

Estimation du flux d'absorption du zinc et du cuivre chez le porc : approche par méta-analyse

Mohamed Ali KETATA, Marie-Pierre LETOURNEAU-MONTMINY, Frédéric GUAY

Département des sciences animales, Université Laval, Québec, G1V 0A6, Canada

Frederic.guay@fsaa.ulaval.ca

Estimation du flux d'absorption du zinc et du cuivre chez le porc : approche par méta-analyse

L'absorption des minéraux traces, comme le zinc (Zn) et le cuivre (Cu), dépend principalement de l'apport venant des matières premières d'origine végétale et des suppléments minéraux ajoutés au régime, ainsi que de la présence de composés nutritionnels comme les phytates et les fibres. L'objectif de cette étude est de quantifier par méta-analyse l'impact des apports en Zn et en Cu ainsi que d'autres facteurs nutritionnels sur le flux d'absorption de ces minéraux. Une base de données dérivée de 29 publications publiées entre 1995 et 2019 et décrivant 165 traitements expérimentaux a été construite. Pour le Zn, deux modèles ont été établis. Le premier modèle montrait un effet positif de la concentration en Zn organique (linéaire : P -value < 0,01 ; quadratique : P -value < 0,01) et inorganique (P -value < 0,01 ; P -value = 0,08) ainsi qu'un effet linéaire négatif de la teneur en Cu (P -value = 0,05) du régime alimentaire sur le flux d'absorption ($R^2 = 94\%$). Dans le second modèle, en plus de l'effet de l'apport en Zn organique et inorganique, le coefficient de digestibilité totale apparente en phosphore (P) était positivement associé avec le flux d'absorption du Zn (P -value < 0,01, $R^2 = 96\%$). Pour le Cu, deux modèles ont également été établis. Le premier modèle a montré que la teneur en Zn dans le régime alimentaire affectait négativement (P -value < 0,01) le flux d'absorption du Cu alors que la teneur en Cu organique et inorganique (P -value < 0,01) l'augmentait linéairement ($R^2 = 93\%$). Comme pour le Zn, le deuxième modèle a montré que le flux d'absorption du Cu était positivement associé à la digestibilité totale apparente du P (P -value < 0,01 ; $R^2 = 96\%$). Les flux d'absorption du Zn et du Cu dépendent donc du contenu en ces minéraux dans les régimes, ainsi que la digestibilité du P.

Estimation of the absorption flux of zinc and copper in pigs: approach by meta-analysis

The absorption of trace minerals, such as zinc (Zn) and copper (Cu), depends mainly on intake from ingredients and mineral supplements added to the diet, as well as the presence of nutritional compounds such as phytates and fiber. The objective of this study was to quantify the impact of Zn and Cu intake as well as those of nutritional factors on the absorption rate of these minerals using meta-analyses. A database derived from 29 publications published from 1995 to 2019 and describing 165 experimental treatments was compiled. For Zn, two models were developed. The first showed a positive effect of organic (linear: P -value < 0.01; quadratic: P -value < 0.01) and inorganic Zn concentration (P -value < 0.01; P -value = 0.08), as well as a negative linear effect of Cu content (P -value = 0.051) in the diet on the absorption rate ($R^2 = 94\%$). In the second model, in addition to the effects of organic and inorganic Zn intake, the apparent total tract digestibility of phosphorus (P) was positively associated with the Zn absorption rate (P -value < 0.01, $R^2 = 96\%$). For Cu, two models were also developed. The first showed that Zn content in the diet decreased the absorption rate of Cu (P -value < 0.01), while organic and inorganic Cu contents (P -value < 0.01) linearly increased it ($R^2 = 93\%$). Like for Zn, the second model showed that the absorption rate of Cu was positively associated with apparent total tract digestibility of P (P -value < 0.01) ($R^2 = 95\%$). The absorption fluxes of Zn and Cu therefore depend on the content of these minerals in diets and also on the digestibility of P in the diets.

INTRODUCTION

La digestibilité des minéraux traces chez les porcs dépend principalement de leur origine (végétale ou minérale), de leur forme (organique ou inorganique) et donc de leur capacité à être absorbés par le tractus intestinal (Jondreville *et al.*, 2002 ; Revy *et al.*, 2003). Lorsque ces minéraux traces, tels que le zinc (Zn) et le cuivre (Cu), sont ajoutés aux régimes alimentaires, ils le sont généralement sous forme inorganique (sulfate et oxyde) ou organique (chélaté aux peptides, acides aminés ou polysaccharides) (Burkett *et al.*, 2009 ; Yu *et al.*, 2010). Des recherches antérieures ont montré que les formes organiques pourraient avoir une meilleure biodisponibilité que les formes inorganiques en raison d'une meilleure absorption intestinale (Burkett *et al.*, 2009). D'autres auteurs n'ont toutefois pas confirmé ceci (Wedekind *et al.*, 1992 ; Revy *et al.*, 2002).

Les minéraux traces interagissent les uns avec les autres (Poulsen *et al.*, 2016) en plus d'interagir avec certaines composantes du régime ce qui pourrait affecter leur absorption (Jondreville *et al.*, 2002 ; Revy *et al.*, 2003). Ces interactions peuvent conduire à une carence induite pour un minéral en raison d'un niveau excessif d'un autre minéral (Gaudré et Quiniou, 2015). Par exemple, le Zn et le Cu peuvent interagir entre eux et avec les différents composants du régime alimentaire comme les fibres et les phytates (Bikker *et al.*, 2012 ; Dong *et al.*, 2018).

La méta-analyse est une méthode statistique qui permet de combiner et synthétiser les données de recherche publiées sur un sujet (Sauvant *et al.*, 2020) afin d'établir une conclusion globale. Le présent travail vise donc à utiliser cette approche pour évaluer l'effet des composants alimentaires, des sources des minéraux ajoutés et de leurs interactions sur les flux d'absorption du Zn et du Cu.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Collecte et codage des données

Les études sur l'impact des facteurs affectant la digestibilité des minéraux traces (Zn et Cu) chez le porc ont été extraites de bases de données publiques (Web of Science, CAB abstracts, Prod INRA et Science Direct) à l'aide de mots-clés tels que Zn et Cu, digestibilité iléale apparente (AID), digestibilité apparente totale du tractus (ATTD), phytase, phytate, absorption minérale, porc, porcelet et autres termes liés. La recherche bibliographique a été menée entre septembre 2019 et août 2020. La base de données générée comprend 29 publications (Les références sont disponibles auprès des auteurs) publiées entre 1995 et 2019 et inclut 165 traitements expérimentaux. Des informations générales telles que les noms des auteurs, l'année de publication, le nom de la revue, l'objectif de l'étude, l'âge, le nombre d'animaux par traitement, le taux d'incorporation des matières premières dans les régimes alimentaires et leurs compositions chimiques ont été incluses dans la base de données. Un code spécifique a été attribué à chaque article de la base de données ainsi que des codes spécifiques pour les différentes expériences incluses dans chaque étude. Afin de réduire les variations associées aux différentes méthodes d'analyse de laboratoire, la composition chimique des régimes a été calculée à partir des valeurs du NRC (2012) et de l'INRA (Sauvant *et al.*, 2004) pour les différents ingrédients des régimes et des suppléments minéraux ajoutés. Le flux d'absorption totale de Zn et de Cu a été calculé en utilisant la teneur alimentaire totale de Zn et de Cu multipliée par le coefficient de la

digestibilité totale apparente (ATTD) expérimentale de ces minéraux. Le même calcul a été utilisé pour évaluer le flux d'absorption iléale du Zn et du Cu en utilisant la valeur du coefficient de digestibilité iléale apparente (AID). Cependant, compte tenu du nombre de données sur l'AID de ces minéraux, il n'a pas été possible de faire une analyse statistique valable de ces données.

1.2. Étude du méta-dispositif et analyses statistiques

Des statistiques descriptives (moyenne, écart-type, minimum et maximum) ont été générées pour chaque variable (Tableau 1). Une attention particulière a été accordée au méta-dispositif, en regardant graphiquement la relation entre les variables X prises deux à deux pour évaluer l'ampleur de la variation, identifier les valeurs aberrantes et déceler la présence de colinéarité. Les relations Y et X ont également été étudiées graphiquement ainsi que les relations inter et intra expérience pour voir la forme des relations et orienter les modèles statistiques à utiliser (Sauvant *et al.*, 2008).

Toutes les variables X incluant la composition nutritionnelle en protéine brute, fibre ADF et NDF, P, calcium, Zn, Cu et P phytique et les ATTD du P, du calcium, de la protéine et de la fibre ADF et NDF et leurs interactions ont été évaluées dans la méta-analyse comme des prédicteurs du flux d'absorption totale de Zn et de Cu. Seules les variables significatives ont été retenues dans les modèles, à savoir l'ATTD du P, le Zn et le Cu provenant des ingrédients et des sources de supplément minéral en Zn et Cu. L'interaction entre certaines variables a également été étudiée.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du modèle mixte ANOVA en utilisant le logiciel Minitab (version 20, State College, PA, États-Unis). La publication a été ajoutée en effet aléatoire (Saint-Pierre, 2001). Les relations entre le flux d'absorption des minéraux traces (Zn et Cu) et les variables indépendantes ont été étudiées avec le modèle comme suit :

$$Y_{ij} = \mu + \mu_i + \beta_1 X_{ij} + \beta_2 [X_{ij}]^2 + e_{ij}$$

Avec Y_{ij} = la valeur de la variable dépendante Y dans l'étude i avec les traitements j, X_{ij} = variable indépendante, μ = l'ordonnée à l'origine commune à toutes les études, μ_i = effet fixe de l'étude i sur l'ordonnée à l'origine, β_1 = le coefficient linéaire de la relation, β_2 = le coefficient quadratique de la relation, et e_{ij} = l'erreur résiduelle. Les variables jugées significatives (P -value < 0,05) ou ayant une tendance (P -value < 0,10) ont été conservées.

1.3. Évaluation du modèle

L'ensemble des données ont été utilisées pour déterminer le modèle. Les performances du modèle ont donc été évaluées par une validation croisée. La RMSE (Écart-type résiduel) et la RMSEP (Écart-type résiduel de prédiction) ont été utilisées pour tester la précision des équations de prédictions du flux d'absorption du Zn et du Cu alimentaire.

2. RÉSULTATS

Les modèles ont été générés sur la base du flux d'absorption totale de Cu et de Zn et sur les facteurs affectant ce flux. Les effets de plusieurs facteurs tels que le type d'aliment, les concentrations de composants alimentaires et les interactions entre les composants alimentaires ont été étudiés, mais n'étaient pas significatifs. Seuls les effets significatifs seront présentés dans cette étude.

Tableau 1 – Statistiques descriptives utilisées dans la prédiction de l'absorption totale du zinc (Zn) et du cuivre (Cu)

Variable ^{1,2}	Écart-type			
	Moyenne	type	Min	Max
Énergie nette, kcal/kg	2326	213	1617	2708
Énergie brute, kcal/kg	3753	227	3304	4394
Énergie digestible, kcal/kg	3315	272	2797	4046
Matière sèche %	90,1	0,7	89,0	90,6
Cendres, %	3,0	0,9	1,1	5,0
Protéines brutes, %	18,8	2,7	11,0	22,9
Calcium, %	0,6	0,1	0,1	1,0
P, %	0,5	0,1	0,3	0,8
P Phytique, %	0,22	0,05	0,09	0,45
Zn total, mg/kg	226	512	23	3510
Zn total absorbé, mg/kg	46	110	-255	848
Cu total, mg/kg	45,3	4,4	2,9	280,0
Cu total absorbé mg/kg	9,1	29,9	-39,6	203,4
Fibre ADF, %	3,4	1,1	0,9	7,1
Fibre NDF, %	8,9	2,9	1,7	22,4
ATTD P, %	59,1	16,0	32,5	96,5
ATTD calcium, %	64,2	14,2	37,6	98,3
ATTD Zn, %	29,8	25,8	-52,9	87,9
ATTD Cu, %	25	50	-36	495

¹ Nombre d'observations :165, ATTD : Digestibilité apparente totale.

² Les valeurs sont exprimées en % ou par kg d'aliment

L'équation de régression générale (Tableau 2) pour le flux total d'absorption de Zn basée sur les sources minérales de Zn (organique ou inorganique) et le Cu total dans le régime alimentaire avait une ordonnée à l'origine non différente de 0 (P -value = 0,783). L'effet de la source organique du Zn était linéaire (P -value < 0,01) et quadratique (P -value < 0,05) avec une absorption maximale obtenue avec un apport de 108 mg/kg d'aliment ingéré. L'effet de la source inorganique de Zn était également linéaire (P -value < 0,01) et quadratique (P -value = 0,080) avec une absorption maximale obtenue avec un apport de 169 mg/kg d'aliment ingéré. Le Zn provenant des ingrédients n'avait pas d'effet significatif sur l'absorption totale du Zn (P -value = 0,202). Le contenu total en Cu avait un effet linéaire négatif sur l'absorption du Zn (P -value = 0,051). Ce modèle avait un R^2 égal de 94 % et un écart-type résiduel de 6,9 mg/kg d'aliment ingéré.

Tableau 2 – Modèle de prédiction de l'absorption totale du zinc (Zn, mg/kg d'aliment ingéré) en fonction des sources de zinc et de la concentration de cuivre (Cu, mg/kg d'aliment ingéré)

Paramètres	Valeur	P -value ¹
Ordonnée à l'origine	3,358	0,783
Zn inorganique	0,328	0,001
Zn ² inorganique	-0,001	0,010
Zn organique	0,431	0,001
Zn ² organique	-0,001	0,080
Cu total	-0,121	0,050
R^2 , %	94	
RMSE ¹ , mg/kg	6,90	

¹ RMSE: Ecart-type résiduel, P -value : valeur de probabilité

Dans le deuxième modèle, l'ATTD du P a été rajoutée à l'équation de prédiction (Tableau 3). Avec ce modèle, l'équation de régression générale obtenue pour l'absorption totale de Zn avait une ordonnée à l'origine différente de 0 (P -value < 0,002) et l'ATTD du P avait un effet positif et linéaire sur le flux d'absorption de Zn (P -value < 0,001). Le Zn provenant des ingrédients avait également un effet linéaire et positif sur

l'absorption du Zn (P -value < 0,05). Des effets linéaires et quadratiques (P -value < 0,01 et P -value < 0,05) étaient observés pour les sources minérales de Zn inorganiques (valeur maximale d'absorption à 116 mg/kg d'aliment ingéré) ainsi que pour les sources de Zn organiques (valeur maximale d'absorption à 104 mg/kg d'aliment ingéré). Ce modèle présentait un R^2 de 96 % et une RMSE à 6,89 mg/kg d'aliment ingéré. Une validation croisée a été effectuée pour ce modèle et a montré que les moyennes expérimentale et prédite étaient proches (Tableau 4). Par ailleurs, l'absorption estimée et l'absorption observée du Zn étaient étroitement liées. L'ordonnée à l'origine et la pente n'étaient pas significativement différentes de 0 et 1, respectivement (Figure 1).

Tableau 3 – Modèle de prédiction de l'absorption totale du Zn (Zn, mg/kg d'aliment ingéré) en fonction des sources de Zn et de la digestibilité apparente (ATTD, %) du P

Paramètres	Valeur	P -value ¹
Ordonnée à l'origine	-30,015	0,020
Zn inorganique	0,530	0,001
Zn ² inorganique	-0,002	0,046
Zn organique	0,495	0,001
Zn ² organique	-0,002	0,015
Zn des ingrédients	0,387	0,015
ATTD du P	0,487	0,001
R^2 , %	96	
RMSE ¹ , mg/kg	6,89	

¹RMSE : Écart-type résiduel, P -value : valeur de probabilité

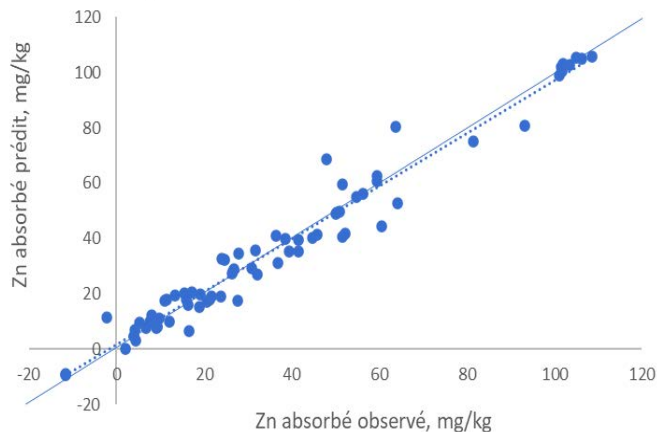
Tableau 4 - Absorption totale apparente du Cu et du Zn observée dans les régimes expérimentaux et prédite par les modèles

	Zn absorbé, mg/kg d'aliment ingéré	Cu absorbé, mg/kg d'aliment ingéré
Moyenne expérimentale	33,50	6,47
Moyenne prédite	33,57	6,48
d ¹	-0,07	-0,01
Ordonnée à l'origine (A)	-0,31	-0,06
P -value ²	0,74	0,81
Pente de la régression (B)	1,00	1,00
P -value ²	0,65	0,74
R^2	0,96	0,95
RMSEP ³ , mg/kg	6,07	1,31

¹ Écart moyen par rapport à la bissectrice.

² Valeur de probabilité que A et B diffèrent de 0 et 1 respectivement

³RMSEP : Ecart-type résiduel de la prédiction

**Figure 1**- Analyse de régression de la relation entre l'absorption totale de Zn observée et celle prédite par le modèle¹

¹La ligne pointillée correspond à la droite de régression alors que la ligne pleine est la bissectrice $x=y$ (voir le tableau 3 pour l'équation).

L'équation de régression générale pour le flux d'absorption totale de Cu (Tableau 5) en fonction des apports de Cu minérale (organique et inorganique), des apports par les ingrédients et la concentration du régime en Zn avait une ordonnée à l'origine non différente de 0 (P -value = 0,705). Les effets du Cu organique et inorganique sur l'absorption totale du Cu étaient linéaires et positifs (respectivement P -value < 0,001 et P -value < 0,001). En ce qui concerne l'effet de la concentration totale en Zn dans le régime alimentaire, l'analyse a révélé un effet linéaire et négatif (P -value < 0,01). Le R^2 pour ce modèle était de 93 % et la RMSE était égal à 1,65 mg/kg d'aliment ingéré.

Tableau 5 – Modèle de prédiction de l'absorption totale du Cu (mg/kg d'aliment) en fonction des sources de Cu et de la concentration en Zn (mg/kg d'aliment)

Paramètres	Valeur	P-value ¹
Ordonnée à l'origine	0,692	0,705
Cu organique	0,455	0,001
Cu inorganique	0,389	0,001
Zn total	-0,021	0,050
R^2 , %	93	
RMSE ¹ , mg/kg	1,65	

¹RMSE: Ecart-type résiduel; P-value : valeur de probabilité

L'équation de régression générale pour l'absorption de Cu dans le deuxième modèle généré (Tableau 6) avait une ordonnée à l'origine différente de 0 (P -value < 0,010) et montrait une relation linéaire et positive entre l'ATTD du P et le flux d'absorption de Cu (P -value < 0,001). Les effets des sources organiques, inorganiques et des ingrédients du Cu étaient également linéaires et positifs (respectivement P -value < 0,001, P -value < 0,001 et P -value < 0,065) alors que la concentration totale en Zn du régime était négativement associée avec le flux d'absorption du Cu (P -value < 0,001). La validation croisée de ce modèle a montré que les moyennes expérimentales et prédites étaient proches (Tableau 4). L'ordonnée à l'origine et la pente n'étaient pas, respectivement, significativement différentes de 0 et 1 (Figure 2).

Tableau 6 – Modèle de prédiction de l'absorption totale du Cu (mg/kg d'aliment) en fonction des sources de Cu, la concentration en Zn (mg/kg) et de la digestibilité totale apparente (ATTD, %) du P

Paramètres	Valeur	P-value ¹
Ordonnée à l'origine	-6,126	0,010
Cu organique	0,479	0,001
Cu inorganique	0,409	0,001
Cu des ingrédients	0,376	0,065
ATTD du P	0,102	0,001
Zn total	-0,030	0,001
R^2 , %	95	
RMSE ¹ , mg/kg	1,52	

¹RMSE: Écart-type résiduel; P-value : valeur de probabilité

3. DISCUSSION

La présente étude visait à utiliser la méthode de méta-analyse pour comprendre, prédire et quantifier l'impact des facteurs affectant le flux total d'absorption du Zn et du Cu. Les sources minérales de Zn et le Cu sont couramment utilisées comme additif alimentaire pour les porcs sous forme organique ou inorganique (Holodova *et al.*, 2019). L'impact des sources de Zn et de Cu et la présence d'antagonistes obligent généralement les nutritionnistes à prévoir des marges de sécurité lorsqu'ils complètent les régimes en minéraux (Holen *et al.*, 2020).

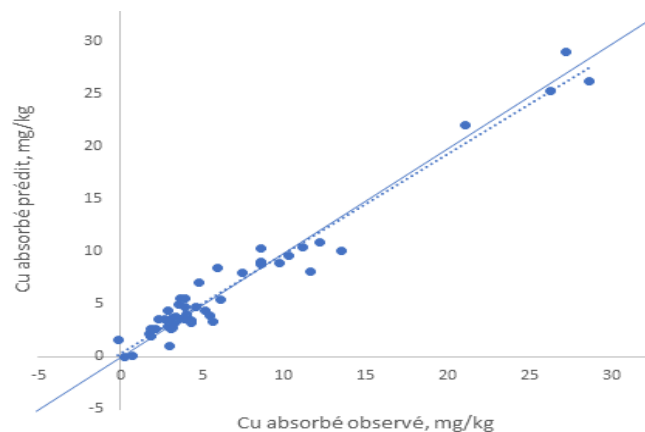


Figure 2 - Analyse de régression de la relation entre l'absorption totale de Cu observée et l'absorption totale de Cu prédite par le modèle.

¹La ligne pointillée correspond à la droite de régression alors que la ligne pleine est la bissectrice $X=Y$ (voir le tableau 6 pour l'équation).

La nature de la source de Zn et de Cu est connue pour influencer l'absorption de ces deux éléments (Ma *et al.*, 2018). Les sources organiques de Zn et de Cu auraient une plus grande biodisponibilité (Ma *et al.*, 2018). Pour le Zn, les résultats montrent une absorption maximale des sources organiques et inorganiques de Zn à un apport, respectivement, de 108 et 169 mg/kg d'aliment ingéré. A ces niveaux, la quantité de Zn absorbée serait de 24 et 27 mg/kg d'aliment ingéré, respectivement avec un taux d'absorption de 22 et 16 %. Des études antérieures sur l'utilisation du Zn chez les porcs ont révélé que les sources organiques de Zn ont une plus grande biodisponibilité et une meilleure digestibilité par rapport aux sources inorganiques (Świątkiewicz *et al.*, 2001 ; Cao *et al.*, 2002). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le Zn inorganique formerait des complexes avec des molécules organiques comme les phytates rendant le Zn insoluble et donc non absorbable (Liu *et al.*, 2014). Schlegel *et al.* (2013), en utilisant l'approche par la méta-analyse, avaient rapporté une digestibilité totale de 21 et 25% pour les sources inorganiques et organiques de Zn chez les porcs.

Pour le Cu, les valeurs des pentes observées entre le flux d'absorption de Cu et l'apport en Cu organique ou inorganique étaient de 0,455 et 0,389 suggérant, respectivement, un taux d'absorption de 45 et 39 %. Ces valeurs de digestibilité apparente du Cu seraient donc légèrement plus élevées pour les formes organiques. Elles se rapprochent également des valeurs obtenues par Lebel *et al.* (2014) et, comme pour le Zn, suggèrent une absorption légèrement supérieure pour les formes organiques.

En plus de l'apport en Zn et en Cu qui affecte leur flux d'absorption, la présente étude a montré un antagonisme entre la concentration d'un minéral sur l'absorption de l'autre. En fait, le Zn total du régime a eu un effet linéaire et négatif sur l'absorption du Cu. Le Zn est connu pour son effet antagoniste sur la biodisponibilité du Cu par la séquestration du Cu au sein des métallothionéines dont la synthèse est activée par le Zn. Cette protéine se lie au Cu dans l'entérocyte, ce qui mènerait à une séquestration du Cu et donc à une réduction de son absorption (Carlson *et al.*, 1999). En fait, le niveau de Cu alimentaire absorbé au niveau de la veine porte dépendrait du niveau de Zn dans le régime alimentaire (Dalto *et al.*, 2019). Une altération similaire de l'absorption du Cu a été observée lorsque le Zn alimentaire est supplémenté en excès (Matte *et al.*, 2017). Inversement, Veum *et al.* (2004) ont rapporté qu'une augmentation du Cu alimentaire peut réduire l'absorption du Zn chez le porcelet.

Bien qu'aucune autre composante du régime ne semble affecter le flux d'absorption du Zn et du Cu, la présente méta-analyse a montré que l'ATTD du P était positivement associée avec le flux d'absorption du Zn et du Cu. Il est connu que le P phytique peut lier les cations comme le Zn et le Cu (Selle et Ravindran, 2008 ; Bikker *et al.*, 2012). Les valeurs de teneurs en P total et en P phytique de la présente base de données montrent que le P phytique représente environ 45 à 50 % du P total, ce qui est représentatif des régimes alimentaires du porc charcutier (Gupta *et al.*, 2015 ; Planchenault *et al.*, 2019). Comme mentionné précédemment, le Zn et le Cu peuvent se lier aux phytates dans l'intestin grêle créant un complexe insoluble et rendant le minéral indigestible (Revy *et al.*, 2006 ; Blank *et al.*, 2012). L'hydrolyse complète ou partielle des phytates, en plus d'améliorer l'ATTD du P, améliorerait donc le flux d'absorption du Zn et du Cu comme montré par Adeola *et al.* (1995), Arredondo *et al.* (2019) et Revy *et al.* (2006).

Les modèles générés dans cette étude montrent que le Zn et le Cu provenant des ingrédients peuvent être une source significative de minéraux absorbables par le porc. Ces résultats sont différents de ceux rapportés par Schlegel *et al.* (2013) qui indiquaient que le Zn des ingrédients représentait un apport non-significatif de Zn absorbable. Toutefois, la prise en compte de l'ATTD du P et donc de la dégradation des phytates des ingrédients sur le flux de Cu et de Zn a peut-être permis de mettre en évidence la contribution du Zn et du Cu venant des ingrédients. Si l'on utilise la valeur moyenne de Zn et de Cu

provenant des ingrédients, soit 26,4 et 7,2 mg/kg d'aliment ingéré, l'apport de minéraux absorbables serait, respectivement, de 10,2 et 2,71 mg/kg d'aliment ingéré. Il faut aussi noter que les valeurs de l'ordonnée à l'origine des deux relations, que l'on peut associer aux pertes endogènes liées à la consommation du régime, ont pu être estimées à -6,13 et -30,01 mg/kg d'aliment ingéré. Ces valeurs associées aux valeurs moyennes de minéraux provenant des ingrédients ainsi qu'à un effet estimé de l'ATTD du P à 60 % correspondraient à des niveaux de Cu et de Zn absorbables de 2,72 et 10,81 mg/kg d'aliment ingéré. Ces valeurs de flux provenant des ingrédients ou associées à l'ATTD du P pourraient donc être considérées comme contribuant à un apport significatif lors de la supplémentation en Zn et en Cu inorganique ou organique, ce qui pourrait aboutir à la réduction de l'apport total en ces deux minéraux.

CONCLUSION

Cette étude a permis de confirmer l'interaction entre les flux d'absorption du Zn et du Cu. Ces flux seraient également influencés par l'amélioration de l'ATTD du P suggérant que la dégradation de facteurs antinutritionnels, comme les phytates, agit positivement sur les flux d'absorption de Zn et de Cu. Finalement, cette étude a permis d'estimer l'apport de Zn et de Cu absorbable venant des ingrédients ce qui peut faciliter l'évaluation des apports en suppléments nécessaires pour combler les besoins en minéraux du porc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adeola O., Lawrence B. V., Sutton A. L., Cline, T. R., 1995. Phytase-induced changes in mineral utilization in zinc-supplemented diets for pigs. *J. Anim. Sci.*, 73(11), 3384–3391.
- Arredondo M.A., Casas G.A., Stein H.H., 2019. Increasing levels of microbial phytase increases the digestibility of energy and minerals in diets fed to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 248, 27–36.
- Bikker P., Jongbloed A.W., Thissen J.T.N.M., 2012. Meta-analysis of effects of microbial phytase on digestibility and bioavailability of copper and zinc in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 90(SUPPL4), 134–136.
- Blank R., Naatjes M., Baum C., Köhling K., Ader P., Roser U., Susenbeth A., 2012. Effects of formic acid and phytase supplementation on digestibility and use of phosphorus and zinc in growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 90(Suppl4), 212–214.
- Burkett L.J., Stalder K.J., Powers W.J., Bregendahl K., Pierce J.L., Baas T.J., Shafer B.L., 2009. Effect of inorganic and organic trace mineral supplementation on the performance, carcass characteristics, and fecal mineral excretion of phase-fed, grow-finish swine. *Asian-Austral. J. Anim. Sci.*, 22(2), 1279–1287.
- Cao J., Henry P.R., Davis S.R., Cousins R.J., Miles R.D., Littell R.C., Ammerman C.B., 2002. Relative bioavailability of organic zinc sources based on tissue zinc and metallothionein in chicks fed conventional dietary zinc concentrations. *Anim. Feed Sci. Technol.*(1), 101, 161–170.
- Carlson M.S., Hill G.M., Link J.E., 1999. Early- and traditionally weaned nursery pigs benefit from phase-feeding pharmacological concentrations of zinc oxide: Effect on metallothionein and mineral concentrations. *J. Anim. Sci.*, 77(5), 1199–1207.
- Dalto D.B., Audet I., Matte, J.J., 2019. Impact of dietary zinc:copper ratio on the postprandial net portal appearance of these minerals in pigs. *J. Anim. Sci.*, 97(9), 3938–3946.
- Dong B., Liu S., Wang C., Cao Y., 2018. Effects of xylanase supplementation to wheat-based diets on growth performance, nutrient digestibility and gut microbes in weanling pigs. *Asian-Austral. J. Anim. Sci.*, 31(9), 1491–1499.
- Gupta R.K., Gangoliya S.S., Singh N.K., 2015. Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *J. Food Sci. Technol.*, 52(2), 676–684.
- Gaudré D., Quiniou N., 2015. Quelles teneurs en minéraux et en vitamines recommander pour le régime alimentaire ? *Les Cahiers de l'IFIP*, 2(1), 51–62.
- Holen J.P., Urriola P.E., Schwartz M., Jang J., Shurson G.C., Johnston L.J., 2020. Effects of supplementing late-gestation sow diets with zinc on preweaning mortality of pigs under commercial rearing conditions. *Transl. Anim. Sci.*, 4(2), txaa010.
- Holodova M., Cobanova K., Sefcikova Z., Barszcz M., Tušnio A., Taciak M., Gresakova L., 2019. Dietary zinc and fibre source can influence the mineral and antioxidant status of piglets. *Animals*, 9(8), 1–20.
- Jondreville C., Revy P.S., Jaffrezic A., Dourmad J.Y., 2002. Le cuivre dans l'alimentation du porc : Oligo-élément essentiel, facteur de croissance et risque potentiel pour l'Homme et l'environnement. *INRA Prod. Anim.*, 15(4), 247–265.
- Lebel A., Matte J.J., Guay F., 2014. Effect of mineral source and mannan oligosaccharide supplements on zinc and copper digestibility in growing pigs. *Arch. Anim. Nutr.*, 68(5), 370–384.
- Liu Y., Ma Y.L., Zhao J.M., Vazquez-Añón M., Stein H.H., 2014. Digestibility and retention of zinc, copper, manganese, iron, calcium, and phosphorus in pigs fed diets containing inorganic or organic minerals. *J. Anim. Sci.*, 92(8), 3407–3415.
- Ma Y.L., Lindemann M.D., Webb S.F., Rentfrow G., 2018. Evaluation of trace mineral source and preharvest deletion of trace minerals from finishing diets on tissue mineral status in pigs. *Asian Austral. J. Anim. Sci.*, 31(2), 252–262.
- Matte J.J., Girard C.L., Guay F., 2017. Intestinal fate of dietary zinc and copper: Postprandial net fluxes of these trace elements in portal vein of pigs. *J. Trace Elem. Med. Biol.*, 44, 65–70.

- Planchenault D., Smith A., Arroyo J., Thoby J., 2019. Description du contenu en phosphore phytique des aliments complets pour les porcins. Journées Rech. Porcine, 51, 155–156.
- Poulsen H.D., Blaabjerg K., Sørensen K.U., 2016. High dietary zinc supply reduces the digestibility of phosphorus in pig diets. J. Anim. Sci., 94(7), 332–334.
- Revy P.S., Jondreville C., Dourmad J. Y., Guinotte F., Nys Y., 2002. Bioavailability of two sources of zinc in weanling pigs. Anim. Res., 51(4), 315–326.
- Revy P.S., Jondreville C., Dourmad J. Y., Nys Y., 2003. Le zinc dans l'alimentation du porc : Oligo-élément essentiel et risque potentiel pour l'environnement. INRA Prod. Anim., 16(1), 3–18.
- Revy P.S., Jondreville C., Dourmad J. Y., Nys Y., 2006. Assessment of dietary zinc requirement of weaned piglets fed diets with or without microbial phytase. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr., 90(1–2), 50–59.
- Saint-Pierre N.R., 2001. Invited review: integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model methodology. J. Dairy Sci., 84(4), 741-755.
- Sauvant D., Letourneau-Montminy M.P., Schmidely P., Boval M., Loncke C., Daniel J.B., 2020. Review: Use and misuse of meta-analysis in animal science. Animal, 14(S2), s207–s222.
- Sauvant D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables INRA-AFZ de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: 2ème édition. ISBN 2738011586, 306 p. INRA Editions Versailles
- Sauvant D., Schmidely P., Daudin J.J., St-Pierre N.R., 2008. Meta-analyses of experimental data in animal nutrition. Animal, 2(8), 1203–1214.
- Schlegel P., Sauvant D., Jondreville C., 2013. Bioavailability of zinc sources and their interaction with phytates in broilers and piglets. Animal, 7(1), 47–59.
- Selle P.H., Ravindran V., 2008. Phytate-degrading enzymes in pig nutrition. Livest.Sci., 113(2–3), 99–122.
- Świątkiewicz S., Koreleski J., Zhong D.Q., 2001. The bioavailability of zinc from inorganic and organic sources in broiler chickens as affected by addition of phytase. J. Anim. Feed Sci., 10(2), 317–328.
- Veum T.L., Carlson M.S., Wu C.W., Bollinger D.W., Ellersieck M.R. 2004. Copper Proteinates in Weanling Pig Diets for Enhancing Growth Performance and Reducing Fecal Copper Excretion Compared with Copper Sulfate. J. Anim. Sci., 82 (4), 1062–1070.
- Wedekind K.J., Lewis A.J., Giesemann M.A., Miller P.S., 1994. Bioavailability of zinc from inorganic and organic sources for pigs fed corn-soybean meal diets J. Anim. Sci., 72(10), 2681–2689
- Yu Y., Lu L., Wang R.L., Xi L., Luo X.G., Liu, B., 2010. Effects of zinc source and phytate on zinc absorption by in situ ligated intestinal loops of broilers. Poult. Sci., 89(10), 2157–2165.