



Impact de l'apport de zinc et de cuivre sur la digestibilité des minéraux chez les porcs en croissance

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

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

Frederic.guay@fsaa.ulaval.ca

Impact de l'apport de zinc et de cuivre sur la digestibilité des minéraux chez les porcs en croissance

Cette étude visait à évaluer l'effet des niveaux alimentaires de zinc (Zn) et cuivre (Cu) sur leurs digestibilités apparentes totales (DTA) et iléales (DIA) et celle du manganèse (Mn), du calcium (Ca) et du phosphore (P). Six porcs ($25,6 \pm 1,59$ kg) étaient chirurgicalement équipés d'une canule en T au niveau de l'iléon distal. Dans une conception en Chassé croisée, les porcs ont reçu successivement pendant quatre périodes l'un des quatre traitements à base de maïs-tourteau de soja apportant deux niveaux de Zn (100 et 500 mg/kg sous forme d'oxyde) et deux niveaux de Cu (40 et 80 mg/kg sous forme de sulfate). Chaque période comportait 5 jours d'adaptation et 2 jours pour la collecte du digesta iléal et des matières fécales. Les résultats ont montré qu'un niveau élevé de Zn augmentait la DIA de Zn et Mn ($P < 0,01$) mais diminuait la DIA du Ca ($P < 0,05$). Le niveau élevé de Cu tendait à améliorer son DIA, mais uniquement lorsqu'un niveau élevé de Zn était utilisé (Zn \times Cu, $P = 0,051$). La DTA du Zn, Cu, Mn et P était plus élevée chez les porcs recevant 500 mg/kg de Zn ($P < 0,01$). Le niveau élevé de Cu augmentait son DTA ($P < 0,01$) mais réduisait celui du Ca lorsqu'un faible niveau de Zn était ajouté (Zn \times Cu, $P < 0,01$). Cette étude a confirmé que la DIA et la DTA du Zn et du Cu pouvaient être affectées par leurs niveaux alimentaires et que les niveaux élevés (500 et 80 mg/kg) de ces minéraux réduisaient la DTA et la DIA de Ca et augmentait la DTA de P.

Impact of zinc and copper intake on digestibility of minerals in growing pigs

This study aimed to evaluate the effects of dietary levels of Zn and Cu on their ileal (AID) and total tract (ATTD) digestibility and that of manganese (Mn), calcium (Ca), and phosphorus (P). Six crossbred pigs (25.6 ± 1.59 kg) were surgically equipped with a single-T cannula in their distal ileum. In a cross-over design, pigs received during four periods one of four maize-soya beans meal diets supplemented with two levels of Zn (100 or 500 mg/kg as oxide) and two levels of Cu (40 or 80 mg/kg as sulphate). included 5 days of adaptation and 2 days for the collection of ileal digesta and feces. The results showed that a high level of Zn increased Zn and Mn AID ($P < 0.01$) but decreased Ca AID ($P < 0.05$). The high level of Cu improved Cu AID, but only when a high level of Zn was used (Zn \times Cu, $P = 0.051$). The ATTD of Zn, Cu, Mn, and P were higher in pigs that received 500 mg/kg of Zn ($P < 0.01$). The high level of Cu also increased its ATTD ($P < 0.01$) but reduced that of Ca when a low level of Zn was added (Zn \times Cu, $P < 0.01$). This study confirmed that the AID and ATTD of Zn and Cu could be influenced by their dietary level, and that the high levels of these minerals (500 and 80 mg/kg) reduced the ATTD and AID of Ca and increased the ATTD of P.

INTRODUCTION

Longtemps utilisés, et encore utilisés dans certains pays, pour leurs propriétés de facteur de croissance, le Cu et le Zn sont introduits à des doses thérapeutiques dans l'aliment du porc en post-sevrage et permettent de répondre à leurs rôles physiologiques, supporter la croissance et améliorer leur santé (Jondreville *et al.*, 2002 ; Revy *et al.*, 2003). Cette pratique est maintenant remise en question notamment en raison de l'impact environnemental de ces minéraux.

Les besoins en minéraux traces pour optimiser les performances de croissance du porc sont peu connus (Burkett *et al.*, 2009). Selon le NRC (2012), les besoins en Zn des porcs en croissance sont estimés entre 50 et 100 mg/kg d'aliment, tandis que les besoins en Cu se situent autour de 3 à 6 mg/kg d'aliment. Cette imprécision de l'évaluation des besoins en minéraux a conduit l'industrie de l'alimentation animale à utiliser des marges de sécurité pour la supplémentation en minéraux traces (Floh *et al.*, 2016 ; Dalto et da Silva, 2020).

L'évaluation variable des besoins en minéraux provient en partie de la variation de la biodisponibilité ou de la digestibilité des différentes sources de minéraux traces et des facteurs nutritionnels qui peuvent affecter leurs digestibilités. Par exemple, la teneur totale en Zn ou en Cu pourrait ne pas refléter la biodisponibilité des nutriments, car ces minéraux pourraient interagir entre eux et avec d'autres composants de l'alimentation (Gaudré et Quiniou, 2015). En effet, le Zn et le Cu pourraient interagir avec les différents composants alimentaires tels que les fibres et les phytates (PP) (Bikker *et al.*, 2012 ; Dong *et al.*, 2018). De plus, le Zn et le Cu sont des antagonistes et peuvent interagir avec leur digestion et absorption respective (Dalto *et al.*, 2019 ; Veum *et al.*, 2004). De plus, le supplément en Zn et Cu peut agir sur la capacité d'absorption de l'intestin grêle et par conséquent sur la digestion et l'absorption d'autres nutriments incluant les minéraux (Dove, 1995 ; Li *et al.*, 2006).

L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'effet de la concentration alimentaire en Zn et Cu sur la digestibilité iléale et totale des minéraux y compris les minéraux traces chez les porcs en croissance.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Animaux et régimes alimentaires

Pour étudier l'effet de la concentration en Zn et Cu, un régime à base de maïs-blé-tourteau de soja (Énergie nette, 9,74 MJ/kg) a été supplémenté avec deux niveaux de Zn (100 et 500 mg/kg sous forme d'oxyde) et deux niveaux de Cu (40 et 80 mg/kg sous forme de sulfate) dans un dispositif factoriel 2 × 2 : Cu40_Zn100, Cu80_Zn100, Cu40_Zn500, Cu80_Zn500. Les autres minéraux et nutriments ont été ajoutés selon les recommandations du NRC (2012) pour le porc en croissance.

Six porcs mâles castrés (25,6 ± 1,59 kg) ont été transférés d'une ferme commerciale (Olymel, St-Hyacinthe, Québec, Canada) à l'unité de recherche de l'Université Laval. Ils ont été gardés individuellement dans des enclos de 1,05 × 2,0 m à 20°C avec 12 h de lumière par jour. Ils avaient accès à volonté à l'eau potable. Un aliment commercial (Agri-Marché, St-Isidore, Québec, Canada) pour les porcs en croissance a été distribué pour la période d'adaptation avant la chirurgie. Sept jours après leur arrivée, les animaux ont été équipés chirurgicalement d'une canule en T dans l'iléon distal en se basant sur la procédure de Wubben *et al.* (2001). Après la chirurgie, la ration alimentaire

journalière a été augmentée de 200 g par jour jusqu'à 1,4 kg par jour.

L'expérience a été réalisée selon un schéma en chassé-croisé avec les traitements (régimes alimentaires) comme facteurs fixes principaux et les porcs et les périodes comme des facteurs aléatoires. Les animaux ont reçu l'un des quatre régimes pour chaque période pour un total de quatre périodes. Ils ont été pesés avant chaque période pour établir la quantité d'aliments à distribuer (40 g/kg de poids corporel) pour garantir la consommation complète des aliments. Les porcs ont été nourris deux fois par jour à 08h00 et 16h00. Ils ont été gardés avec un libre accès à l'eau. Chaque période était divisée en 5 jours d'adaptation aux régimes suivis de 2 jours de collecte de digesta et de fèces. Le digesta et les fèces collectés ont été stockés à -20°C jusqu'à leur analyse. Les cendres insolubles (célite) ont été utilisées comme marqueur indigestible.

Tableau 1 - Composition des aliments expérimentaux distribués aux porcs

Cu	40 ^b	80 ^c	40 ^d	80 ^e
An	100 ^b	100 ^c	500 ^d	500 ^e
Ingrédients, g/kg				
Blé	150	150	150	150
Maïs	588	588	588	588
Tourteaux de soja	200	200	200	200
Pierre à chaux	12	12	12	12
Phosphate bicalcique	8,5	8,5	8,5	8,5
Sel	3	3	3	3
DL-Méthionine	0,3	0,3	0,3	0,3
L-Lysine HCl	3	3	3	3
L-Thréonine	0,5	0,5	0,5	0,5
Célite	30	30	30	30
Vitamines et oligo-éléments ^a	5	5	5	5
Composition analysée				
Protéine brute, g/kg	16,6	16,7	16,1	16,7
Phosphore, g/kg	5,1	5,3	5,2	4,9
Calcium, g/kg	8,2	8,5	8,4	8
Fibre NDF, g/kg	131	131	142	139
Fibre ADF, g/kg)	79	77	82	91
Zinc, mg/kg	127	117	433	406
Cuivre, mg/kg	42	87	42	85
Fer, mg/kg	361	361	380	302
Manganèse, mg/kg	31	31	33	29
Cendre insoluble, %	1,87	1,89	2,13	2,05

^a Apport par kg de ration : palmitate de vitamine A 6 000 UI, vitamine D3 600 UI, acétate de vitamine E 60 mg, bisulfite de sodium de ménadione 3,75 mg, riboflavine 8 mg, niacine 44,0 mg, pantothénate de calcium 25,0 mg, vitamine B12 25,0 µg, Fe (ferreux sulfate) 150 mg, I (iodate de potassium) 0,30 mg, Mn (sulfate manganéux) 10 mg, Se (sélénite de sodium) 0,30 mg.

^b Apport par kg de ration : Cu (sulfate de cuivre) 40 mg, Zn (oxyde de zinc) : 100 mg.

^c Apport par kg de ration : Cu (sulfate de cuivre) 80 mg, Zn (oxyde de zinc) : 100 mg.

^d Apport par kg de ration : Cu (sulfate de cuivre) 40 mg, Zn (oxyde de zinc) : 500 mg.

^e Apport par kg de ration : Cu (sulfate de cuivre) 80 mg ; Zn (oxyde de zinc) : 500 mg.

1.2. Méthodes analytiques

Les échantillons de digesta et de fèces ont été lyophilisés et broyés à l'aide d'un broyeur Cyclotec™ (FOSS, Nanterre, Paris, France) à une granulométrie inférieure à 1 mm. Les aliments, les digesta et les matières fécales ont été analysés pour la matière sèche (MS), le phosphore (P), le calcium (Ca), le Zn, le Cu, le fer (Fe) et le manganèse (Mn). Des échantillons ont été préparés pour quantifier les minéraux selon la méthode AOAC 968.08.

Le Ca a été analysé selon la méthode AOAC 938.08 par spectroscopie d'absorption atomique (Perkin Elmer Analyst 400, Waltham, MA, USA) et le P a été analysé par colorimétrie avec le réactif molybdovanadate (méthode AOAC 965.17). Les concentrations en minéraux traces ont été mesurées à l'aide d'un spectroscope à plasma à couplage inductif (ICP) (Optima 4300, Perkin Elmer, Wellesley, MA, USA). Les cendres insolubles dans HCl ont été déterminées par la méthode décrite par McCarthy *et al.* (1974).

1.3. Calcul des données et analyse statistique

Les cendres insolubles dans le HCl (I Cendres) ont été utilisées comme marqueur indigestible. La digestibilité totale apparente (DTA) et la digestibilité iléale apparente (DIA) des nutriments chez les porcs nourris avec les régimes expérimentaux ont été calculées selon l'équation suivante (Stein et Bohle, 2007) :

Digestibilité apparente iléale ou fécale [%] =

$$\frac{1 - (\text{Nutriments}_{\text{digesta ou matières fécales}} \times \text{I Cendres}_{\text{Aliment}})}{\text{Nutriments}_{\text{Aliment}} \times \text{I Cendres}_{\text{digesta ou matières fécales}}} \times 100$$

Les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel Minitab (version 20, State Collège, PA, USA). La DIA et DTA des nutriments a été analysée en utilisant la procédure MIXTE avec l'animal et la période comme des effets aléatoires et le minéral

(Zn ou Cu) et le niveau (100 vs 500 ou 40 vs 80) comme des effets fixes dans un arrangement factoriel. Dans cette étude, les *P-values* < 0,05 ont été considérées comme significatives et les *P-values* < 0,10 comme tendance.

2. RÉSULTATS

Dans cette étude, la DIA du Zn était plus élevée dans le traitement Zn500 que dans le traitement Zn100 ($P < 0,05$, Tableau 2). Les porcs nourris avec les traitements Zn500 avaient également une DIA du Mn plus élevée ($P < 0,05$) mais une DIA du Ca plus faible ($P < 0,05$). Pour le Fe, la combinaison d'un niveau élevé de Cu et de Zn avait tendance à réduire sa DIA (Zn × Cu, $P = 0,08$). La hausse de la supplémentation en Cu de 40 à 80 mg/kg a augmenté la DIA du Cu ($P < 0,05$) mais l'effet était plus prononcé lorsque le régime était aussi complété par le traitement avec Zn500 (Zn × Cu, $P < 0,05$). La DIA du P n'a pas été affectée par les niveaux alimentaires de Zn ou de Cu.

Les porcs nourris avec un régime supplémenté de 80 mg/kg de Cu avaient une DTA du Cu plus élevée ($P < 0,05$) et avaient tendance à avoir une DTA du Fe plus faible que ceux nourris avec un régime Cu40 ($P = 0,06$). Le niveau de Zn alimentaire n'a eu aucun effet sur la DTA du Fe.

Le niveau alimentaire plus élevé de Zn a entraîné une DTA plus élevée du Zn, Cu et Mn ($P < 0,05$). Cependant pour le Mn, l'augmentation était plus prononcée lorsque le régime contenait 40 mg/kg de Cu (Zn × Cu, $P < 0,05$). La DTA du Ca était plus élevée pour le traitement Zn500 que pour le traitement Zn100 ($P < 0,05$, Tableau 2) mais la différence n'était significative que dans les régimes supplémentés avec 80 mg/kg de Cu (Zn × Cu, $P < 0,05$). La DTA du P était plus élevée chez les porcs recevant 500 mg/kg de Zn ($P < 0,05$).

Tableau 2 - Effet du niveau alimentaire de zinc et de cuivre sur la digestibilité des nutriments chez les porcs en croissance

Zinc, mg/kg	100		500		SEM	Probabilité		
	40	80	40	80		Zn	Cu	Zn×Cu
Digestibilité iléale apparente, %								
Zinc	29,6	23,8	49,1	51,4	6,6	0,001	0,747	0,451
Cuivre	26,9	32,0	22,9	40,7	4,5	0,438	0,003	0,051
Fer	55,2	63,0	59,5	49,1	5,9	0,344	0,804	0,084
Manganèse	10,4	19,5	36,4	40,9	6,3	0,001	0,202	0,656
Phosphore	51,0	45,2	50,4	54,3	4,6	0,310	0,821	0,252
Calcium	69,0	58,8	55,2	67,7	3,9	0,551	0,781	0,015
Digestibilité totale apparente, %								
Zinc	15,1	13,4	49,5	50,7	8,7	0,001	0,943	0,716
Cuivre	23,1	36,1	27,5	47,6	2,8	0,008	0,001	0,202
Fer	62,4	57,7	64,2	55,4	6,9	0,931	0,062	0,544
Manganèse	10,2	21,9	50,0	47,8	3,4	0,001	0,172	0,050
Phosphore	46,6	41,8	49,9	56,2	3,5	0,007	0,790	0,065
Calcium	68,4	56,9	63,3	71,1	3,9	0,077	0,449	0,002

SEM : erreur standard de la moyenne

3. DISCUSSION

Les niveaux de Zn et de Cu utilisés dans cette étude ont été sélectionnés en se basant sur les niveaux rapportés par Flohr *et al.* (2016) et Dalto et da Silva (2020). Pour le Zn, la faible valeur de 100 mg/kg est proche des besoins du NRC (2012) et

représente la valeur moyenne utilisée par l'industrie de l'alimentation porcine en Amérique du Nord. Cette valeur est également très proche de celle utilisée en Europe et proposée par l'autorité européenne de sécurité alimentaire (EFSA) qui est de 150 mg/kg (Blaabjerg et Poulsen, 2017). La valeur élevée de 500 mg/kg correspond à la valeur maximale utilisée pour le porc en croissance en Amérique du Nord (Flohr *et al.*, 2016 ; Dalto et da

Silva, 2020). Pour le Cu, la valeur élevée à 80 mg/kg correspond à la valeur moyenne utilisée par l'industrie de l'alimentation animale chez les porcs en croissance. Les besoins en Cu proposés par le NRC (2012) et par l'EFSA (Blaabjerg et Poulsen, 2017) n'ont pas été retenus parce que ces valeurs étaient trop éloignées de la supplémentation utilisée par les élevages porcins (Flohr *et al.*, 2016 ; Dalto et da Silva, 2020).

Le premier objectif de cette étude était d'évaluer l'effet du niveau alimentaire de Zn et de Cu sur la digestibilité de ces deux minéraux traces. L'augmentation du niveau de Zn alimentaire de 100 à 500 mg/kg a augmenté la DIA et la DTA de Zn. Certains auteurs ont mentionné qu'une augmentation du Zn alimentaire à une valeur inférieure à 100 mg/kg augmentait la DTA de Zn (Revy *et al.*, 2004 ; Paulick *et al.*, 2011 ; Liu *et al.*, 2014). Poulsen et Larsen (1995) ont également noté une valeur maximale de DTA autour de 100 mg/kg suivie d'une baisse à 250 mg/kg. D'autres études n'ont cependant pas rapporté d'effet de l'augmentation du niveau de Zn alimentaire sur sa DTA pour des niveaux inférieurs à 100 mg/kg (Revy *et al.*, 2002) ou pour des valeurs supérieures à 150 mg/kg (Buff *et al.*, 2005). Matte *et al.* (2017) ont également noté une légère diminution du flux relatif d'absorption du Zn à la veine porte (flux net en % de l'apport) lorsque l'apport quotidien de Zn passait de 200 mg/j (100 mg/kg) à 400 mg/j (200 mg/kg). Il est connu que la digestibilité du Zn dépend de deux facteurs : sa solubilité dans les digesta et sa capacité d'absorption par la muqueuse intestinale (Maares et Haase, 2020). Cette capacité d'absorption dépend également de deux mécanismes, l'un actif et l'autre passif. Le transport actif fait appel à des transporteurs spécifiques présents à la surface apicale et basolatérale et est considéré comme un mécanisme saturable (Maares et Haase, 2020). L'expression de deux transporteurs serait partiellement régulée par l'apport en Zn (Maares et Haase, 2020). Le transport passif ne serait significatif que lorsque la concentration de Zn soluble dans le digesta augmente à plus de 200 µM (Maares et Haase, 2020). Dans notre étude, il est donc possible que l'absorption passive devienne significative à un niveau alimentaire de Zn de 500 mg/kg conduisant à une augmentation de l'absorption et donc de la DIA et de la DTA du Zn. Dans une étude récente, nous avons observé qu'une supplémentation de 500 mg/kg entraînait une concentration en Zn soluble dans le digesta iléal autour de 200 µM contre 58 µM pour 100 mg/kg (Ketata *et al.*, données non publiées), soutenant une éventuelle absorption passive. Dans le cas d'une digestibilité apparente totale ou iléale, son estimation dépend également des pertes endogènes en Zn. Cette perte endogène non spécifique a été déterminée à 9,2 mg/kg MS ingérée chez les porcelets (Yang *et al.*, 2019). Ces pertes expliquent pourquoi la DTA et la DIA progressent lorsque l'apport en Zn augmente jusqu'à environ 100-120 mg/kg mais a probablement un effet limité à un apport de 500 mg/kg.

Pour le Cu, les résultats ont montré une augmentation de la DIA et DTA de Cu avec l'augmentation de l'apport alimentaire en Cu de 40 à 80 mg/kg. Veum *et al.* (2004) n'ont montré aucun effet de l'apport de Cu (30 à 130 mg/kg) sur l'ATTD de Cu. Cette étude a cependant rapporté une diminution de la DTA de Cu à un niveau de 280 mg/kg par rapport à 30 mg/kg. Matte *et al.* (2017) ont également montré une diminution du flux portal relatif d'absorption (flux net en % de l'apport) de Cu lorsque l'apport quotidien de Cu passait de 20 mg/j (10 mg/kg) à 40 mg/j (20 mg/kg). Une réduction du flux portal (flux net en % de l'apport) de Cu a également été observée dans les régimes contenant 20 mg/j par rapport à ceux contenant 8 mg/j de Cu (Dalto *et al.*, 2019).

Espinosa et Stein (2021) ont rapporté que le taux d'absorption du Cu peut être affecté par le statut en Cu de l'animal et que la digestibilité du Cu peut être augmentée si les animaux sont déficients en Cu ce qui n'est probablement le cas dans notre étude considérant les apports en Cu. Comme pour le Zn, la digestibilité du Cu dépend de sa solubilité dans le digesta et de son absorption par la muqueuse intestinale. L'absorption intestinale du Cu dépend d'un mécanisme saturable actif impliquant des transporteurs spécifiques (van den Berghe et Klomp, 2009 ; Espinosa et Stein, 2021) et des pertes endogènes minimales. Yang *et al.* (2019) ont estimé les pertes endogènes totales de Cu à 23,4 mg/kg de MS ingérée. Comme pour le Zn, l'augmentation de l'apport alimentaire en Cu devrait augmenter la DIA et la DTA en réduisant la part relative des pertes endogènes en Cu.

Contrairement aux résultats rapportés par Dalto *et al.* (2019), les résultats de cette étude ont montré que la DTA et DIA du Cu étaient également augmentées lorsque l'aliment contenait 500 mg/kg de Zn contre 100 mg/kg. Dalto *et al.* (2019) ont suggéré que cette diminution du flux portal relatif serait due à la stimulation du Zn sur la production de métallothionéine qui séquestre le Cu dans les entérocytes. Cette augmentation de la production de la métallothionéine pourrait faciliter l'absorption du Cu par la membrane apicale des entérocytes en diminuant le Cu soluble intracellulaire et donc en augmentant le gradient de transfert et donc l'absorption par les entérocytes. Cependant, le Cu lié la métallothionéine ne pourrait pas être exporté vers le côté basolatéral des entérocytes via le complexe ATOX1-ATP7A (Van den Berghe et Klomp, 2009) réduisant ainsi le transfert vers la circulation portale. Les DIA et DTA seraient ainsi augmentées tout en réduisant le flux d'absorption porte.

Le niveau alimentaire de Zn et de Cu est également connu pour affecter la digestibilité d'autres minéraux traces comme le Mn et le Fe (Meyer *et al.*, 2002 ; Tokarcíková *et al.*, 2022). L'augmentation de l'apport en Zn de 100 à 500 mg/kg a augmenté la DIA et la DTA de Mn. Cette augmentation pourrait s'expliquer par une stimulation de la production de métallothionéine par le Zn (Martinez *et al.*, 2004), sachant que la métallothionéine est un facteur important dans l'absorption cellulaire du Mn (Himeno *et al.*, 2009). Pour le Fe, une combinaison de niveaux élevés de Cu et de Zn dans l'alimentation a eu tendance à réduire la DIA du Fe et un niveau élevé de Cu dans l'alimentation a eu tendance à réduire la DTA du Fe. Meyer *et al.* (2002) ont également noté un niveau élevé de Zn à 2000 et 3000 mg/kg diminuant la DTA de Fe. Cependant, Apgar et Kornegay (1996) n'ont observé aucun effet d'un niveau élevé de Cu alimentaire (200 mg/kg) sur la DTA de Fe. Néanmoins, dans un modèle in vitro de cellules Caco-2, il a été démontré que la carence en Cu stimulait l'absorption de Fe tandis qu'une concentration accrue de Cu réduisait l'absorption de Fe par une compétition directe pour les transporteurs, tels que DMT1 (Sharp, 2004).

Il est connu que les apports de Zn et Cu peuvent modifier la DTA du Ca et du P (Liu *et al.*, 2014 ; Blavi *et al.*, 2017 ; Barszcz *et al.*, 2019). Les résultats de la présente étude ont montré que la DIA et la DTA du Ca étaient plus élevées pour les traitements Cu40Zn100 et Cu80Zn500 que pour le traitement Cu80Zn100. Le même résultat a été observé pour la DTA du P. Des apports alimentaires élevés en Zn (1500-3000 mg/kg) sont connus pour réduire la DTA du P (Walk *et al.*, 2015 ; Poulsen *et al.*, 2016 ; Blavi *et al.*, 2017). Pour le Ca, Walk *et al.* (2015) et Poulsen *et al.* (2016) n'ont observé aucun effet d'un apport alimentaire élevé en Zn sur sa DTA tandis que Blavi *et al.* (2017) ont noté une

réduction de la DTA du Ca lorsqu'une quantité élevée de Zn a été ajoutée. Cependant, il convient de noter que les effets d'apports élevés en Zn sur la DTA du Ca et du P seraient plus prononcés lorsque la phytase est ajoutée à l'alimentation et donc que la concentration en P et Ca d'origine minérale est réduite (Walk *et al.*, 2015 ; Blavi *et al.*, 2017). L'absence de phytase, et donc un niveau plus élevé de P/Ca de source minérale, dans la présente étude pourrait expliquer l'effet limité de l'apport de Zn à 500 mg/kg sur les DTA du P et du Ca. Il est également possible que le Zn à 500 mg/kg n'augmente pas suffisamment la teneur en Zn du digesta pour agir négativement sur la solubilité du complexe phytate-Zn (Jondreville *et al.*, 2007). Par exemple, les études de Qian *et al.* (2016) et Poulsen *et al.* (2016) ont montré que l'ajout de 100 mg/kg Zn à un régime de base (35-40 mg/kg Zn) n'affectait pas la DTA du Ca et du P. Pour le Cu, un apport alimentaire élevé (250 mg/kg) n'a pas affecté le pourcentage de rétention de P et Ca (Dove, 1995). L'augmentation de l'apport en Cu de 85 à 170 mg/kg n'a également pas non plus affecté la DTA du P et du Ca (Lee *et al.*, 2001).

En se basant sur les résultats de la présente étude, les DTA et les DIA sont équivalentes pour la majorité des minéraux sauf

pour le cas du Zn où la DIA était supérieure à la DTA lorsqu'un niveau de 100 mg/kg de Zn a été ajouté au régime. Ce résultat est en accord avec celui rapporté par Tokarcíková *et al.* (2022) qui rapportent une DTA de 25 à 30 % comparativement à une digestibilité à l'iléon de 50 à 55 %. Ces résultats pourraient s'expliquer par les sécrétions endogènes de Zn dans le caecum et le colon ce qui viendrait réduire la DTA comparativement à la DIA. Toutefois, ce phénomène serait significatif seulement lors d'un faible apport en Zn.

CONCLUSION

L'étude actuelle a été menée pour étudier l'effet de la concentration alimentaire de Zn et de Cu sur leur digestibilité iléale et totale ainsi que la DIA et la DTA d'autres minéraux.

L'augmentation du niveau alimentaire de Zn et de Cu a augmenté leur DIA et DTA. Pour le Cu, l'augmentation de son DIA and DTA dépendrait du niveau de Zn suggérant que le mécanisme de digestion de Cu est modifié par l'apport de Zn. L'apport en Zn a également modifié la digestibilité du Mn et du Ca, ce qui confirme que l'apport en Zn peut agir sur les mécanismes de digestion d'autres minéraux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Apgar G.A., Kornegay E.T., 1996. Mineral balance of finishing pigs fed copper sulfate or a copper-lysine complex at growth-stimulating levels. *J. Anim. Sci.*, 74, 1594–1600.
- AOAC, Int. 2007. Official methods of analysis of AOAC International. AOAC Int., Gaithersburg, MD.
- Barszcz M., Taciak M., Tuśnio A., Čobanová K., Grešáková L., 2019. The effect of organic and inorganic zinc source, used in combination with potato fiber, on growth, nutrient digestibility and biochemical blood profile in growing pigs. *Livest. Sci.*, 227, 37–43.
- 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 (Supplement 4), 134–136.
- Blaabjerg K., Poulsen H. D., 2017. The use of zinc and copper in pig production. *DCA – Nationalt Center for Jordbrug Og Fødevarer.*, 23, 1–17.
- Blavi L., Sola-Oriol D., Perez J.F., Stein H.H., 2017. Effects of zinc oxide and microbial phytase on digestibility of calcium and phosphorus in maize-based diets fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 95, 847–854.
- Buff C.E., Bollinger D.W., Ellersieck M.R., Brommelsiek W.A., Veum T.L. 2005. Comparison of growth performance and zinc absorption, retention, and excretion in weanling pigs fed diets supplemented with zinc-polysaccharide or zinc oxide. *J. Anim. Sci.*, 83, 2380-2386.
- 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-Austr. J. Anim. Sci.*, 22, 1279–1287.
- 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, 3938–3946.
- Dalto D.B., da Silva C.A., 2020. A survey of current levels of trace minerals and vitamins used in commercial diets by the Brazilian pork industry - A comparative study. *Trans. Anim. Sci.*, 4, txa195.
- 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-Austr. J. Anim. Sci.*, 31, 1491–1499.
- Dove C.R., 1995. The effect of copper level on nutrient utilization of weanling pigs. *Journal of Animal Science.*, 73, 166-171.
- Espinosa C.D., Stein H.H., 2021. Digestibility and metabolism of copper in diets for pigs and influence of dietary copper on growth performance, intestinal health, and overall immune status: a review. *Journal of Animal Science and Biotechnology.*, 3, 1–12.
- Flohr J.R., Derouchey J.M., Woodworth J.C., Tokach M.D., Goodband R.D., Dritz S.S., 2016. A survey of current feeding regimens for vitamins and trace minerals in the US swine industry. *Journal of Swine Health and Production.*, 24, 290–303.
- Gaudré D., Quiniou N., 2015. Quelles teneurs en minéraux et en vitamines recommander pour le régime alimentaire ? *Les Cahiers de l'IFIP.*, 2, 51–62.
- Himeno S., Yanagiya T., Fujishiro H., 2009. The role of zinc transporters in cadmium and manganese transport in mammalian cells. *Biochimie.*, 91, 1218–1222.
- 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 Productions Animales.*, 15, 247–265.
- Jondreville C., Schlegel P., Hillion S., Chagneau A.M., Nys Y., 2007. Effects of additional zinc and phytase on zinc availability in piglets and chicks fed diets containing different amounts of phytates. *Livestock Science.*, 109, 60–62.
- Lee S.H., Choi S.C., Chae B.J., Lee J.K., Acda S.P., 2001. Evaluation of metal-amino acid chelates and complexes at various levels of copper and zinc in weanling pigs and broiler chicks. *Asian-Austr. J. Anim. Sci.*, 14, 1734-1740.
- Li X., Yin J., Li D., Chen X., Zang J., Zhou X., 2006. Dietary supplementation with zinc oxide increases IGF-I and IGF-I receptor gene expression in the small intestine of weanling piglets. *The Journal of Nutrition.*, 136, 1786-1791.
- 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, 3407–3415.
- Maares M., Haase H., 2020. A guide to human zinc absorption: general overview and recent advances of *in vitro* intestinal models. *Nutrients.*, 12, 762.

- Martinez M.M., Hill G.M., Link J.E., Raney N.E., Tempelman R.J., Ernst C.W., 2004. Pharmacological Zinc and Phytase Supplementation Enhance Metallothionein mRNA Abundance and Protein Concentration in Newly Weaned Pigs. *J. Nutr.*, 134, 538–544.
- 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.
- McCarthy J.F., Aherne F.X., Okai D.B., 1974. Use of HCl insoluble ash as an index material for determining apparent digestibility with pigs. *Can. J. Anim. Sci.*, 54, 107–109.
- Meyer T. A., Lindemann M. D., Cromwell G. L., Monegue H. J., Inocencio N., 2002. Effects of pharmacological levels of zinc as zinc oxide on fecal zinc and mineral excretion in weanling pigs. *The Professional Animal Scientist.*, 18, 162–168.
- National Research Council (NRC), 2012. Nutrient requirements of swine. 11th rev. ed. National Academies Press, Washington, DC, USA, 400 p.
- Qian L., Yue X., Hu L., Ma Y., Han X., 2016. Changes in diarrhea, nutrients apparent digestibility, digestive enzyme activities of weaned piglets in response to chitosan-zinc chelate. *J. Anim. Sci.*, 87, 564–569.
- Paulicks B.R., Ingenkamp H., Eder K., 2011. Bioavailability of two organic forms of zinc in comparison to zinc sulphate for weaning pigs fed a diet composed mainly of wheat, barley and soybean meal. *Arch. Anim. Nut.*, 65, 320–328.
- 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.
- 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, 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, 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, 3–18.
- Revy P. S., Jondreville C., Dourmad J. Y., Nys Y., 2004. Effect of zinc supplemented as either an organic or an inorganic source and of microbial phytase on zinc and other minerals utilisation by weanling pigs. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 116, 93–112.
- Sharp P., 2004. The molecular basis of copper and iron interactions. *Proc. Nutr. Soc.*, 63, 563-569.
- Stein H.H., Bohlke R.A., 2007. The effects of thermal treatment of field peas (*Pisum sativum L.*) on nutrient and energy digestibility by growing pigs. *J. Anim. Sci.*, 85, 1424-1431.
- Tokarcíková K., Cobanová K., Takácsová M., Barszcz M., Taciak M., Tuśnio A., Grešaková L., 2022. Trace mineral solubility and digestibility in the small intestine of piglets are affected by zinc and fibre sources. *Agric.*, 12, 517.
- Van den Berghe P.V.E., Klomp L.W.J., 2009. New developments in the regulation of intestinal copper absorption. *Nutri. Rev.*, 67, 658–672.
- Veum T.L., Carlson M.S., Wu C.W., Bollinger D.W., Ellersieck M.R., 2004. Copper proteinate in weanling pig diets for enhancing growth performance and reducing fecal copper excretion compared with copper sulfate. *J. Anim. Sci.*, 82, 1062–1070.
- Walk C. L., Wilcock P., Magowan E., 2015. Evaluation of the effects of pharmacological zinc oxide and phosphorus source on weaned piglet growth performance, plasma minerals and mineral digestibility. *Anim.*, 9, 1145–1152.
- Wubben J.E., Smiricky M.R., Albin D.M., Gabert V.M., 2001. Improved Procedure and Cannula Design for Simple-T Cannulation at the Distal Ileum in Growing Pigs. *Contemporary Topics in Laboratory Animal Science.*, 40, 27–31.
- Yang Z., Wu H., Archbold T., Yin X., Fan W., 2019. PSI-5 Intestinal responses and the determination of true total tract trace mineral digestibility and the endogenous losses in weanling pigs by the regression analysis technique. *J. Anim. Sci.*, 97(Supplément 3), 287-288.