka J.G.M., 2015. Livest. Sci., (182), 8–10.
- Onyango E. M., Bedford M.R., Adeola O., 2005. Poult. Sci. (84), 248–255.
- Pereira L. F. P., Adeola O., 2016. Poult. Sci. (95), 2081–2089.
- Perryman K. R., Massey O'Neill H.V., Bedford M.R., Dozier III W.A., 2016. Poult. Sci. (95), 1077–1087.
- Perryman, K. R., Massey O'Neill H.V., Bedford M.R., Dozier III W.A., 2017. Poult. Sci. (96), 611–621.
- Powell S., Bidner T.D., Southern L.L., 2011. Poult. Sci., (90), 604–608.
- Ravindran V., Cabahug S., Ravindran G., Selle P.H., Bryden W.L., 2000. Br. Poult. Sci., (41), 193–200.
- Ravindran V., Morel P.C., Partridge G.G., Hruby M., Sands J.S., 2006. Poult. Sci., (85), 82–89.
- Ravindran V., Wu Y.B., Hendriks W.H., 2004. Arch. Anim. Nutr. (58), 405–411.
- Rodehutscord M., 2013. World's Poult. Sci. J., (69), 687–698.
- Rodehutscord M., Adeola O., Angel R., Bikker P., Delezie E., Dozier III W.A., Umar Faruk M., Francesch M., Kwakernaak C., Narcy A., Nyachoti C.M., Olukosi O.A., Preynat A., Renouf B., Saiz del Barrio A., Schedle K., Siegert W., Steinfeldt S., van Krimpen M.M., Waititu S.M., Witzig M., 2017. Poult. Sci. (96), 1679–1687.
- Rousseau X., Valable A.-S., Létourneau-Montminy M.-P., Mème N., Godet E., Magnin M., Nys Y., Duclos M.J., Narcy A., 2016. Poult. Sci., (95), 2849–2860.
- Rutherford S. M., Chung T.K., Moughan P.J., 2002. Br. Poult. Sci., (44), 598–606.
- Santos F. R., Hruby M., Pierson E.E.M., Remus J.C., Sakomura N.K., 2008. J. Appl. Poult. Res., (17), 191–201.
- Sauvant D., Peres J.-M., Tran G., 2004. INRA, Association Française de Zootechnie, Paris, France, pp304.
- Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., St-Pierre N.R., 2008. Animal, (2), 1203–1214.
- Schmeisser J., Séon A., Aureli R., Friedel A., Guggenbuhl P., Duval S., Cowieson A.J., Fru-Nji F., 2017. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.), (101), 563–575.

- Selle P.H., Cowieson A.J., Ravindran V., 2009a. *Livest. Sci.*, (124), 126–141.
- Selle P. H., Ravindran V., Partridge G.G., 2009b. *Anim. Feed Sci. Technol.*, (153), 303–313.
- Shastak Y., Witzig M., Hartung K., Rodehutsord M., 2012. *Poult. Sci.*, (91), 2201–2209.
- Shastak Y., Zeller E., Witzig M., Schollenberger M., Rodehutsord M., 2014. *Poult. Sci.*, (93), 2548–2559.
- Tamim N.M., Angel R., Christman M., 2004. *Poult. Sci.*, (83), 1358–1367.
- Tancharoenrat, P., Ravindran V., 2014. *Poult. Sci.* (93), 1453–1462.
- Valaja J., Perttilä S., Partanen K., 2001. *Agric. Food Sci. Finl.*, (10), 19–26.
- Van Harn J, Spek J.W., van Vuure C.A., van Krimpen M.M., 2017. *Poult. Sci.*, (96), 1334–1340.
- Walk C. L., Addo-Chidie E.K., Bedford M.R., Adeola O., 2012a. *Poult. Sci.*, (91), 2255–2263.
- Walk C. L., Bedford M.R., McElroy A.P., 2012b. *Poult. Sci.*, (91), 1371–1378.
- Wilkinson S. J., Bradbury E.J., Thomson P.C., Bedford M.R., Cowieson A.J., 2014. *Animal*, (8), 1080–1088.
- Witzig M., Ingelmann C.J., Möhring J., Rodehutsord M., 2018. *Poult. Sci.*, (97), 910–919.
- Woyengo T. A., Emiola, A., Owusu-Asiedu A., Guenter W., Simmins P.H., Nyachoti C.M., 2010a. *Can. J. Anim. Sci.*, (90), 529–536.
- Woyengo T. A., Slominski B.A., Jones R.O., 2010b. *Poult. Sci.*, (89), 2221–2229.
- Woyengo T. A., Emiola, A., Owusu-Asiedu A., Guenter W., Simmins P.H., Nyachoti C.M., 2010c. *J. Poult. Sci.*, (47), 310–315.
- Wu Y. B., Ravindran V., Hendriks W.H., 2004. *J. Sci. Food Agric.*, (84), 1817–1822.
- Wu Y. B., Ravindran V., Hendriks W.H., 2003. *Br. Poult. Sci.*, (44), 710–718.
- Xue P. C., Ajuwon K.M., Adeola O., 2016. *Poult. Sci.*, (95), 2615–2623.
- Zaefarian F., Romero L.F., Ravindran V., 2013. *Br. Poult. Sci.*, (54), 653–660.

Tableau 1. Statistiques descriptives de la base de données^a

	<i>n</i>	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Variable dépendante					
P digestible (g/kg)	480	2,49	0,99	0,12	5,37
Variables indépendantes					
Ca (g/kg)	480	6,77	3,23	0,30	14,90
P total (g/kg)	480	4,51	1,78	0,52	9,30
P phytique (g/kg)	480	1,96	0,80	0,00	3,72
P Non-Phytique (g/kg)	480	2,54	1,37	0,13	8,12
P Non-Phytique végétal (g/kg)	480	1,09	0,42	0,01	2,62
P Non-Phytique minéral (g/kg)	480	1,15	1,27	0,00	7,57
P Non-Phytique monocalcique (g/kg)	480	0,42	0,96	0,00	7,57
P Non-Phytique bicalcique (g/kg)	480	0,71	1,15	0,00	4,48
P Non-Phytique animal (g/kg)	480	0,30	0,87	0,00	5,15
Phytase Microbienne (FTU/kg)	116	731	268	213	1352

^a Les publications utilisées sont dans la liste de références**Tableau 2.** Prédiction du P digestible en fonction de PNP (g/kg), PP (g/kg), PhytM (FTU/kg) et Ca (g/kg)

Paramètres du modèle	P digestible (g/kg)		
	Coefficient	Erreur type	P-value
Ordonnée à l'origine	-0,091	0,114	NS
Ca	-0,108	0,032	0,001
PP	0,783	0,069	< 0,001
PNP	0,928	0,066	< 0,001
PhytM ^a	1,732	0,388	< 0,001
Ca ²	0,013	0,003	< 0,001
PhytM ²	-0,638	0,158	< 0,001
Ca x PP	-0,056	0,010	< 0,001
Ca x PNP	-0,032	0,007	< 0,001
Ca x PhytM	-0,166	0,058	0,005
PP x PhytM	-0,364	0,161	0,02
Ca x PP x PhytM	0,088	0,024	< 0,001
R ²		0,94	
RMSE		0,260	

P = phosphore ; PNP = P non-phytique ; PP = P phytique ; PhytM = phytase microbienne ; Ca = calcium ; R² = coefficient de détermination ; RMSE = Root mean square error.

^a PhytM est exprimé en 1000 FTU/kg d'aliment ; FTU, unité phytasique

Tableau 3. Prédiction du P digestible en fonction des formes d'apports de phosphore

Paramètres du modèle	P digestible (g/kg)		
	Coefficient	Erreur type	P-value
Ordonnée à l'origine	0,157	0,114	NS
Ca	-0,0765	0,0114	<0,001
PP	0,534	0,0681	<0,001
P Non-Phytique végétal	0,655	0,128	<0,001
P Non-Phytique monocalcique (g/kg)	0,696	0,0288	<0,001
P Non-Phytique bicalcique (g/kg)	0,555	0,0282	<0,001
P Non-Phytique animal (g/kg)	0,694	0,0433	<0,001
R ²		0,94	
RMSE		0,271	

R² = coefficient de détermination ; RMSE = Root mean square error.

Figure 1. Phosphore digestible (g/kg) en fonction du P non-phytique (PNP, g/kg), de la phytase microbienne (PhytM, FTU/kg) et du calcium pour un apport de P phytique de 2 g/kg.

