EFFET DES FIBRES DE COLZA SUR LA DIGESTIBILITE DU PHOSPHORE ET DU CALCIUM D'ALIMENTS SUPPLEMENTES OU NON EN PHYTASE MICROBIENNE CHEZ LE POULET DE CHAIR DE 21 JOURS

Bournazel Marion[1,2], Lessire Michel[1], Klein Stéphanie[2], Même Nathalie[1], Peyronnet Corinne[3], Quinsac Alain[4], Duclos Michel J.[1] et Narcy Agnès[1].

[1]INRA, UR83 Recherches Avicoles, 37380 NOUZILLY ;
[2]MiXscience, Centre d'affaires ODYSSEE, Z.A.C. Cicé Blossac – CS 17228, 35172 BRUZ ;
[3]Terres Univia, 11 rue Monceau, 75008 PARIS ;
[4]Terres Inovia, 11 rue Monge, Parc industriel, 33600 PESSAC

agnes.narcy@inra.fr

RÉSUMÉ

L'incorporation de tourteau de colza dans les aliments est limitée par sa teneur élevée en phytates et en fibres alimentaires (FA). L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets des FA du colza et l'action de la phytase microbienne (*Aspergillus niger*) sur la digestibilité du phosphore (P) et du calcium (Ca). Pour ce faire, quatre niveaux de fibres ont été testés grâce à l'incorporation de tourteau de colza entier (AC1), de colza dépelliculé (AC2) ou de colza dépelliculé supplémenté en pellicules de colza (3,6% et 7,2% pour AC3 et AC4) dans des régimes contenant 0 ou 750 FTU de phytase/kg. De J10 à J21, 144 poulets mâles ont reçu l'un des huit aliments expérimentaux. A J21, les tibias et les organes ont été pesés et leur contenu prélevé. La digestibilité iléale apparente (DIA) et la rétention du P et du Ca ont été mesurées. Des contrastes polynomiaux ont été utilisés pour mesurer l'effet linéaire (Lin) de la phytase et de la graine dépelliculée, ainsi que les effets Lin et quadratique (Qua) de l'inclusion de pellicules. L'inclusion de pellicules dans les régimes supplémentés en phytase a entrainé une diminution du GMQ et du PV final (Lin, $P < 0,05$). Le poids du proventricule-gésier était plus élevé dans les régimes contenant des pellicules et son pH plus faible (Lin, $P < 0,10$). L'ajout de phytase a amélioré la DIA du P et la rétention du P et du Ca ($P < 0,001$). L'apport de pellicules dans les régimes avec phytase a amélioré la DIA du P et du Ca (Lin, Qua, $P < 0,01$), probablement grâce à une meilleure efficacité du proventricule-gésier. En revanche, la rétention du P et du Ca ainsi que la teneur en cendre ont été diminuées dans ces régimes, suggérant un déséquilibre au niveau métabolique ($P < 0,01$). Il semble donc exister une interaction positive entre la phytase et les FA du colza sur la DIA du P et du Ca mais le niveau adéquat de FA et de Ca à apporter reste à déterminer.

ABSTRACT

Impact of rapeseed fibers on phosphorus and calcium digestibility in 21 days old growing broilers fed diets supplemented with or without microbial phytase. The inclusion of rapeseed meal in diets is limited by its high content in phytates and dietary fiber (DF). The objective of this study was to evaluate the effects of DF from rapeseed and the action of microbial phytase (*Aspergillus Niger*) on the digestibility of phosphorus (P) and calcium (Ca). To do so, four levels of fiber were tested through the inclusion of regular rapeseed meal (AC1), of dehulled rapeseed meal (AC2) or dehulled rapeseed supplemented with rapeseed hulls (3.6% and 7.2% for AC3 and AC4) in diets containing 0 or 750 FTU phytase/kg. From d10 to d21, 144 broilers received one of eight experimental diets. On d21, tibias and organs were weighed and their contents removed. The apparent ileal digestibility (AID) and retention of P and Ca were measured. Polynomial contrasts were used to measure the linear effect (Lin) of the phytase and dehulled seed, and Lin and quadratic effects (Qua) of the inclusion of hulls. The inclusion of hulls in diets supplemented with phytase resulted in a decrease in average daily gain and final BW (Lin, $P < 0.05$). The weight of the proventriculus-gizzard was higher in diets with hulls and its pH lower (Lin, $P < 0.10$). The addition of phytase improved P DIA and the retention of P and Ca ($P < 0.001$). The inclusion of hulls in diets with phytase improved the DIA P and Ca (Lin, Qua, $P < 0.01$), probably due to better efficiency of the proventriculus-gizzard. However, the retention of P and Ca and ash content were reduced in these treatments, suggesting a metabolic imbalance ($P < 0.01$). It seems to be a positive interaction between phytase and DF from rapeseed on the DIA of P and Ca but the adequate level of DF and Ca remains to be determined.

INTRODUCTION

La durabilité des systèmes d'élevage repose en partie sur la valorisation de ressources locales telles que le tourteau de colza (TC). Cependant, son incorporation est limitée par sa teneur élevée en fibres alimentaires (FA), qui agissent comme diluants et facteurs antinutritionnels. Le procédé de dépelliculage de la graine de colza avant trituration apporte une amélioration intéressante pour les filières de monogastriques car il réduit la teneur en FA et augmente la teneur en protéines du TC (Carré et al., 2015). Cependant, l'effet de la teneur en FA du colza sur la digestibilité de phosphore (P) du poulet de chair n'a jamais été étudié, alors que le colza contient une quantité non négligeable de phytate (INRA-AFZ, 2002). Dans un contexte où l'apport alimentaire et les rejets de P demandent à être précisément maitrisés, une meilleure description des interactions de cet élément avec les autres constituants de la matrice alimentaire s'avère nécessaire (Rousseau, 2013).

D'après la littérature, les FA auraient des effets négatifs sur la digestibilité des nutriments mais ceux-ci dépendraient du niveau d'incorporation et des caractéristiques physico-chimiques des FA utilisées (viscosité, encombrement, etc.; Jimenez-Moreno et al., 2011). Un apport modéré pourrait néanmoins permettre de stimuler l'activité du proventricule-gésier (PG), avec une diminution du pH et un allongement du temps de transit dans ce compartiment (Mateos et al., 2014). Ces phénomènes pourraient ainsi améliorer la solubilisation des minéraux et potentialiser l'action de la phytase microbienne (PM) en amont de l'intestin grêle, principal site d'absorption du P et du calcium (Ca).

L'objectif de notre étude est donc d'évaluer les effets des fibres natives du colza sur la digestibilité des minéraux chez le poulet de chair de 21 jours dans des régimes supplémentés ou non en PM.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Aliments expérimentaux

Un aliment prédémarrage (D1; J0-J5) et un aliment démarrage (D2; J6-J9) comprenant 2,5% et 8% de TC respectivement ont été formulés pour la phase d'adaptation. Huit régimes expérimentaux à base de maïs et de tourteau de soja ont été formulés de façon à couvrir les besoins du poulet en croissance (NRC, 2012), sauf pour le P et le Ca, sub-limitants dans les lots sans PM. Le ratio Ca : phosphore non phytique (PNP) était fixé à 2,1 dans tous les régimes. La teneur en FA et la forme du TC ont été modulées par l'ajout de TC standard, de TC dépelliculé, et de pellicules de colza issues du processus de dépelliculage (Tableaux 1 et 2). Chaque aliment était supplémenté ou non en PM (750 FTU/kg, Natuphos®, *Aspergillus niger*, BASF SE, Ludwigshafen, Allemagne). Afin de mesurer la digestibilité iléale du P et du Ca, du dioxyde de titane (TiO_2) a été ajouté dans tous les régimes expérimentaux (0,30%).

Tableau 1 - Caractéristiques analytiques des matières premières (sur matière brute)

Matières premières	TC	TC dépelliculé	Pellicules
Matière sèche, %	92,4	91,3	88,4
Protéines, %	31,7	37,8	19,4
Matières grasses, %	5,0	1,8	1,6
Cellulose brute, %	16,2	9,7	26,6
ADF, %[1]	19,6	12,7	40,7
NDF, %[1]	30,1	21,9	53,2
ADL, %[1]	8,2	4,3	21,0
Phosphore, %	0,97	1,19	0,41
Calcium, %	0,70	0,62	1,15
Glucosinolates, µmol/g	26,3	23,9	9,7

[1]*Acid Detergent Fiber, Neutral Detergent Fiber et Acid Detergent Lignin*.

1.2. Animaux et conduite expérimentale

Deux cent poussins mâles de souche Cobb 500 ont été pesés, placés en cage par deux et nourris avec D1 de J0 à J5, puis avec D2 de J6 à J9. A J10, les animaux ont été pesés. Les 144 poulets les plus proches du poids moyen total ont été placés en cage individuelle et ont reçu l'un des 8 régimes expérimentaux (18 animaux/régime). La consommation d'aliment a été mesurée de J10 à l'abattage (J21). De J14 à J17, une période de bilan digestif a été réalisée, avec récolte individuelle des fientes. Celles-ci ont été pesées et congelées à -20°C avant d'être lyophilisées. Les animaux ont été pesés à J0, J10, et J21. Les animaux ont été mis à jeun 6h avant de les réalimenter de manière synchronisée selon leur rang d'abattage. A J21, les animaux ont été mis à mort par injection de pentobarbital sodique dans le sinus occipital. Le contenu de l'iléon distal ainsi que le tibia droit ont été prélevés sur l'ensemble des animaux. Le poids vide du proventricule-gésier (PG) et des caeca a été relevé et leur contenu a été prélevé. Les échantillons ont été conservés à -20°C jusqu'aux analyses chimiques.

1.3. Analyses chimiques

L'activité phytasique a été mesurée dans les régimes par colorimétrie après incubation dans une solution de phytate de sodium (Engelen et al., 1994). La teneur en matière sèche (MS) des régimes, fientes, et des contenus de l'iléon a été déterminée après 4 h dans une étuve à 103°C. Les échantillons ont ensuite été incinérés à 550°C pendant 8 h. Les cendres ont été solubilisées dans un mélange d'acide nitrique 16N et de peroxyde d'hydrogène 30% sur un bain à sec jusqu'à évaporation, et finalement diluées dans l'acide nitrique 0,4N. Le P et le Ca ont été dosés par spectrométrie à plasma à couplage inductif (ICP OES Thermoscientific™ iCAP™ 7200; P : 213,618 nm et Ca : 317,933 nm). Les tibias ont été séchés (103°C,

Tableau 2 – Composition et caractéristiques nutritionnelles des régimes expérimentaux (% sur brut)

	Adaptation		Régimes croissance expérimentaux							
	D1	D2	AC1	AC1+	AC2	AC2+	AC3	AC3+	AC4	AC4+
Maïs	58,71	56,68	55,94	55,93	54,13	54,12	55,20	55,19	56,17	56,16
Tourteau de soja	34,50	30,80	25,20	25,20	26,80	26,80	25,10	25,10	23,40	23,40
Tourteau de colza	2,50	8,00	12,00	12,00						
Tourteau de colza dépelliculé					8,40	8,40	8,40	8,40	8,40	8,40
Pellicules de colza							3,60	3,60	7,20	7,20
Amidon			3,60	3,60	7,20	7,20	3,60	3,60		
Huile de soja	0,50	1,20	1,10	1,10	1,20	1,20	1,90	1,90	2,70	2,70
NaCl	0,32	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30
Phosphate bicalcique	2,06	1,70	0,50	0,50	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64	0,64
Bicarbonate de sodium	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07
Carbonate de calcium	0,65	0,55	0,28	0,28	0,28	0,28	0,16	0,16	0,05	0,05
DL-méthionine	0,24	0,22	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
L-lysine	0,07	0,09	0,11	0,11	0,10	0,10	0,13	0,13	0,15	0,15
Phytase				0,0075		0,0075		0,0075		0,0075
Caractéristiques nutritionnelles										
Protéines[1], %	21,5	21,5	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Energie métabolisable[1], kcal/kg	2923	2930	3001	3001	3014	3014	2994	2994	2979	2979
Matières grasses[1], %	3,2	3,8	4,1	4,1	3,8	3,8	4,5	4,5	5,3	5,3
Cellulose brute[1], %	3,5	4,0	4,5	4,5	3,5	3,5	4,4	4,4	5,2	5,2
NDF[1], %	11,1	11,9	12,9	12,9	10,8	10,8	12,8	12,8	14,8	14,8
Phytase[2], FTU/kg	<100	<100	<100	1060	<100	920	<100	810	<100	1000
Phosphore total[2], %	0,87	0,80	0,52	0,53	0,54	0,57	0,56	0,58	0,53	0,59
Phosphore non phytique[1], %	0,50	0,45	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Calcium[2], %	1,12	0,99	0,55	0,55	0,56	0,58	0,57	0,58	0,57	0,58
Calcium : PNP[1]	2,09	2,10	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12

Premix : 0,40% ; Anticoccidien : 0,02% ; TiO_2 : 0,30% ; [1]valeurs théoriques ; [2]valeurs analysées selon la section Matériel et Méthodes

12h) afin de déterminer la MS, puis minéralisés (550°C, 12h). La teneur en glucosinolates des tourteaux de colza entier et dépelliculé ainsi que des pellicules de colza a été déterminée par HPLC (ISO 9167 – 1 :1995). La teneur en cellulose brute de ces matières premières a été déterminée selon la méthode de Weende (NF-V03040) et le dosage des parois végétales (ADF, NDF et ADL) selon la méthode de van Soest et al. (1991, NF-V18122). La concentration en TiO_2 dans les régimes et les contenus digestifs a été déterminée par dosage colorimétrique (Short et al., 1996).

1.4. Calculs et analyses statistiques

La rétention a été calculée entre J14 et J17 comme la différence entre le nutriment ingéré et le nutriment excrété dans les fientes. La digestibilité iléale a été mesurée à J21, X étant le P ou le Ca :

$$\text{Dig. iléale X, \%} = 100 - 100 * (TiO_{2aliment}/TiO_{2iléon}) * (X_{iléon}/X_{aliment})$$

Les données ont été soumises à une analyse de variance avec la procédure MIXED de SAS (Inst. Inc. Cary, NC). Le poulet était considéré comme l'unité expérimentale, le régime expérimental comme effet fixe, et le bloc comme facteur aléatoire. L'effet linéaire de la PM (Lin ; moyenne des régimes sans PM vs avec PM), l'effet linéaire du dépelliculage sans et avec PM (AC1 vs AC2) et les effets Lin et quadratiques (Qua) de la teneur en pellicules, avec et sans PM (AC2 vs AC3 vs AC4), soient au total sept contrastes, ont été testés. Les différences sont considérées comme significatives lorsque la $P < 0,05$ et une valeur de $P \leq 0,10$ est interprétée comme une tendance statistique.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

Les teneurs en P et Ca des aliments étaient en adéquation avec les valeurs attendues (0,54% en moyenne pour le P et 0,53% en moyenne pour le Ca). L'activité de la phytase était supérieure aux 750 FTU/kg attendus mais cohérente entre régimes supplémentés, soit 1060, 920, 810 et 1000 respectivement pour AC1+, AC2+, AC3+ et AC4+. L'ajout de pellicules de colza riches en FA a entrainé une diminution du GMQ entre J10 et J21 (Lin, P = 0,072 sans PM et P = 0,025 avec PM) et du PV à J21 (Tableau 3 ; Lin, P = 0,028 avec PM) sans que l'ingéré ne soit significativement modifié. La moindre teneur en énergie des régimes les plus concentrés en fibres n'a donc pas été compensée par une augmentation de l'ingestion, l'encombrement digestif ayant probablement été le facteur limitant. On peut toutefois noter une dégradation numérique de l'IC à mesure que le niveau de fibres augmente dans le régime, avec une diminution de la digestibilité de la MS (Lin, $P < 0,001$ sans et avec PM). L'incorporation de tourteau issu de graines dépelliculées a permis une augmentation de la digestibilité de la MS par rapport

au régime tourteau graines entières ($P < 0,05$). Les conséquences d'un régime riche en FA sur la digestibilité des nutriments chez le poulet de chair sont controversées. Il a été montré à de nombreuses reprises qu'un niveau modéré de fibres, sous la forme de coques d'avoine ou de pulpes de betterave par exemple, avait des effets positifs sur les performances de croissance, la digestibilité des nutriments et le bien-être animal (Jimenez-Moreno et al., 2009 ; Mateos et al., 2014). En revanche, un niveau élevé de FA dégrade l'IC et diminue la digestibilité des nutriments (Kalmendal et al., 2011). Il semble donc exister un seuil au-delà duquel les FA ont des effets négatifs sur les performances de croissance et la digestibilité des nutriments (Jiménez-Moreno et al., 2013), la nature des fibres modulant également ces réponses.

L'incorporation de pellicules de colza, majoritairement insolubles, ou de tourteau de colza issu de graines entières a stimulé le développement du PG (+2.7 en moyenne ; Lin, $P < 0,01$; Tableau 3) par rapport aux régimes incluant du tourteau issu de graines dépelliculées. La taille des particules doit être réduite pour faciliter leur passage dans le duodénum, et les FA insolubles sont particulièrement difficiles à broyer (Hetland et al., 2002). Les particules les plus larges sont donc conservées plus longtemps dans ce compartiment, augmentant la sécrétion d'enzymes et d'HCl, diminuant le pH (Lin, $P = 0,081$ sans PM). Ces conditions physico-chimiques et de transit sont particulièrement favorables à la solubilisation des minéraux (Guinotte et al., 1995). Par ailleurs, le PG est le lieu d'action de la PM qui permet l'hydrolyse des phytates avec deux pH optimaux à 2,5 et 5,5 (Kies et al., 2001). La combinaison de pellicules de colza et de PM a ainsi permis d'augmenter la digestibilité iléale du P (+8,5 points ; Lin, $P < 0,001$; Tableau 4) et du Ca (+6,8 points ; Lin, $P = 0,008$). En revanche, en l'absence de PM, la digestibilité iléale du P (-0,4 points ; Qua, $P = 0,014$) et du Ca (-10,5 points ; Lin, $P < 0,001$) a été diminuée. Ces résultats suggèrent donc un effet bénéfique et cumulatif des FA et de la PM et sont en adéquation avec ceux de Shang et al. (2015), qui ont montré une meilleure utilisation du P dans des régimes supplémentés en fructooligosaccharides et en PM par rapport à un régime contrôle.

L'ajout de PM a par ailleurs permis une meilleure rétention du P et du Ca (+5,2 et + 4,2 points, respectivement ; $P < 0,001$) confirmant de nombreuses études (Sebastian et al., 1996; Tamim et al., 2004). Le dépelliculage de la graine de colza a eu un effet positif sur l'absorption de P (+ 3,8 points en moyenne; $P = 0,051$ sans PM et $P = 0,003$ avec PM) et de Ca (+2,5 en moyenne ; $P = 0,011$ avec PM), probablement grâce à une meilleure accessibilité des nutriments. La pellicule de colza est en effet très riche en fibres insolubles, qui représentent une matrice complexe et difficile d'accès aux enzymes et processus de digestion. La technique de dépelliculage permet donc de concentrer dans le tourteau les nutriments facilement accessibles. A l'inverse de la digestibilité iléale, la rétention du P (-5,1 en moyenne ; Lin, $P = 0,004$ et Qua, $P = 0,074$ sans PM et Lin, $P < 0,001$ avec PM) et du Ca (-4,3 en moyenne, Qua, $P = 0,050$ sans PM et Lin, $P < 0,001$ avec PM) a été diminuée avec l'ajout de pellicules de colza. La rétention du P est d'ailleurs plus faible que la digestibilité iléale dans les régimes AC3+ et AC4+. Bien que la digestibilité iléale et la rétention n'aient pas été mesurées au même moment et avec la même méthode (i.e. collecte totale sur trois jours *vs* marqueur indigestible à un temps donné), ces résultats suggèrent qu'un autre facteur a limité le dépôt des minéraux au niveau métabolique. Pourtant, classiquement, il est admis que la croissance des tissus mous est indépendante de celle du tissu osseux. De plus, l'augmentation de l'absorption du P au niveau iléal a probablement été trop importante par rapport à l'absorption du Ca et celui-ci est donc devenu limitant pour le dépôt minéral. Ceci est confirmé d'une part par la diminution du Ca retenu et de sa rétention (-11% ; Lin, $P = 0,010$ et -6,9 points; Lin, $P < 0,001$, respectivement) et d'autre part par la diminution de la teneur en cendres chez les animaux nourris avec des aliments riches en fibres et supplémentés en PM (-1,6 points ; Lin, $P = 0,006$).

En parallèle, l'ajout de pellicules dans les régimes supplémentés en PM a entrainé un poids relatif des caeca plus important (+0,5 points ; Lin, $P = 0,061$) et une baisse du pH (-0,3 points; Lin, $P = 0,088$). Les FA ont probablement favorisé les fermentations et la croissance de la flore microbienne, entrainant une légère hypertrophie et une acidification du milieu. Ceci implique un besoin supplémentaire de nutriments pour la croissance des populations bactériennes pouvant moduler l'excrétion fécale des acides aminés, des lipides et des minéraux (Metzler et al., 2008).

CONCLUSION

La combinaison de l'ajout de pellicules de colza et de PM a eu des conséquences positives sur la taille du tube digestif, le pH du PG et la digestibilité iléale du P et du Ca. Néanmoins, cette amélioration a pu entrainer un déséquilibre métabolique, conduisant à une moindre rétention et à une baisse de la teneur en cendres des tibias : les résultats suggèrent un manque de Ca au niveau osseux. Il semble donc que les apports de Ca et de PM doivent être adaptés selon le niveau et le type de fibres présentes dans la ration.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Carré P., Quinsac A., Citeau M. et Fine F., 2015. OCL, 22 (3), D304.
- Engelen A.J., van der Heeft F.C., Randsdorp P.H. et Smit E.L., 1994. J. AOAC Int. 77:760–764.

- Guinotte F., Gautron J. et Nys Y., 1995. Br. J. Nut. (73), 125-139.
- Hetland H., Svihus B. et Olaisen V., 2002. Br. Poult. Sci. (43), 416-423.
- Sauvant D., Pérez J.M., Tran G. 2002, In : INRA-AFZ Coord., INRA Eds, Paris, pp. 291.
- Jimenez-Moreno E., Chamorro S., Frikha M., Safaa H.M., Lazaro R. et Mateos G.G., 2011. Anim. Feed Sci. Technol. (168) 100-112.
- Jiménez-Moreno E, González-Alvarado J.M., de Coca-Sinova A., Lázaro R. et Mateos G.G. 2009. Anim. Feed Sci. Technol. (154) 93-101.
- Kalmendal R., Elwinger K., Holm L. et Tauson R., 2011. Br. Poult. Sci. (52), 86-96.
- Kies A.K., Van Hemerd K.H.F. et Sauer W.C., 2001. World Poultry Sci. J. (57), 109-126.
- Mateos G.G., Jimenez-Moreno E., Guzman P., Saldana B. et Lazaro R., 2014. In: 5th international broiler nutritionists conference, pp. 207-216.
- Metzler B.U. et Monsenthin R., 2008. Asian-Aust. J. Anim. Sci. (21), 603-615.
- Rousseau X., 2013. Thèse de doctorat. Université de Tours, France, 150 p.
- Sebastian S., Touchburn S.P., Chavez E.R. et Lague P.C., 1996. Poult. Sci. (75), 729-736.
- Shang Y., Rogiewicz A., Patterson R., Slominski B.A. et Kim K.W., 2015. Poult. Sci. (94), 955-964.
- Short FJ, Gorton P, Wiseman J et Boorman K.N 1996. Anim. Feed Sci.Technol. 59, 215-221.
- Tamim N.M., Angel R. et Christman M., 2004. Poult. Sci. (83), 1358-1367.
- Van Soest P.J., Robertson J. et Lewis B.A., 1991. J. Dairy. Sci., 74, 3583-3597.

Tableau 3. Performances de croissance des animaux entre J10 et J21, teneur en cendres des tibias, poids et pH des contenus digestifs après abattage des animaux nourris avec les régimes expérimentaux

	AC1	AC1+	AC2	AC2+	AC3	AC3+	AC4	AC4+		*P*-value						
										Effet PM	1 vs 3	2 vs 4	3 vs 5 vs 7		4 vs 6 vs 8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	SEM	Lin	Lin	Lin	Lin	Qua	Lin	Qua
PV J10	288	288	286	292	291	285	288	284	2	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*
PV J21	862	860	871	891	849	858	845	843	5	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*0,028*	*ns*
GMQ, g/j	53,9	53,8	55,0	56,1	52,2	53,8	52,3	52,6	0,4	*ns*	*ns*	*ns*	*0,072*	*ns*	*0,025*	*ns*
Ingéré, g/j	81,4	82,6	82,8	83,9	80,1	83,2	79,8	81,0	0,6	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*
IC	1,52	1,53	1,51	1,50	1,54	1,53	1,53	1,52	0,01	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*
Cendres, %MS	36,5	37,8	36,3	37,6	36,1	36,7	35,7	36,0	0,1	*0,001*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*0,006*	*ns*
Proventricule-gésier																
Poids vide, g/kg PV	26,0	26,7	23,3	24,6	25,2	26,6	25,9	27,3	0,3	*0,011*	*0,007*	*0,032*	*0,006*	*ns*	*0,005*	*ns*
pH	2,26	2,46	2,79	2,55	2,55	2,48	2,49	2,44	0,05	*ns*	*0,003*	*ns*	*0,081*	*ns*	*ns*	*ns*
Caeca																
Poids vide, g/kg PV	5,4	4,5	4,8	5,0	4,7	4,9	4,9	5,5	0,1	*ns*	*0,037*	*0,068*	*ns*	*ns*	*0,061*	*ns*
pH	6,14	6,24	5,99	6,33	6,27	6,27	6,08	6,03	0,04	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*ns*	*0,088*	*ns*

PV : poids vif ; GMQ : gain moyen quotidien ; IC : indice de consommation.

Tableau 4. Digestibilité iléale J21 du phosphore et du calcium, absorption et rétention entre J14 et J17 du phosphore, calcium et digestibilité de la matière sèche

	AC1	AC1+	AC2	AC2+	AC3	AC3+	AC4	AC4+		*P*-value						
										Effet PM	1 vs 3	2 vs 4	3 vs 5 vs 7		4 vs 6 vs 8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	SEM	Lin	Lin	Lin	Lin	Qua	Lin	Qua
Iléon distal, J21																
Dig. iléale de P, %	42,4	51,2	45,4	53,1	50,0	56,2	45,0	61,6	0,8	*<0,001*	*ns*	*ns*	*ns*	*0,014*	*<0,001*	*ns*
Dig. iléale de Ca, %	38,2	41,0	45,3	38,4	41,1	40,8	34,8	45,2	0,7	*ns*	*0,005*	*ns*	*<0,001*	*ns*	*0,008*	*ns*
Bilan digestif, J14-J17																
P retenu mg/j	207	246	228	275	238	255	208	256	3	*<0,001*	*0,063*	*0,011*	*0,077*	*0,036*	*0,090*	*ns*
Rétention de P, %	48,8	54,3	51,7	58,9	51,9	54,2	47,3	53,1	0,5	*<0,001*	*0,051*	*0,003*	*0,004*	*0,074*	*<0,001*	*ns*
Ca retenu, mg/j	229	257	237	281	251	258	233	250	3	*<0,001*	*ns*	*0,052*	*ns*	*ns*	*0,010*	*ns*
Rétention de Ca, %	50,9	54,7	51,2	59,4	53,3	54,8	49,5	52,5	0,5	*<0,001*	*ns*	*0,011*	*ns*	*0,050*	*<0,001*	*ns*
Digestibilité MS, %	68,5	68,7	70,2	70,6	68,6	68,0	66,2	66,6	0,2	*ns*	*0,002*	*<0,001*	*<0,001*	*ns*	*<0,001*	*ns*

Dig.: digestibilité; P: phosphore ; Ca: calcium ; MS: matière sèche