

ÉTUDE DE LA CINÉTIQUE D'UTILISATION DIGESTIVE DU PHOSPHORE ET DU CALCIUM CHEZ LA POULE PONDEUSE

Hervo Fabien^{1,2}, Méda Bertrand², Létourneau-Montminy Marie-Pierre¹, Narcy Agnès²

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

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

fabien.hervo@inrae.fr

RÉSUMÉ

Améliorer la compréhension des facteurs influençant l'utilisation digestive du phosphore (P) et du calcium (Ca) chez les poules pondeuses contribue à optimiser les apports, réduire les rejets de P et limiter les troubles osseux liés à l'âge. Dans le tractus gastro-intestinal, le Ca pourrait former *de novo* des complexes avec l'acide phytique limitant l'efficacité de la phytase microbienne (PhytM). Cette étude visait à étudier l'effet de la taille des particules de CaCO₃ sur l'utilisation digestive du P et Ca dans des régimes supplémentés ou non en PhytM. Soixante-douze poules pondeuses Lohmann Tradition (30 semaines d'âge) ont reçu l'un des 4 traitements alimentaires durant 4 semaines (18 poules/traitement) formulés selon 2 niveaux de PhytM, 0 ou 300 FTU/kg et 2 formes de présentation du Ca (fCa), des fines particules (CaF) ou un mélange (MIX) de particules grossières (CaP, 75 %) et de CaF (25 %). À la fin de l'essai, le temps moyen de rétention de la matière sèche (TMR) dans le jabot, gésier, duodénum, jéjunum et iléon, la digestibilité iléale apparente (DIA) du P et Ca, et la disparition du P phytique ont été mesurés. Les cinétiques d'absorption du P et Ca ont ensuite été modélisées. En présence de PhytM, le MIX a diminué le TMR dans l'intestin (PhytM × fCa ; $P < 0,05$) et ralenti la cinétique d'absorption du Ca, conduisant à une augmentation de la DIA du Ca de 7,3 points (PhytM × fCa ; $P < 0,001$). En présence de PhytM, le CaF a réduit la DIA du P de 35 % (PhytM × fCa ; $P < 0,001$), ralenti la cinétique d'absorption de P et réduit la disparition du PP de 19 % (PhytM × fCa ; $P < 0,05$). Ces résultats montrent que l'incorporation de particules grossières de carbonate de Ca permet d'améliorer l'utilisation digestive du Ca et du P, en potentialisant l'action de la PhytM.

ABSTRACT

KINETICS OF DIGESTIVE UTILISATION OF PHOSPHORUS AND CALCIUM IN LAYING HENS. Improving our knowledge of factors impacting the digestive utilization of phosphorus (P) and calcium (Ca) in laying hens could help to optimise minerals supply, reduce P excretion and limit age-related bone disorders. Along the gastrointestinal tract (GIT), Ca could form *de novo* complexes with phytic acid, limiting microbial phytase (MPhyt) activity. The aim of this study was to investigate the effect of limestone particle size on the digestive utilisation of P and Ca in diets supplemented or not with MPhyt. Seventy-two Lohmann Tradition laying hens (30 week of age) were randomly allocated to 4 treatments (18 hens/treatment) for 4 weeks: with 2 levels of MPhyt, 0 or 300 FTU/kg and 2 presentation forms of Ca (fCa), fine particles (FLP) or a mix (MIX) of coarse particles (CLP, 75%) and FLP (25%). At the end of the trial, the mean retention time of dry matter (MRT) in the crop, gizzard, duodenum, jejunum and ileum, the apparent ileal digestibility (AID) of P and Ca and the phytic P disappearance were measured. Then, P and Ca uptake kinetics were modelled. In the presence of MPhyt, the MIX decreased the MRT in the intestine (MPhyt × fCa ; $P < 0.05$), slowed the Ca absorption kinetics, and consequently increase the AID of Ca by 7.3 points (MPhyt × fCa ; $P < 0.001$). In the presence of MPhyt, FLP reduced the AID of P by 35% (MPhyt × fCa ; $P < 0.001$), slowed the kinetics of P uptake and reduced the disappearance of PP by 19% (MPhyt × fCa ; $P < 0.05$). These results demonstrated that incorporating LP improves the digestive utilisation of Ca and P, by potentiating the action of MPhyt.

INTRODUCTION

L'utilisation digestive des minéraux regroupe les processus de solubilisation (Zhang et Coon, 1997), d'hydrolyse de l'acide phytique avec libération du phosphore phytique (PP) par la phytase microbienne (PhytM ; Angel *et al.*, 2002), du transit le long du tractus gastro-intestinal (TGI) et d'absorption le long de l'intestin grêle (Hurwitz et Bar, 1965). Tous ces processus dépendent fortement de la composition de l'aliment, le Ca pouvant former des complexes avec le PP (Humer *et al.*, 2015) réduisant l'efficacité de la PhytM à libérer le P non-phytique (PNP). Chez les poules pondeuses, le Ca particulaire ($\geq 0,8$ mm ; CaP) est couramment utilisé : il est retenu dans le gésier (Rao *et al.*, 1992) assurant la diffusion progressive de Ca soluble et permettant de couvrir les besoins en Ca pour la formation de la coquille durant la nuit (Saunders-Blades *et al.*, 2009).

Chez le poulet de chair, des études ont montré que le CaP, en limitant la formation de complexes Ca-PP, permet d'améliorer l'efficacité de la PhytM. De récents travaux viennent de montrer une telle interaction chez la poule pondeuse (Hervo *et al.*, 2023). Cependant, l'effet de la PhytM et de la forme de présentation du Ca sur la cinétique d'utilisation digestive des minéraux est peu décrit. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet combiné du CaP et de la PhytM sur la cinétique d'utilisation digestive du Ca et du P chez la poule pondeuse.

1. MATERIELS ET MÉTHODES

1.1. Animaux et régimes expérimentaux

Soixante-douze poules pondeuses de 30 semaines d'âge (Lohmann Tradition) ont été logées en cages individuelles durant 4 semaines (Hervo *et al.*, 2023). Quatre régimes expérimentaux ont été formulés selon un arrangement factoriel 2×2 pour évaluer l'effet de l'inclusion de CaP : 100 % de Ca fin (CaF ; $< 0,5$ mm) ou un mélange (MIX) de 75 % de CaP (2-4 mm) et 25 % de CaF, dans deux régimes formulés sans (CaF0 et MIX0) ou avec PhytM (300 FTU/kg ; CaF300 et MIX300). Les régimes contenaient des niveaux équivalents de Ca (3,5 %) et de PNP (0,38 %), en considérant l'équivalence en P de la PhytM. Pour éviter l'effet source du CaCO_3 , le CaF a été obtenu par broyage du CaP. Durant les 10 derniers jours, un marqueur indigestible, le dioxyde de titane, a été ajouté à l'alimentation (5,0 g/kg).

1.2. Collecte des contenus digestifs

À l'âge de 35 semaines, les poules ont été synchronisées sur leur ponte : elles ont été mises à jeun la veille au soir jusqu'à l'heure de la ponte le lendemain. À partir de la ponte, l'aliment a été distribué et les poules ont été euthanasiées 4 h après la réalimentation. Le jour de l'échantillonnage, les refus alimentaires ont été collectés pour calculer l'ingestion réelle de P et de Ca. Le tube digestif a été retiré et divisé en 5 segments :

jabot, gésier, duodénum, jéjunum et iléon. Les contenus de chaque segment ont été collectés et stockés à -20 °C avant analyses chimiques.

1.2. Analyses et calculs

Les teneurs en Ca, P et titane (Ti) des régimes et des contenus digestifs ont été analysés en utilisant la spectrométrie d'émission optique à plasma inductif. La concentration en PP a été déterminée dans les régimes et les contenus iléaux à l'aide d'un kit basé sur la méthode de modification du molybdate d'ammonium. Le temps moyen de rétention (TMR) dans le $i^{\text{ème}}$ segment du TGI ($\text{TMR}_{\text{MS},i}$, min) a été calculé selon van der Klis *et al.* (1990) :

$$\text{TMR}_{\text{MS},i} = T \times \frac{[\text{Ti}]_i \times \text{MS}_i}{\text{MS}_{\text{ingéré}} \times [\text{Ti}]_{\text{ingéré}}}$$

où T (min) est la durée d'ingestion, $\text{MS}_{\text{ingéré}}$ est la quantité de MS ingérée (g) et $[\text{Ti}]_{\text{ingéré}}$ représente la concentration de Ti dans l'aliment, calculée à partir des refus (g/kg MS). MS_i désigne la masse de contenu dans le $i^{\text{ème}}$ segment (g) et $[\text{Ti}]_i$ représente la concentration de Ti (g/kg MS) dans le $i^{\text{ème}}$ segment.

Le recouvrement du P et Ca (g/kg de MS) a été calculé dans chaque segment du TGI, conformément à Metzler *et al.* (2009) :

$$\text{Recouvrement}_{X,i} = [X]_i \times \frac{[\text{Ti}]_{\text{ingéré}}}{[\text{Ti}]_i}$$

avec $[X]_i$ la concentration en P ou Ca dans le $i^{\text{ème}}$ segment (g/kg MS). Dans chaque segment intestinal, la digestibilité apparente (DA, %) du P et du Ca a été calculée, selon van der Klis *et al.* (1990) :

$$\text{DA}_{X,i} = \left[1 - \left(\frac{[X]_i}{[X]_{\text{ingéré}}} \times \frac{[\text{Ti}]_{\text{ingéré}}}{[\text{Ti}]_i} \right) \right] - \text{DA}_{X,i-1}$$

avec $[X]_{\text{ingéré}}$ la concentration en minéraux de l'aliment consommé (g/kg MS) et $\text{DA}_{X,i-1}$ la digestibilité apparente fractionnelle du segment précédent.

La digestibilité iléale apparente du P (ou du Ca) a également été calculée comme suit :

$$\text{DIA}_X = \left[1 - \left(\frac{[X]_i}{[X]_{\text{ingéré}}} \times \frac{[\text{Ti}]_{\text{ingéré}}}{[\text{Ti}]_i} \right) \right]$$

La cinétique de digestibilité des minéraux (DA_t , % DA_{max}) jusqu'à l'iléon a été calculée en exprimant la DA cumulée pour P (ou le Ca) jusqu'au $i^{\text{ème}}$ segment par rapport à la somme des TMR jusqu'à ce segment, d'après Denham *et al.* (1989) :

$$\text{DA}_t = \text{DA}_{\text{max}} \times (1 - e^{-k(t-T_0)})$$

où DA_{max} est la valeur maximale de la DA du P (ou du Ca) au niveau iléal (%) et k la constante d'absorption (min^{-1}). T_0 représente la période de latence pendant laquelle le coefficient de digestion du P ou du Ca est négatif (représentant les pertes endogènes). L'équation a été ajustée selon une procédure non-linéaire et les paramètres k , DA_{max} et T_0 ont été estimés par le modèle. Le paramètre $t_{1/2}$ a ensuite été déterminé, ainsi que la vitesse initiale d'absorption, $V_i = \text{DA}_{\text{max}} \times k$.

1.3. Analyses statistiques

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel R, version 3.02 avec l'animal comme unité statistique. Une ANOVA à deux facteurs a été utilisée pour déterminer l'effet de la phytase microbienne, la taille des particules de carbonate de Ca et leur interaction. Le test de Tukey a été utilisé pour comparer les moyennes deux à deux. L'effet était considéré significatif à $P < 0,05$. Les ajustements de modèles de cinétique ont également été réalisés avec le logiciel R.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Temps moyen de rétention

Le TMR dans le jabot (33 min) et le gésier (15 min) n'a pas été affecté par les traitements (Tableau 1). En présence de PhytM, le TMR dans le jéjunum et l'iléon avait tendance à diminuer avec le CaF. Le TMR global dans l'intestin était inférieur d'environ 22 % chez les poules recevant CaF + PhytM par rapport aux poules recevant du CaF sans PhytM ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,05$). Dans le jabot, le TMR du P a été réduit d'environ 70 % dans le groupe MIX0 par rapport au groupe CaF300 ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,001$; Tableau 1). Dans le gésier, le TMR du P du groupe CaF300 était environ 2,6 fois plus élevé que pour les autres groupes ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,001$). Le TMR du Ca dans le jabot a augmenté de 100 % chez les poules recevant du CaP ($P < 0,05$; Tableau 1). L'incorporation de CaP dans l'aliment a augmenté le TMR du Ca dans le gésier, et cet effet a été atténué en présence de PhytM ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,001$; Tableau 1).

Chez les poules pondeuses, le gésier joue un rôle central dans la solubilisation du Ca et P et dans la régulation des flux vers l'intestin. Svihus *et al.* (2002) ont montré que la majeure partie des fines particules du digesta passe à travers le gésier en 30 min. Les particules grossières sont généralement retenues de manière sélective dans le gésier et doivent être broyées pour passer le pyllore (Hetland *et al.*, 2002). L'absence d'effet du régime MIX sur le TMR dans le gésier pourrait s'expliquer par la faible proportion de CaP dans l'aliment (~27 g CaP/kg). Dans cette étude, le TMR du Ca dans le gésier des régimes MIX0 et MIX300 était 14 et 8 fois plus élevé que les régimes CaF respectifs, illustrant le fait que le gésier peut réguler le flux de Ca soluble vers le duodénum.

2.2. Digestibilités

Les DA du P dans le duodénum, le jéjunum et l'iléon étaient respectivement de -6,0, 45,2 et 4,6 % (Tableau 2). Dans le duodénum, la DA du P était négative. Le fait que le recouvrement du P y soit plus important que la concentration du P dans l'aliment (+70 %) pourrait être dû aux pertes endogènes en P (Verardi *et al.*, 2019). Cette étude indique que 45 % de l'absorption du P s'est déroulée dans le jéjunum, conformément aux observations d'Hurwitz et Bar (1965). Dans le jéjunum, l'incorporation de CaP a augmenté la DA du P de 42 points dans les groupes avec PhytM ($\text{PhytM} \times$

$f\text{Ca}$; $P < 0,05$). Le Ca peut former des complexes indisponibles avec l'acide phytique lorsque le pH est supérieur à 5,0 (Nolan et Duffin, 1987); cette condition de pH se retrouve dans le jabot (Classen *et al.*, 2016). Ces complexes limitent la solubilisation des minéraux, empêchant la PhytM de libérer du PNP (Selle *et al.*, 2009) et diminuant l'absorption du P au niveau iléal (Tamin *et al.*, 2004). Chez le poulet de chair, il a été montré que le CaP diminuait la formation de ces complexes par rapport au CaF (Kim *et al.*, 2019). Les résultats de l'expérience actuelle soutiennent cette hypothèse : 1) dans les régimes avec PhytM, la DA du P a diminué de 16 % en présence de CaF ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,001$, Tableau 2); 2) la disparition du PP a diminué de 26 % en présence CaF ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,001$, Tableau 2). Le recouvrement du P a diminué avec l'incorporation de CaP dans le régime contenant de la PhytM : -27 % dans le jabot et -31 % dans le gésier ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$; $P < 0,05$, Tableau 2). Cela pourrait refléter un taux de passage plus élevé du P dans le TGI proximal en raison de la stimulation motrice du gésier par le CaP, ainsi qu'une plus grande efficacité de la PhytM. En raison des conditions de pH, le jabot et le gésier sont les principaux sites d'activité de cette enzyme (Selle *et al.*, 2009). Un pH plus faible a été observé dans le gésier du groupe MIX300 (données non présentées), pouvant être dû au plus faible pouvoir tampon du CaP par rapport au CaF (Keyser *et al.*, 1985). Tous ces processus favorisent la dégradation chimique des nutriments.

2.3. Cinétiques d'absorption

En présence de PhytM, la cinétique d'absorption du P dans l'intestin est plus lente. En effet, k P a été réduit de 47 et 36 % pour les groupes CaF et MIX, respectivement (Figure 1). Cette observation pourrait traduire : 1) le temps de latence nécessaire à l'hydrolyse du PP en PNP, par rapport aux phosphates qui sont rapidement disponibles; et 2) l'effet négatif de la formation de complexes Ca-P sur l'absorption du P. Cette hypothèse est renforcée par le ralentissement de l'absorption du P observé dans CaF300 par rapport au MIX300. Chez les poulets de chair, la formation de complexes diminue la digestibilité du P sans affecter celle du Ca (Li *et al.*, 2021), en accord avec la présente étude où le régime CaF300 présente une DA du P plus faible dans le jéjunum sans aucun effet sur l'absorption du Ca.

Dans le jabot, le gésier et le duodénum, le recouvrement du Ca a augmenté avec l'incorporation de CaP dans les régimes sans PhytM : +71, +394 et +217 g/kg MS, respectivement ($\text{PhytM} \times f\text{Ca}$, $P < 0,05$, Tableau 3). Dans la présente étude, l'absorption moyenne de Ca était de 12, 58 et 7 % dans le duodénum, le jéjunum et l'iléon, respectivement (Tableau 3), ce qui corrobore le fait que le Ca soit principalement absorbé dans la partie proximale de l'intestin (Adedokun et Adeola, 2013). Cependant, ces valeurs sont supérieures à celles observées par Hurwitz *et al.* (1973) qui ont montré qu'en période de non-

calcification de la coquille, 18, 21 et 1 % de Ca étaient absorbés dans le duodénum, le jéjunum et l'iléon, respectivement. Cette différence peut s'expliquer : 1) par le transit différentiel du CaP dans le gésier ; et 2) par le fait que les poules aient été mises à jeun du soir jusqu'à la ponte du lendemain. Ce jeûne a probablement induit une augmentation de l'absorption de Ca médiée par la 1,25-OH₂-D₃ (van der Klis *et al.*, 1990), avec une réponse maximale au niveau jéjunal (Bar, 2009).

En présence de PhytM, *k* Ca a diminué de 0,098 à 0,059 min⁻¹ et *Vi* a diminué de 3,6 à 1,9 g/min en comparant le régime MIX au régime CaF (Figure 1). Il semblerait que la PhytM et le CaP augmentent la motricité du gésier : comparé au MIX0, le MIX300 présentait un TMR du Ca plus faible dans le gésier (-52 %) et un recouvrement du Ca plus élevée dans le duodénum (+66 %), traduisant un taux de passage plus élevé du CaP dans l'intestin. En modulant la motricité du gésier, le CaP pourrait réguler le flux des nutriments le long

de l'intestin. La présence de particules de taille hétérogène dans le duodénum du groupe MIX300 pourrait expliquer la diminution de *k* et *Vi*.

CONCLUSION

Cette étude confirme que la plus lente diffusion du Ca soluble dans l'intestin suite à l'incorporation de CaP limite la formation de complexes entre Ca et P, et améliore l'utilisation digestive de P dans les régimes incorporant de la phytase. La forme de présentation du Ca présente un faible impact sur la cinétique d'absorption intestinale du Ca, tandis que celle du P semble sensible aux formes alimentaires du P et du Ca.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Laboratoire International Associé « NutriMod ». Nous remercions ADISSEO pour leur soutien dans sa réalisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adedokun, S. A., and O. Adeola. 2013. *J. Appl. Poult. Res.* (22), 600–608.
- Angel, R., N. M. Tanim, T. J. Applegate, A. S. Dhandu and L. E. Ellestad. 2002. *J. Appl. Poult. Res.* (11), 471–480.
- Bar, A. 2009. *Comp. Biochem. Physiol. Part A* (152), 447–469.
- Classen, H. L., J., Apajalahti, B., Svihus, and M., Choct. 2016. *Worlds Poult. Sci. J.* (72), 459–472.
- Denham, S. C., G. A. Morantes, D. B. Bates, and J. E. Moore. 1989. *J. Dairy Sci.* (72), 708–714.
- Hervo, F., Létourneau-Montminy, M.-P., Mème, N., Méda, B., Duclos, M., Narcy, A. 2023. *Poult. Sci.* (102), 102613.
- Hetland, H., B. Svihus, and V. Olaisen. 2002. *Br. Poult. Sci.* (43), 416–423.
- Humer, E., C. Schwarz, and K. Schedle. 2015. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* (99), 602–625.
- Hurwitz, A., S. Bar, and I. Cohen. 1973. *Am. J. of Physiol.* (225), 150–154.
- Hurwitz, S., and A. Bar. 1965. *J. Nutr.* (86), 433–438.
- Keyser, R. B., C. C. Noller, L. J. Wheeler, and D. M. Shaefer. 1985. *J. Dairy Sci.* (68), 1376–89.
- Kim, S. W., W. Li, R. Angel, and P. W. Plumstead. 2019. *Poult. Sci.* (98), 6837–6848.
- Li, W., R. Angel, P. W. Plumstead, and H. Enting. 2021. *Poult. Sci.* (100), 900–909.
- Metzler, B. U., R. Mosenthin, T. Baumgärtel and M. Rodehutschord. 2009. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* (93), 130–139.
- Nolan, K. B., and P. A., Duffin. 1987. *J. Sci. Food Agric.* (40), 79–85.
- Rao, K. S., D. A. Sr. Roland, J. L. Adams, and M. W. Durboraw. 1992. *J. Applied Poultry Research* (1), 6–10.
- Saunders-Blades, J. L., J. L. McIsaac, D. R. Korver, and D. M. Anderson. 2009. *Poult. Sci.* (88), 338–353.
- Selle, P. H., A. J. Cowieson, and V. Ravindran. 2009. *Livest. Sci.* (124), 126–141.
- Svihus, B., H. Hetland, M. Choct, and F. Sundby. 2002. *Br. Poult. Sci.* (43), 662–668.
- Tamim, N. M., R., Angel, R., and M., Christman. 2004. *Poult. Sci.* (83), 1358–1367.
- van der Klis, J. D., M. W. A. Verstegen, and W. de Witt. 1990. *Poult. Sci.* (69), 2185–2194.
- Verardi, A. D., A. F. Schneider, J. K. Meyer, F. M. Yuri, V. Oliveira, and C. E. Gewehr. 2019. *Livest. Sci.* 222: 49–53.
- Zhang, B., and C. Coon. 1997. *Poult. Sci.* (76), 1702–1706.

Tableau 1. Temps moyen de rétention (min) de la matière sèche, du P et du Ca dans les segments digestifs.

Phytase microbienne (FTU/kg) Forme de présentation du Ca	0		300		P-value		
	CaF	MIX	CaF	MIX	PhytM × fCa	PhytM	fCa
<i>Matière sèche</i>							
Jabot	41	21	34	37	0,084	0,617	0,185
Gésier	15	17	14	14	0,565	0,192	0,654
Duodénum	4	4	3	4	0,521	0,254	0,176
Jéjunum	32	39	25	35	0,071	0,156	0,053
Iléon	53	54	39	58	0,077	0,271	0,193
<i>Phosphore</i>							
Jabot	36 ^{ab}	22 ^b	74 ^a	40 ^{ab}	< 0,001	0,004	0,021
Gésier	16 ^b	15 ^b	46 ^a	23 ^b	< 0,001	< 0,001	0,018
<i>Calcium</i>							
Jabot	39	79	29	56	0,094	0,266	0,024
Gésier	19 ^c	265 ^a	16 ^c	127 ^b	< 0,001	0,443	< 0,001

CaF, Ca fin (0,26 mm) ; MIX 25 % de CaF + 75 % de Ca particulaire (2-4 mm) ; PhytM, phytase microbienne ; fCa, forme de présentation du Ca, fin ou MIX.

Tableau 2. Ingestion de P, recouvrement de P dans les contenus du tractus gastro-intestinal, digestibilité apparente du P le long de l'intestin, digestibilité iléale apparente du P et disparition du PP au niveau iléal.

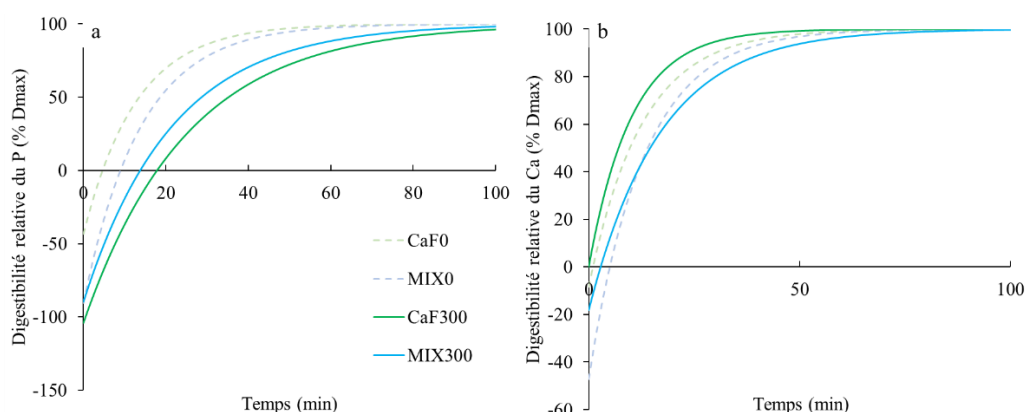
Phytase microbienne (FTU/kg)	0		300		P-value		
Forme de présentation du Ca	CaF	MIX	CaF	MIX	PhytM × fCa	PhytM	fCa
P ingéré (g/kg MS)	6,05 ^a	5,14 ^b	2,78 ^c	3,13 ^c	< 0,001	< 0,001	0,651
Recouvrement du P (g/kg MS)							
Jabot	5,17 ^{ab}	4,14 ^{ab}	5,23 ^a	3,84 ^b	0,014	0,884	0,002
Gésier	6,83 ^{ab}	5,02 ^b	7,30 ^a	5,01 ^b	0,007	0,585	< 0,001
Duodénum	8,47	7,48	7,53	4,94	0,098	0,105	0,098
Jéjunum	3,49 ^a	2,92 ^{ab}	3,81 ^a	2,33 ^b	0,004	0,810	< 0,001
Iléon	2,91 ^{ab}	2,57 ^{bc}	3,39 ^a	1,98 ^c	< 0,001	0,964	< 0,001
Digestibilité apparente du P (%)							
Duodénum	1.4	-4.1	-11.4	-10.0	0.852	0.419	0.792
Jéjunum	45.6 ^{ab}	52.3 ^{ab}	17.7 ^b	59.7 ^a	0.039	0.316	0.072
Iléon	6.2	3.0	4.6	4.6	0.852	0.997	0.566
Digestibilité iléale du P (%)	48,6	45,6	34,9	41,5	< 0,001	< 0,001	0,341
Disparition du P phytique (%)	49,58 ^b	50,57 ^b	59,72 ^b	80,64 ^a	0,005	0,004	0,085

CaF, Ca fin (0,26 mm) ; MIX 25 % de CaF + 75 % de Ca particulaire (2-4 mm) ; PhytM, phytase microbienne ; fCa, forme de présentation du Ca, fin ou MIX.

Tableau 3. Ingestion de Ca, recouvrement de Ca dans les contenus du tractus gastro-intestinal, digestibilité apparente du Ca le long de l'intestin et digestibilité iléale apparente du Ca.

Phytase microbienne (FTU/kg)	0		300		P-value		
Forme de présentation du Ca	CaF	MIX	CaF	MIX	PhytM × fCa	PhytM	fCa
Ca ingéré (g/kg MS)	37,79 ^b	43,82 ^{ab}	46,06 ^a	40,58 ^{ab}	0,039	0,257	0,852
Recouvrement du Ca (g/kg MS)							
Jabot	41,53 ^b	113,38 ^a	41,39 ^b	63,94 ^{ab}	0,001	0,956	0,001
Gésier	42,34 ^c	784,94 ^a	48,03 ^c	396,97 ^b	< 0,001	0,582	< 0,001
Duodénum	55,37 ^b	159,05 ^{ab}	46,74 ^b	263,81 ^a	0,004	0,430	0,001
Jéjunum	18,34	10,64	12,98	22,90	0,316	0,557	0,051
Iléon	13,03	9,56	11,13	9,44	0,396	0,595	0,011
Digestibilité apparente (%)							
Duodénum	11,8	2,9	26,3	3,7	0,565	0,417	0,228
Jéjunum	55,2	70,6	44,6	63,7	0,408	0,325	0,123
Iléon	6,1	4,0	3,3	14,1	0,191	0,606	0,305
Digestibilité iléale du Ca (%)	73,1 ^b	77,5 ^{ab}	74,2 ^b	81,5 ^a	0,002	0,735	< 0,001

CaF, Ca fin (0,26 mm) ; MIX 25 % de CaF + 75 % de Ca particulaire (2-4 mm) ; PhytM, phytase microbienne ; fCa, forme de présentation du Ca, fin ou MIX.



	Phosphore				Calcium			
	k (min ⁻¹)	T ₀ (min)	T _{1/2} (min)	Vi (g/kg/min)	k (min ⁻¹)	T ₀ (min)	T _{1/2} (min)	Vi (g/kg/min)
CaF0	0,078	4,7	14	0,24	0,079	1,0	10	2,2
MIX0	0,072	8,9	19	0,19	0,077	5,0	14	2,8
CaF300	0,041	17,8	34	0,03	0,098	7,0	7	3,6
MIX300	0,046	13,7	29	0,07	0,059	2,8	15	1,9

Figure 1. Courbes cinétiques de digestibilité relative du P (a) et du Ca (b) dans l'intestin grêle.