

Modélisation des flux de calcium, phosphore et zinc dans le tube digestif du porc en croissance

Julien LABARRE (1, 2), Philippe SCHMIDELY (2), Agnès NARCY (3), Patrick SCHLEGEL (4), Maamer JLALI (5),
Christelle LONCKE (2), Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY (1)

(1) Université Laval, Département des sciences animales, Québec QC, Canada

(2) UMR MoSAR, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France

(3) UMR BOA, INRAE, Université de Tours, 37380, Nouzilly, France

(4) Agroscope, Groupe Recherche Porcine, Posieux, Suisse

(5) Adisseo France SAS, 69190 Saint-Fons, France

marie-pierre.letourneau-montminy.1@ulaval.ca

Modélisation des flux de calcium, phosphore et zinc dans le tube digestif du porc en croissance

Le phosphore (P) est une ressource limitée et l'optimisation de son utilisation passe par une meilleure valorisation du phosphore phytique (PP), principale forme de stockage du P végétal. Le calcium (Ca) est majoritairement apporté sous forme de carbonate de Ca, connu pour son fort pouvoir tampon. Ce dernier pourrait expliquer l'effet négatif du Ca sur l'utilisation du PP et d'autres minéraux tel que le zinc (Zn). Cependant, la complexité des interactions entre PP, Ca et Zn rend difficile la quantification de leur biodisponibilité *in-vivo*. L'objectif de cette étude était de simuler les flux de Ca, P et Zn dans l'intestin du porc en croissance, par une approche de modélisation mécaniste. Un modèle mécaniste représentant le devenir du Ca, du Zn et des différentes formes de P solubles et insolubles dans l'estomac et l'intestin grêle a été développé. Le pH de l'estomac, élément important de la dégradation du PP par les phytases, a été représenté de façon mécaniste, en représentant les sécrétions gastriques et les effets tampons du repas. Les effets de Ca et Zn sur la solubilisation du PP ont aussi été représentés, illustrant leurs effets sur l'efficacité de dégradation du PP par les phytases microbiennes. Une attention a été portée à la représentation des flux de Zn dans l'intestin (endogène et alimentaire), zone de régulation du métabolisme du Zn. Des simulations durant 24 h ont été réalisées et les digestibilités apparentes des différents minéraux ont été comparées à des données de la littérature.

Modelling digestive fluxes of calcium, phosphorus, and zinc in growing pigs

Phosphorus (P) is a limited resource, and optimizing its use requires increasing the use of phytic P (PP), the main form of P stored in plants. Calcium (Ca) is supplied mainly as calcium carbonate, known for its strong buffering capacity. This property may explain the negative effect of Ca on the use of PP and other minerals such as zinc (Zn). However, the complexity of interactions among PP, Ca, and Zn makes it difficult to quantify their *in-vivo* bioavailability. The objective of this study was to simulate intestinal fluxes of Ca, P, and Zn in growing pigs using a mechanistic model. We developed a mechanistic model that described the fate of Ca, Zn, and the soluble and insoluble forms of P in the stomach and small intestine. Gastric pH, a key factor in PP hydrolysis by phytases, was mechanistically represented by representing gastric secretions and the buffering effects of meals. Direct effects of Ca and Zn on PP solubilization were also represented, which highlighted their marginal effects on the efficiency of PP degradation by microbial phytases. Attention was given to modelling Zn fluxes in the intestine (of both dietary and endogenous origin), as this is the main site at which Zn metabolism is regulated. The model simulated 24 h periods, and the apparent digestibilities of the minerals that it predicted were compared to those observed in the literature.

INTRODUCTION

L'amélioration de l'utilisation du phosphore (P) constitue une voie d'amélioration de la durabilité des élevages porcins. Il est nécessaire de mieux comprendre son devenir digestif après ingestion afin de répondre à cet objectif. Le P présent dans les aliments d'origine végétale est majoritairement lié à un inositol-hexakisphosphate aussi appelé phytate (INRA-AFZ, 2004). Cependant, les porcs n'hydrolysent qu'une partie du phytate, ce qui conduit à une absorption moyenne de 20 % du P phytique (PP) (Letourneau-Montminy *et al.*, 2012). Au-delà de son rôle de réservoir en P, le phytate est aussi un facteur antinutritionnel majeur, capable de diminuer la digestibilité des cations tels que le calcium (Ca) et le zinc (Zn). En effet, le phytate forme des complexes insoluble avec ces cations, empêchant leurs absorptions (Schlegel *et al.*, 2010 ; Bournazel *et al.*, 2018).

Le maintien d'un équilibre entre le Ca et le P absorbés est important pour optimiser la rétention du P et maximiser les performances de croissance (Lagos *et al.*, 2019). La phytase est une enzyme capable de dégrader le PP et ainsi augmenter la digestibilité du P mais également celle du Ca et du Zn en empêchant la formation de complexe avec le PP. Afin de maintenir l'équilibre entre le Ca et le P absorbés, il est important connaître la quantité de Ca qui peut être « libérée » par la phytase. Cette quantité dépend du nombre de molécules de Ca qui peuvent être liées à une molécule phytate et de l'efficacité de la phytase. La principale source Ca, le calcium carbonate (CaCO_3) possède une forte capacité tampon (Lawlor *et al.*, 2005). Cet effet tampon pourrait diminuer l'efficacité de la phytase.

L'intestin grêle constitue la principale voie de régulation du métabolisme du Zn via les flux endogènes et, la présence de sources de Zn de différentes origines (endogène et alimentaire) complique la quantification des effets de la phytase sur la digestibilité du Zn. De plus, les effets antagonistes du Zn sur la dégradation du PP (Labarre *et al.*, 2025) nécessitent aussi d'être mieux compris. Une meilleure compréhension des hypothèses sous-jacentes à la modulation de la dégradation des phytates par le Ca et le Zn dans le tube digestif constitue une étape importante à la potentialisation des effets de la phytase. Une meilleure représentation des flux de Ca, P et Zn dans l'intestin pourrait permettre aussi de mieux comprendre les facteurs affectant la biodisponibilité du Ca, du P et du Zn et l'effet de la phytase sur celui-ci.

La modélisation offre la possibilité d'agréger les connaissances et les idées et de tester les hypothèses à propos du fonctionnement d'un système biologique (Sauvant, 1992). Un modèle du devenir digestif du P et du Ca a déjà été développé chez le porc (Letourneau-Montminy *et al.*, 2011). L'objectif de cette étude était de mettre à jour le modèle précédent, en représentant de façon mécaniste la cinétique de pH et les effets tampons du CaCO_3 . L'intégration des flux de Zn dans le tractus digestif ainsi que de l'effet des phytases de dernières générations sont aussi l'un des objectifs de ce modèle.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Principes généraux

La consommation d'aliment constitue la force motrice du modèle. Les paramètres d'entrées du modèle sont le nombre de repas et la quantité totale d'aliment ingérée par jour. Le flux d'ingestion correspond à la quantité totale d'aliment ingérée

par jour divisée par le nombre de repas, multipliée par le temps d'ingestion (10 minutes/repas). Ce processus d'ingestion couplé à la concentration alimentaire des différentes formes de Ca (végétale, minérale hors CaCO_3 , CaCO_3 , animale), les différentes formes de P (PP, P non phytique (PNP) d'origine végétale, minérale, ou animale) et les différentes formes de Zn (végétale, minérale ou animale) détermine l'apport de ces éléments entrant dans l'estomac.

Le diagramme de Forrester du modèle est explicité dans la figure 1. Chaque minéral étudié peut se retrouver sous formes solubles ou insolubles. Le P entre dans l'estomac sous forme de PP soluble (EAPPs) ou insoluble (EAPPi) ou PNP soluble (EAPNPs) ou insoluble (EAPNPi). Pour le Ca et le Zn, deux compartiments distincts décrivent respectivement les fractions solubles (EACas et EAZns) et insolubles (EACai et EAZni). L'intestin grêle est représenté par une série de segments (Rivest *et al.*, 2000; Garcon *et al.*, 2025). Les flux d'endogènes sont aussi représentés dans l'intestin. Pour le P, la lumière intestinale comprend un compartiment pour le PP d'origine alimentaire sous forme soluble (IAPPs) ou insoluble (IAPPi). Elle inclut également des compartiments pour le PNP soluble (IAPNPs) ou insoluble (IAPNPi) d'origine alimentaire, et pour le P soluble (IEPNPs) ou insoluble (IEPNPi) d'origine endogène. Pour le Ca, deux compartiments distinguent les fractions solubles (IACas, IECas) et insolubles (IACai, IECai), respectivement d'origine alimentaire et endogène. Pour le Zn, le modèle distingue également les fractions solubles (IAZns, IEZns) et insolubles (IAZni, IEZni), selon leur origine alimentaire ou endogène.

1.2. Modélisation du transit

Le transit gastrique est représenté par une cinétique de premier ordre dépendant du temps de rétention moyen (Bastianelli *et al.*, 1996). Deux temps de rétention distincts ont été utilisés pour les phases solide ou liquide du repas dans l'estomac (Schop *et al.*, 2019). Le temps de rétention moyen a été fixé à 160 minutes pour la phase solide et à 90 minutes pour la phase liquide. Nous faisons l'hypothèse que les pools solubles suivent la dynamique de la phase liquide, tandis que les pools insolubles suivent celle de la phase solide. Dans l'intestin grêle, le transit entre segments successifs est également décrit par une cinétique de premier ordre et dépend d'un temps de rétention moyen. Ce dernier est fixé à 180 minutes dans le modèle, aussi bien pour les pools solubles que pour les pools insolubles (Schop *et al.*, 2019). Aucune distinction n'a été faite ici entre le temps de transit de la phase solide et liquide.

1.3. Modélisation du pH, de la solubilisation et de l'hydrolyse du phosphore phytique dans l'estomac

Le module simulant le pH stomacal s'appuie sur l'approche proposée par Rivera del Rio *et al.* (2022). Le pool de protons (H^+ , en mmol) est calculé à partir du bilan entre les entrées (sécrétions pariétales et apport de H^+ par l'aliment) et les sorties (transit et capacité tampon du chyme alimentaire). Les sécrétions pariétales augmentent avec la distension gastrique, elle-même calculée comme le rapport entre le volume maximum de l'estomac et le volume d'eau et d'aliment qu'il contient. La capacité tampon correspond au flux sortant du pool de H^+ lié à la dissolution du CaCO_3 . On assume que le contenu du compartiment stomacal est instantanément homogénéisé. Ainsi, un pH unique est estimé dans l'estomac à partir des différents flux décrits. Le flux de solubilisation du EAPPi en EAPPs dépend du pH. La quantité de EAPPs dépend des flux de solubilisation mais aussi du flux d'insolubilisation du EAPPs.

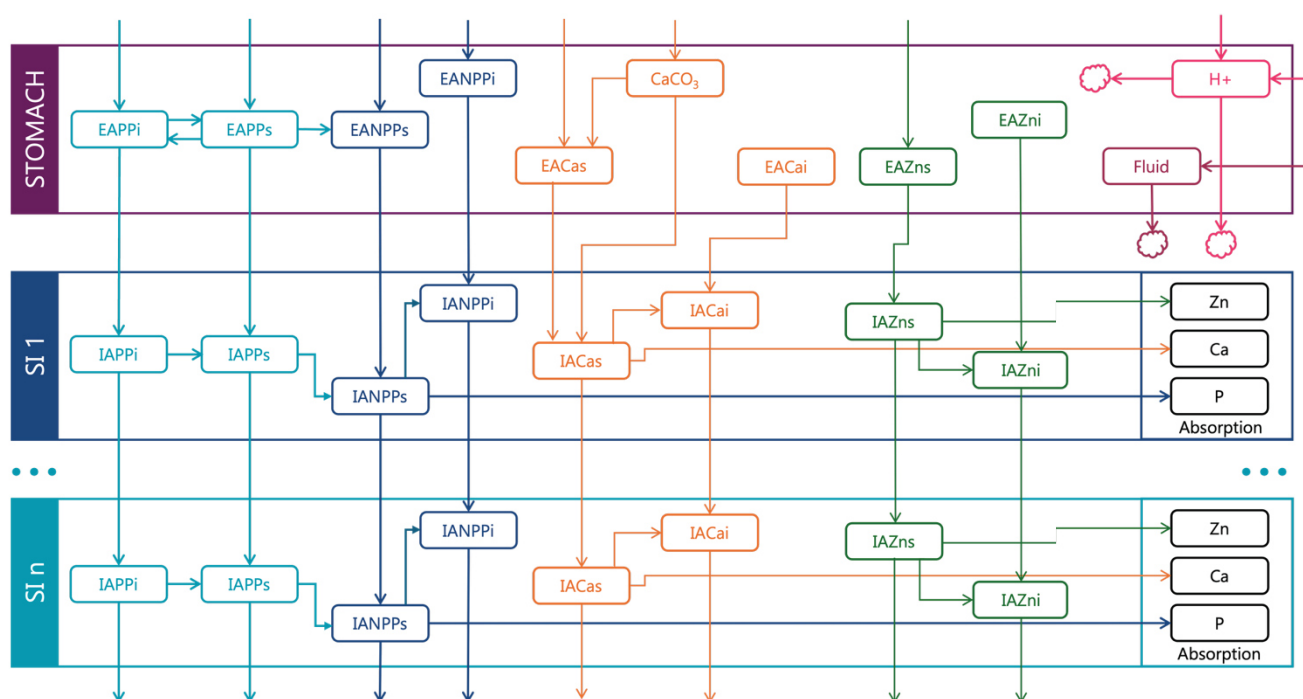


Figure 1 – Diagramme de Forrester du modèle de devenir du calcium (Ca), du phosphore (P) et du zinc (Zn) alimentaire

Les lignes pleines représentent les flux (solubilisation, absorption, passage d'un compartiment à l'autre). Les lignes en pointillés représentent les facteurs influents qui n'entrent pas directement dans le bilan massique des minéraux. Les flux endogènes ne sont pas représentés.

Abréviations : E = estomac, I = intestin grêle, A = alimentaire, PP = phosphore phytique, PNP = phosphore non phytique, s = soluble, i = insoluble.

Seule la fraction soluble de PP peut être hydrolysée en SAPs sous l'action des phytases végétales et microbiennes. La dégradation du EAPPs par les phytases microbiennes et végétales se produit seulement dans l'estomac. La cinétique d'hydrolyse du EAPPs est représentée par une équation de Michaelis-Menten, avec une vitesse de dégradation qui est proportionnable à un coefficient ($V_{\max\text{phy}}$) et une constante (K_M). Ces paramètres sont différents pour les phytases végétales et microbiennes.

1.4. Flux de calcium, phosphore et zinc dans l'intestin grêle

L'intestin grêle est également une zone d'hydrolyse du PP par les phytases endogènes, c'est-à-dire les phosphatases de la paroi intestinale. Le IAPPs peut être dégradé en IAPs. Le taux d'hydrolyse du PP dans l'intestin grêle a été fixé à 20 % (Rosenfelder-Kuon *et al.*, 2020). Le pH intestinal favorise l'insolubilisation du PP. Le pool IAPPs peut être insolubilisé en IAPPi, et ce flux a été modélisé à l'aide d'un taux d'insolubilisation supposé constant le long de l'intestin grêle.

L'insolubilisation du PP entraîne en parallèle celle du Ca et du Zn d'origine alimentaire. La quantité de Ca insolubilisée par le PP dépend du nombre de moles de Ca (maximum 3) qu'une mole de PP peut chélater, lequel varie selon la présence de Ca dans chaque segment de l'intestin. En présence de PP, la présence de Ca favorise la formation de complexes. L'insolubilisation du Zn par la formation de complexes avec le PP a été modélisée via un ratio fixe de 0,12 mole de Zn chélatée par mole de PP insolubilisée (Labarre *et al.*, 2025).

L'intestin est également une zone de formation de complexes Ca-PNP. Un maximum de 10 % du Ca soluble présent dans l'intestin peut s'associer au PNP soluble (Letourneau-Montminy *et al.*, 2011). La quantité de Ca et de P insolubilisée dépend ainsi à la fois du paramètre cinétique k_{fCap} et des concentrations locales de Ca et de PNP dans chaque segment intestinal.

1.5. Absorption

L'absorption du Ca, P et Zn dans l'intestin sont représentées par un transport actif auquel s'ajoute un transport passif du Ca, P et Zn soluble alimentaire ou endogène. Le transport actif est représenté par une cinétique de Michaelis-Menten, avec une vitesse maximale d'absorption ($V_{\max}$) et une constante d'absorption (K_{Mx}). Le flux passif est représenté par une relation proportionnelle à la quantité de minéraux solubles présents dans le segment considéré, via un coefficient de perméabilité (K_p). Les paramètres du modèle ont été calibrés à partir des données d'absorption de P et de Ca publiées (Stein *et al.*, 2008 ; 2011). Les valeurs de $V_{\max}$, K_M et K_p qui régissent l'absorption du Zn ont été calibrées à partir des absorptions apparentes rapportées dans des aliments semi-synthétiques (Hankins *et al.*, 1985), dont la concentration alimentaire de Zn variait de 6 à 116 mg/kg.

1.6. Sécrétions endogènes de calcium, phosphore et zinc

Les sécrétions endogènes de P et Ca ont été représentées comme un flux constant, entrant dans les pools IEPNPs et IECas. Elles sont considérées comme théoriquement 100 % absorbables et suivent le même devenir que les fractions alimentaires, incluant la formation de complexes Ca-PNP. Le Ca endogène peut également former des complexes avec le PP, entraînant l'insolubilisation du Ca endogène.

Les sécrétions endogènes de Zn ont été représentées en détails en raison de leur rôle majeur dans la régulation du métabolisme du Zn. Les sécrétions pancréatiques représentent 2,5-4,0 mg/j pour un porc de 50 kg recevant 60-180 mg Zn/j, soit environ 3 % de l'ingéré (Hedemann *et al.*, 1998). Les sécrétions biliaires correspondent à 0,9 mg/j sur la base d'une concentration moyenne de 0,35 mg/l et d'une sécrétion de bile de 2,6 l/j (Sullivan *et al.*, 1981 ; Symonds et Charmley, 1990).

La desquamation des cellules de la paroi intestinale constitue aussi une source de Zn endogène. En considérant qu'un porc de 50 kg contient environ 250 g de protéines dans la paroi intestinale (Garçon *et al.*, 2025), et que la concentration moyenne de Zn est de 80 mg/kg de protéine (Bueno Dalto *et al.*, 2023), en fixant un renouvellement quotidien de 20 % de la paroi intestinale, cela entraîne une perte endogène de 4 mg/j.

1.7. Calcul et simulation

Une simulation dure 24 heures. Le modèle a été développé en langage Python sous la forme d'un système d'équations différentielles ordinaires du premier ordre. Les équations sont intégrées avec la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 et un pas

de temps de 0,5 minute. Un porc de 50 kg recevant 2 kg d'aliment a été simulé afin d'étudier le comportement du modèle. Différentes concentrations en nutriments ont été testées pour observer les réponses du modèle ; elles sont précisées dans la section Résultats.

Les sorties du modèle peuvent être l'absorption réelle et l'absorption apparente. L'absorption réelle correspond au cumul des flux d'absorption, tandis que l'absorption apparente est calculée en soustrayant à l'apport alimentaire la quantité de minéraux simulée à l'iléon. Compte tenu de l'absence d'absorption dans le gros intestin, la digestibilité iléale est équivalente à la digestibilité totale du tractus digestif.

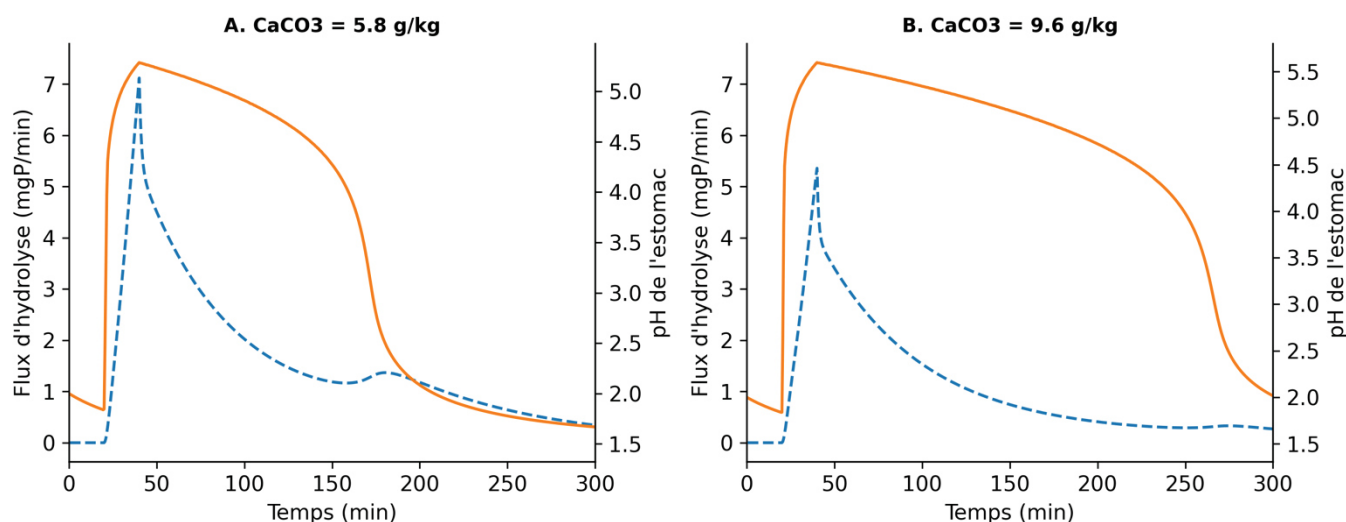


Figure 2 – Simulation du flux d'hydrolyse du phosphore phytique (courbe bleu en pointillé) et du pH (courbe orange) dans le compartiment stomacal pour des repas contenant 5,8 (A) ou 9,6 (B) g/kg de carbonate de calcium et 500 FTU/kg de phytase microbienne

2. RESULTATS

2.1. Le pH de l'estomac

Les ions H^+ issus des sécrétions postprandiales (200 mmole/kg d'ingestion) représentent la source majeure de H^+ comparativement à ceux du repas (0,01 mmole/kg ingéré). Les sorties d'ions H^+ correspondent à deux processus : (1) la neutralisation acide par le pouvoir tampon du $CaCO_3$ (environ 130 mmol H^+ par kg d'aliment ingéré pour 9 g de $CaCO_3$ /kg), et (2) la vidange de l'acide gastrique vers le compartiment de l'intestin grêle. Le volume du contenu gastrique est modélisé comme une variable dynamique.

La sécrétion gastrique est stimulée par la présence d'aliment dans l'estomac (Figure 2). Les sécrétions gastriques sont maximales juste après l'ingestion et diminuent progressivement avec la vidange gastrique. La baisse du pH gastrique comprend trois phases : (1) une phase initiale, où les sécrétions gastriques sont neutralisées par l'effet tampon du $CaCO_3$, (2) une phase de descente rapide et (3) une phase de stabilisation quand l'estomac revient à son volume minimal.

Le modèle ne prend en compte que l'effet tampon du $CaCO_3$, mais en appliquant le même principe, on peut imaginer prendre en compte l'effet tampon de l'oxyde de Zn dont la dissociation à lieu dans l'estomac et évaluer ces effets sur la dégradation du PP. Un des prochains développements du modèle pourrait être la prise en compte l'effet tampon de l'ensemble d'un repas. Le paramètre de capacité tampon du $CaCO_3$ peut être remplacé

par « Acid Binding Capacity » proposé par Lawlor *et al.* (2005). Nos résultats suivent les cinétiques de pH décrites par Blaabjerg *et al.* (2011) et Bornhorst *et al.* (2013), mais aucune donnée expérimentale ne décrit à ce jour la cinétique post-prandiale du pH en présence de différents niveaux de $CaCO_3$. Plus de données sont nécessaires pour valider la cinétique de pH postprandiale.

L'idée d'un unique pH gastrique est une représentation simplifiée. Bornhorst *et al.* (2013) ont par exemple montré que le pH varie avec le temps et la section de l'estomac. Ces effets sont largement démontrés avec des repas fibreux (Lannuzel *et al.*, 2024 ; 2025), mais peu de données sont disponibles sur la distribution spatiale du pH dans un repas classique peu fibreux, de type céréales-tourteau de soja.

2.2. Dégradation du phosphore phytique par les phytases microbiennes et impact du carbonate de calcium

Le pH gastrique influence fortement l'activité des phytases, qu'elles soient d'origine microbienne ou végétale. Les phytases microbiennes n'agissent que dans le compartiment stomacal. À 5,8 g de $CaCO_3$ par kg d'aliment, le modèle prédit une hydrolyse plus marquée et précoce entraînant une diminution rapide du pH gastrique, comparativement à 9,6 g/kg (Figure 2). Ces résultats suggèrent qu'un apport accru de $CaCO_3$ limite la solubilisation du PP et réduit l'efficacité enzymatique.

Dans une simulation avec 15,1 g/kg de $CaCO_3$, l'ajout de 500 FTU/kg de phytase a permis la libération de 1,2 g/kg de PNP

tandis que l'ajout de 2 000 FTU/kg de phytase a conduit à une libération de 1,9 g/kg de PNP.

2.3. Insolubilisation du phosphore phytique dans l'intestin et chélation du calcium et du zinc

Un repas de 2 kg contenant 2,35 g/kg de PP, 3 g/kg de PNP, 7,8 g/kg de Ca et 60 mg/kg de Zn, distribué en cinq repas, a été simulé. La figure 3 illustre une diminution progressive du PP soluble et une augmentation du PP insoluble le long de l'intestin grêle. Sans phytase microbienne, après 24h, 18 % du PP sont hydrolysés dans l'intestin grêle.

Dès les premiers segments intestinaux, une partie importante du P soluble devient insoluble, et cette tendance s'accroît au fur et à mesure de la progression dans l'intestin, jusqu'à ce que la quasi-totalité du PP soit sous forme insoluble dans les segments distaux. Ce phénomène conduit également à la chélation du Ca et du Zn. La simulation montre une diminution rapide du Zn soluble au cours des premiers segments intestinaux, suivie d'une augmentation concomitante du Zn insoluble. Le Ca suit une dynamique similaire à celle du PP et Zn avec une baisse progressive de la fraction soluble et une augmentation parallèle de la fraction insoluble.

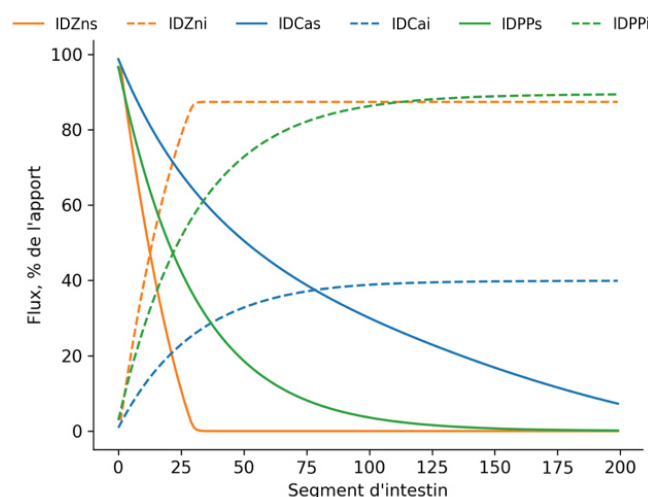


Figure 3 – Insolubilisation du phosphore phytique (IAPPs ; IAPPi), du calcium soluble (IACas) et insoluble (IACai) et du zinc soluble (IAZns) et insoluble (IAZni) dans l'intestin grêle représenté comme une série de 200 segments consécutifs

2.4. Absorption du calcium, phosphore et zinc

La simulation prédit une absorption réelle de 2,42 g de P correspondant à une digestibilité apparente iléale de 55,4 % du P ingéré. L'absorption réelle de Ca est estimée à 4,6 g, soit une digestibilité apparente de 59,5 %. Ces valeurs sont cohérentes avec celles obtenues par Lagos *et al.* (2021) qui a trouvé un coefficient de digestibilité de 55,1 % pour le P et 60,8 % pour le Ca. Enfin, l'absorption réelle de Zn atteint 13,1 mg, ce qui représente une digestibilité apparente de 21,9 %. Cette valeur est en accord avec les résultats rapportés par Poulsen et Larsen (1995), qui observent des coefficients de digestibilité apparente de 23 %. Ces résultats confirment que les niveaux de digestibilité obtenus avec notre modèle sont cohérents avec les données expérimentales rapportées dans la littérature. Une évaluation plus étendue sera toutefois nécessaire pour valider le modèle de manière plus complète.

Les flux d'absorption du Ca (Figure 4) montrent qu'il est absorbé tout au long de l'intestin. Un ajustement des paramètres relatifs à la solubilité, aux coefficients de chélation et aux mécanismes

de transports cellulaires sont peut-être nécessaires pour mieux représenter la biodisponibilité réelle du Ca. L'une des hypothèses à prendre en compte pourrait être que le Ca favorise l'insolubilisation du PP. Une deuxième hypothèse de travail pourrait être la sous-estimation des capacités de l'animal à absorber le Ca.

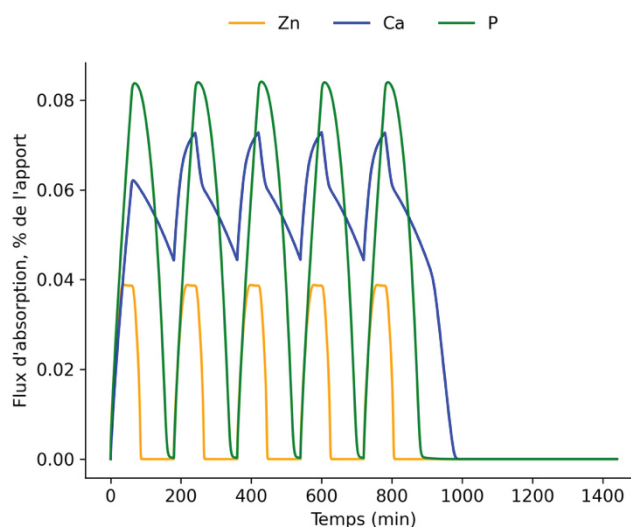


Figure 4 – Le profil d'absorption du calcium (bleu), du phosphore (vert) et du zinc (orange) après l'ingestion de cinq repas contenant 2,35 g/kg de P phytique, 3 g/kg de P non phytique, 4,6 g/kg de Ca et 60 mg/kg de Zn

2.5. Les flux de zinc dans l'intestin

L'analyse des simulations montre que les sécrétions endogènes de Zn dans l'intestin sont de 6,7 mg/jour, valeur du même ordre de grandeur que la valeur de 4,6 mg/jour proposé par Chu *et al.* (2009) à partir de mesures isotopiques. L'accumulation de Zn dans la paroi intestinale, au-delà de 80 mg/kg, n'est principalement observée que lorsque les apports alimentaires dépassent 1 000 mg/kg (Bueno Dalto *et al.*, 2023). Afin de simplifier le modèle et de rester dans un état de type « état d'équilibre », ces situations extrêmes n'ont pas été représentées. Dans ce cadre, les sécrétions endogènes sont considérées comme le reflet direct du statut physiologique et nutritionnel de l'animal. En effet, les modifications des sécrétions pancréatiques ainsi que l'accumulation dans la paroi intestinale sont des mécanismes qui nécessitent plusieurs semaines pour s'installer (Windisch, 2003). Le pas de temps retenu dans ce modèle ne permet donc pas, dans une première approche, de prendre en compte les interactions entre digestion et métabolisme. Cela soulève toutefois la question de la pertinence d'associer des modèles de digestion à court terme avec des modèles métaboliques à plus long terme, en particulier pour étudier le devenir digestif et l'homéostasie du calcium et du zinc. De futurs développements du modèle pourraient toutefois permettre de mieux représenter les mécanismes d'homéostasie du Zn.

CONCLUSION

Le modèle développé dans cette étude illustre les principaux mécanismes impliqués dans la digestion du PP et ses interactions avec le Ca, le Zn et la phytase chez le porc en croissance. Il met en évidence le rôle déterminant du pH gastrique et de l'effet tampon du carbonate de Ca sur la solubilisation et l'hydrolyse du phytate, ainsi que l'importance

des phénomènes d'insolubilisation et de chélation dans l'intestin grêle. Ce modèle demeure un outil de recherche intégrant les connaissances disponibles à ce jour. Son évaluation sera poursuivie à partir de bases de données de méta-analyses existantes afin de confronter les sorties du modèle à un ensemble de données expérimentales. En complément, des analyses de sensibilité permettront d'identifier les paramètres les plus influents sur les sorties du

modèle et de cibler les mécanismes à approfondir dans les développements futurs. De futures améliorations viseront également à affiner la description des mécanismes actifs de transport du Ca, des interactions avec le PP et de l'homéostasie du Zn. Une analyse de sensibilité doit aussi être conduite afin d'évaluer la sensibilité des différents choisis, notamment l'impact des temps moyens de rétention choisis.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bastianelli D., Sauvant D., Rérat A., 1996. Mathematical modeling of digestion and nutrient absorption in pigs. *J. Anim. Sci.*, 74, 1873-1887.
- Blaabjerg K., Jorgensen H., Tauson A.H., Poulsen H.D., 2011. The presence of inositol phosphates in gastric pig digesta is affected by time after feeding a nonfermented or fermented liquid wheat- and barley-based diet. *J. Anim. Sci.*, 89, 3153-3162.
- Bornhorst G.M., Chang L.Q., Rutherford S.M., Moughan P.J., Singh R.P., 2013. Gastric emptying rate and chyme characteristics for cooked brown and white rice meals in vivo. *J. Sci. Food Agric.*, 93, 2900-2908.
- Bournazel M., Lessire M., Duclos M.J., Magnin M., Mème N., Peyronnet C., Recoules E., Quinsac A., Labussière E., Narcy A., 2018. Effects of rapeseed meal fiber content on phosphorus and calcium digestibility in growing pigs fed diets without or with microbial phytase. *Animal*, 12, 34-42.
- Bueno Dalto D., Audet I., Roy C., Novais A.K., Deschene K., Goulet K., Matte J.J., Lapointe J., 2023. Effects of dietary zinc oxide levels on the metabolism of zinc and copper in weaned pigs. *J. Anim. Sci.*, 101, 1-11
- Chu G.M., Komori M., Hattori R., Matsui T., 2009. Dietary phytase increases the true absorption and endogenous fecal excretion of zinc in growing pigs given a corn-soybean meal-based diet. *Anim. Sci. J.*, 80, 46-51.
- Garcon C.J.J., Le Floc'h N., Mercier Y., van Milgen J., 2025. A conceptual mechanistic model of amino acid fluxes in the small intestine, taking the example of pig. *Animal*, 19, 101414.
- Hankins C.C., Veum T.L., Reeves P.G., 1985. Zinc requirement of the baby pig when fed wet-autoclaved spray-dried egg albumen as the protein source. *J. Nutr.*, 115, 1600-1612.
- Hedemann M.S., Gabert V.M., Larsen T., 1998. Pancreatic secretion of zinc and carboxypeptidase A and B in growing pigs. *Reprod Nutr Dev*, 38, 391-400.
- INRA-AFZ, 2004. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. Sauvant D., Pérez J.M., Tran G., Coord., INRA Eds, Paris, 291 p.
- Labarre J., Schmidely P., Schlegel P., Loncke C., Létourneau-Montminy M.P., 2025. Antagonistic effect of increasing dietary zinc on the efficiency of microbial phytase on calcium, phosphorus, and zinc digestibility and status in pigs: a meta-analysis. *Animal*, 19, 101604
- Lagos L.V., Lee S.A., Fondevila G., Walk C.L., Murphy M.R., Looor J.J., Stein H.H., 2019. Influence of the concentration of dietary digestible calcium on growth performance, bone mineralization, plasma calcium, and abundance of genes involved in intestinal absorption of calcium in pigs from 11 to 22 kg fed diets with different concentrations of digestible phosphorus. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 10, 47.
- Lagos L.V., Lee S.A., Bedford M.R., Stein H.H., 2021. Formulation of diets for pigs based on a ratio between digestible calcium and digestible phosphorus results in reduced excretion of calcium in urine without affecting retention of calcium and phosphorus compared with formulation based on values for total calcium. *J. Anim. Sci.*, 99, 1-7
- Lannuzel C., Veersma R.J., Wever N., van Erven G., Kabel M.A., Gerrits W.J.J., de Vries S., 2024. Particle size of insoluble fibres and gelation of soluble fibres influence digesta passage rate throughout the gastrointestinal tract of finishing pigs. *Animal*, 18, 101175.
- Lannuzel C., Veersma R.J., van Erven G., Kabel M.A., Gerrits W.J.J., de Vries S., 2025. Fibre-rich ingredients differing in physicochemical properties modulate digesta transit and digestion kinetics in pigs. *Animal*, 19, 101473.
- Lawlor P.G., Lynch P.B., Caffrey P.J., O'Reilly J.J., O'Connell M.K., 2005. Measurements of the acid-binding capacity of ingredients used in pig diets. *Ir. Vet. J.*, 58, 447-452.
- Létourneau-Montminy M.P., Narcy A., Lescoat P., Magnin M., Bernier J.F., Sauvant D., Jondreville C., Pomar C., 2011. Modeling the fate of dietary phosphorus in the digestive tract of growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 3596-3611.
- Létourneau-Montminy M.P., Jondreville C., Sauvant D., Narcy A., 2012. Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase. *Animal*, 6, 1590-1600.
- Poulsen H.D., Larsen T., 1995. Zinc excretion and retention in growing pigs fed increasing levels of zinc oxide. *Livest. Prod. Sci.*, 43, 235-242.
- Rivest J., Bernier J.F., Pomar C., 2000. A dynamic model of protein digestion in the small intestine of pigs. *J. Anim. Sci.*, 78, 328-340.
- Rosenfelder-Kuon P., Siegert W., Rodehutschord M., 2020. Effect of microbial phytase supplementation on P digestibility in pigs: a meta-analysis, *Arch. Anim. Nutr.*, 74, 1-18.
- Sauvant D., 1992. La modélisation systémique en nutrition. *Reprod. Nutr. Dev.*, 32, 217-230.
- Schlegel P., Nys Y., Jondreville C., 2010. Zinc availability and digestive zinc solubility in piglets and broilers fed diets varying in their phytate contents, phytase activity and supplemented zinc source. *Animal*, 4, 200-209.
- Schop M., Jansman A.J.M., de Vries S., Gerrits W.J.J., 2019. Increasing intake of dietary soluble nutrients affects digesta passage rate in the stomach of growing pigs. *Br. J. Nutr.*, 121, 529-537.
- Stein H.H., Kadzere C.T., Kim S.W., Miller P.S., 2008. Influence of dietary phosphorus concentration on the digestibility of phosphorus in monocalcium phosphate by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 86, 1861-1867.
- Stein H.H., Adeola O., Cromwell G.L., Kim S.W., Mahan D.C., Miller P.S., North Central Coordinating Committee on Swine N., 2011. Concentration of dietary calcium supplied by calcium carbonate does not affect the apparent total tract digestibility of calcium, but decreases digestibility of phosphorus by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 2139-2144.
- Sullivan J.F., Williams R.V., Wisecarver J., Etzel K., Jetton M.M., Magee D.F., 1981. The zinc content of bile and pancreatic juice in zinc-deficient swine. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 166, 39-43.
- Symonds H.W., Charmley L.L., 1990. A surgical technique for the long-term collection of bile in the pig and measurement of the biliary excretion of copper and zinc. *Res. Vet. Sci.*, 48, 28-32.
- Windisch W., 2003. Development of zinc deficiency in ⁶⁵Zn labeled, fully grown rats as a model for adult individuals. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 17, 91-96.