

Effet d'un complexe enzymatique phytase et carbohydrases sur les performances de croissance et la minéralisation osseuse de porcs en croissance et finition

Pierre COZANNET (1), Roland MAILLARD (1), Peadar LAWLOR (2)

(1) Adisseo, rue Marcel Lingot, CERN, 03600 Commeny, France

(2) Teagasc, Moorepark Food Research Centre, Fermoy, County Cork, Ireland

Pierre.Cozannet@adisseo.com

Effet d'un complexe enzymatique phytase et carbohydrases sur les performances de croissance et la minéralisation osseuse de porcs en croissance et finition

L'effet d'un complexe phytase et carbohydrases (Rovabio® Max, Adisseo, France) est évalué sur les performances et la minéralisation osseuse de porcs (n = 192 paires) nourris avec un régime maïs/soja. Les porcs sont sélectionnés à 28 jours, logés par paire et nourris avec un régime commun pour une période de 14 jours. Sept groupes (55 porcs/groupe) sont constitués selon un dispositif expérimental factoriel. Un régime témoin positif (TP) est comparé à six régimes « témoin négatif » (TN) contenant ou pas d'enzyme. Les régimes sont : 1. témoin positif (TP) formulé pour satisfaire les besoins en nutriments, 2. témoin négatif (TN) 1 (reformulé en énergie nette (EN) et matière azotée totale (MAT) à 0,985×TP, -1,0 g calcium (Ca) /kg et -1,2 g de Phosphore digestible (Pdig) /kg), 3. TN2 (EN et MAT : 0,975×TP, -1,0 g Ca /kg et -1,2 g Pdig /kg) et 4. TN3 (EN et MAT : 0,975×TP, -1,5 g Ca /kg et -1,7 g Pdig /kg). La consommation et le poids des animaux sont enregistrés à la fin de chaque période. La réduction de la teneur en nutriments dans les régimes TN conduit à une réduction du gain moyen quotidien et de l'ingéré volontaire ($P < 0,001$) sur la durée totale (130 j) de l'essai. L'introduction d'enzymes permet une amélioration ($P < 0,05$) du poids vif final, de l'ingestion journalière, du gain de poids journalier et de l'efficacité alimentaire. La densité minérale osseuse est significativement augmentée par l'inclusion d'enzyme à l'abattage ($P < 0,001$) et restaurée à un niveau équivalent au TP. La teneur des os en P et Ca n'est pas affectée par l'enzyme ($P > 0,05$).

The effect of a combination phytase and carbohydrase enzyme supplement on growth performance and bone mineralization of growing finishing pigs

Effect of a combination of carbohydrase and phytase enzymes (Rovabio® Max, Adisseo, France) was evaluated on growth performance and bone mineralization in pigs (n= 192 pairs) fed maize-soybean meal diets. Pigs were selected at 28 days of age, penned in pairs, fed a common acclimatization diet meeting animal requirements for 14 days. Seven groups (55 pigs/group) were constituted according to factorial experimental design. A positive control (PC) is compared to 6 negative control diets with or without enzyme. Diets were: 1. Positive control (PC), formulated to meet the nutrient requirements; 2. Negative control 1 (NC1; reformulated for net energy (NE) and crude protein (CP) at 0.985×PC, -1.0 g calcium (ca) /kg and -1.2 g digestible phosphorus (digP) /kg), 3. Negative control 2 (NC2; NE and CP 0.975×PC, -1.0 g Ca /kg and -1.2 g dig P /kg), and 4. Negative control 3 (NC3; NE and CP 0.975×PC, -1.5 g Ca /kg and -1.7 g dig P /kg). Feed consumption, wastage and individual pig weights were recorded at the beginning and end of each growth phase. Reductions in nutrients significantly ($P < 0.05$) reduced live weight, average daily feed intake, average daily gain throughout the trial. Addition of enzyme to NC diet treatments significantly ($P < 0.05$) improved live weight, average daily feed intake, average daily gain and feed conversion ratio. Area bone mineral density (aBMD) of metacarpal aBMD ($P < 0.001$) increased to a level equivalent to PC when enzyme was added. No effect ($P > 0.05$) was found on metacarpal Ca or phosphorus percentages.

INTRODUCTION

Les régimes à base de blé et de maïs sont courants en alimentation porcine (Sauber et Owens, 2001). Cependant, la présence dans ces matières premières de facteurs anti-nutritionnels (fibres et phytate) rend leur utilisation non optimale dans la mesure où l'animal ne possède pas l'équipement enzymatique optimal pour dégrader ces composants notamment les phytates (Shaw et al., 2006). Il en résulte l'emploi de phosphore minéral et de matières premières riches en énergie en guise de compensation, ce qui entraîne des surcoûts et des pollutions phosphorique et azotée. Ces observations encouragent le développement d'enzymes dédiées à la dégradation de ces facteurs : phytase pour le phytate et carbohydrases pour les fibres (Woyengo et al., 2008).

L'objectif de l'essai est de tester l'effet de l'inclusion de ces deux types d'enzymes dans des aliments pour porcs en croissance finition présentant différents niveaux d'énergie nette, d'acides aminés digestibles et de minéraux (calcium et phosphore digestible). Les effets des enzymes ont été estimés *via* la mesure des performances de croissance et des critères de minéralisation osseuse.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Dispositif expérimental

La composition des régimes pour les quatre phases alimentaires est présentée dans le tableau 1. Les traitements ont consisté en : 1/ témoin positif (TP) formulé pour satisfaire les besoins des animaux, 2/ trois témoins négatifs (TN) à teneur réduite en énergie nette (EN), protéines brutes (PB), acides aminés digestibles (AAdig), phosphore digestible (Pdig) et calcium (Ca). Les teneurs en EN, PB et AAdig du TN1 ont été fixées à 98,5% des teneurs du régime TP. Les teneurs de ces trois éléments ont été portées à 97,5% pour TN2 et TN3. Parallèlement, ces régimes ont été formulés avec des niveaux réduits de Pdig et Ca. Les réductions de Pdig et Ca sont, respectivement, de 1,0 et 1,2 g/kg pour TN1 et TN2 et de 1,5 et 1,7 g/kg pour TN3. Les TN ont été supplémentés avec un mélange d'enzymes contenant des activités xylanase, glucanase et phytase (Rovabio Max ; Adisseo France SAS, Antony, France), et notés TN+. A sa dose commerciale de 200 ml/tonne, les niveaux d'activité sont de 1100 unités xylanase viscométrique, 100 unités glucanase azo et 500 unités phytasiques. Une unité viscométrique d'activité endo-1,4- β -xylanase est définie comme la quantité d'enzyme nécessaire pour réduire la viscosité du mélange d'une unité par minute et par millilitre (ou par gramme) dans les conditions du test (pH = 5,5 à 30°C). Une unité glucanase azo d'activité endo-1,3(4)- β -glucanase est définie comme la quantité d'enzyme permettant la libération d'oligomères solubles dans l'éthanol et donnant une absorbance de 0,820 unités à la longueur d'onde de 590 nm dans les conditions de l'essai (20 min à pH = 4,6 et 30°C). Une unité phytase est définie comme la quantité d'enzyme permettant de libérer une micromole orthophosphate minéral par minute à pH de 5,5 à 37°C.

Les essais ont été réalisés sur 384 porcs mâles castrés et femelles [Hylean Maxgrow x (Large White x Landrace)] dont le poids moyen est de 8,3 \pm 1,2 kg au sevrage à 28 jours d'âge. Après une période pré-expérimentale de 14 jours, les porcs

sont groupés par paires de poids équivalents et de sexe homogène, et repartis sur la base de leur poids vif et de leur sexe entre les sept traitements expérimentaux. Les animaux sont nourris *ad libitum* à l'aide de granulés.

Le poids individuel et la consommation par case ont été enregistrés à chaque changement de phase alimentaire, soit 14, 35, 77, 112 jours après le sevrage et à l'abattage (115 kg). La consommation moyenne journalière (CMJ) et le gain de poids quotidien (GMQ) ont également été mesurés sur ces différentes phases. A la fin de chaque phase, huit porcs issus de quatre loges ayant un poids voisin de la moyenne du groupe sont sacrifiés pour l'évaluation de la minéralisation osseuse. Un fémur par porc est prélevé et conservé à -20°C pour la détermination de la teneur et de la composition en minéraux. Le métacarpe est disséqué pour en mesurer sa densité.

1.2. Analyses de laboratoire

La teneur en cendres des fémurs est déterminée par passages à l'étuve (105°C ; 12 heures) puis au four à moufle (605°C ; 6 heures). Les cendres obtenues ont été dissoutes dans 10 ml d'acide chlorhydrique et diluées dans 500 ml d'eau. Les échantillons sont ensuite analysés pour leur teneur en Ca et phosphore en utilisant une torche à plasma. La densité des os est mesurée en évaluant l'absorption de rayons X issus d'un appareil Hologic QDR 4500 (Hologic, Bedford MA 01730 USA).

Tableau 1 - Composition des régimes témoins positifs

Période, jours	0-14	15-35	36-77	78-abb
Ingrédients, g/kg				
Blé	-	15,00	15,00	18,06
Maïs	55,32	47,75	45,66	50,13
Tourteau de soja	26,80	23,46	10,89	7,77
Son de blé	-	6,54	15,00	16,47
Mélasses	-	4,00	4,00	5,01
Graine de soja extrudée	10,00	-	6,68	-
Huile végétale	1,46	-	-	-
L-Lysine HCl	0,37	0,55	0,53	0,53
DL-Méthionine	0,16	0,17	0,14	0,10 ?
L-Thréonine	0,15	0,22	0,20	0,19
L-Tryptophane	0,05	0,07	0,06	0,06
Phosphate bicalcique	1,80	0,95	0,49	0,24
Carbonate de calcium	1,29	0,69	0,75	0,84
Sépiolite	2,00	-	-	-
Sel	0,30	0,30	0,30	0,30
Complément oligo-vitamines	0,30	0,30	0,30	0,30
Caractéristiques nutritionnelles¹				
Matière sèche, %	89,50	88,50	86,80	86,10
Matières azotées totales, %	21,30	18,50	15,40	13,10
Calcium, %	0,96	0,6	0,59	0,59
Phosphore, %	0,75	0,48	0,43	0,38
Lysine DIS, %	1,26	1,18	1,00	0,82
Phosphore digestible, %	0,38	0,28	0,24	0,20
Energie nette, MJ/kg	9,72	9,32	9,31	9,28

¹ Données obtenues à partir des tables INRA AFZ (Sauvant et al., 2004).

1.3. Analyses statistiques et corrélation

Les données ont été analysées à l'aide de la procédure GLM de SAS (version 9.3, SAS Inst. Inc, Cary, North Carolina). La loge (n = 192) est considérée comme l'unité expérimentale pour les performances. Le modèle utilisé inclut l'effet du bloc (n = 7), du sexe (n = 2) et du traitement (n = 7). Le poids des animaux à la fin de la période pré-expérimentale (Jour 14) a été considéré comme covariable. Les mesures de l'effet du traitement sur la minéralisation osseuse ont été testées sur les données individuelles (n = 56 par phase) et analysées selon le même modèle que les performances.

Le poids des animaux au moment du prélèvement a été utilisé comme covariable dans le modèle. Les données présentées dans les tableaux sont les moyennes ajustées pour chaque traitement. La séparation des moyennes a été réalisée par la méthode de comparaison multiple de Duncan avec un seuil de signification de 0,05. Des contrastes orthogonaux ont été appliqués afin d'évaluer l'effet de la reformulation (TP vs TN1-, TN2- et TN3-) ou de l'incorporation d'enzyme (TN1-, TN2- et TN3- vs TN1+, TN2+ et TN3+). Les corrélations entre les performances des animaux, les teneurs en minéraux des os et les teneurs en nutriments des régimes ont été estimés par la procédure CORR de SAS.

Tableau 2 – Performances zootechniques durant la période de l'essai (moyennes ajustées)

Formule Enzyme ²	TP		TN1		TN2		TN3		Statistique ¹	
	-	-	-	+	-	+	-	+	ER	P-value
Poids vif, kg										
Jour 14	12,5	12,5	12,3		12,4	12,6	12,3	12,3	1,0	0,959
Jour 35	24,8 ^{ab}	23,1 ^c	24,8 ^a		23,6 ^{bc}	25,2 ^a	22,0 ^d	24,1 ^{abc}	1,0	<0,001
Jour 77	60,0 ^a	52,4 ^c	57,4 ^{ab}		51,6 ^c	59,4 ^a	44,1 ^d	55,1 ^{bc}	2,0	<0,001
Jour 112	95,3 ^a	73,3 ^d	84,9 ^{bc}		70,0 ^d	89,8 ^{ab}	62,5 ^e	81,7 ^c	6,0	<0,001
Abattage (jour 130)	124,5 ^a	91,8 ^c	108,4 ^b		83,7 ^c	116,1 ^b	74,6 ^d	114,7 ^b	8,0	<0,001
Période 14 – 35 j (n = 192)										
Consommation, kg/j	0,934	0,950	1,038		0,948	0,991	0,925	0,993	0,053	<0,001
Gain de poids, kg/j	0,574 ^{ab}	0,494 ^{cd}	0,572 ^{ab}		0,516 ^{bc}	0,587 ^a	0,445 ^d	0,539 ^{abc}	0,108	<0,001
Indice de consommation	1,72 ^a	2,07 ^{ab}	1,90 ^{ab}		1,85 ^{ab}	1,71 ^a	2,21 ^b	1,88 ^{ab}	0,66	0,070
Période 35 – 77 j (n = 164)										
Consommation, kg/j	1,839 ^{ab}	1,647 ^{bc}	1,826 ^{ab}		1,684 ^c	1,885 ^a	1,624 ^c	1,786 ^a	0,259	<0,001
Gain de poids, kg/j	0,847 ^a	0,678 ^{dc}	0,780 ^{ab}		0,661 ^d	0,828 ^a	0,523 ^e	0,743 ^{bc}	0,110	<0,001
Indice de consommation	2,21 ^a	2,51 ^{ab}	2,38 ^{ab}		2,62 ^b	2,27 ^{ab}	3,26 ^c	2,43 ^{ab}	0,48	<0,001
Période 77 – 112 j (n = 136)										
Consommation, kg/j	2,486 ^a	1,854 ^{bc}	2,199 ^{ab}		1,878 ^{bc}	2,213 ^{ab}	1,698 ^c	2,472 ^a	0,478	<0,001
Gain de poids, kg/j	0,975 ^a	0,587 ^d	0,818 ^b		0,516 ^d	0,842 ^b	0,438 ^e	0,718 ^c	0,138	<0,001
Indice de consommation	2,57 ^a	3,44 ^{bc}	2,75 ^{ab}		3,91 ^c	2,65 ^{ab}	4,10 ^c	3,61 ^c	0,99	<0,001
Période 112 – 130 j (n = 136)										
Consommation, kg/j	3,065 ^{ab}	2,018 ^c	2,641 ^b		1,802 ^{dc}	3,060 ^{ab}	1,612 ^d	3,184 ^a	0,398	<0,001
Gain de poids, kg/j	0,866 ^a	0,514 ^b	0,776 ^a		0,465 ^{cb}	0,799 ^a	0,369 ^c	0,897 ^a	0,137	<0,001
Indice de consommation	3,57	3,95	3,57		4,06	3,88	4,79	3,56	0,93	0,160
Période 14 – 130 j										
Consommation, kg/j	1,868 ^a	1,721 ^{bc}	1,771 ^{abc}		1,679 ^c	1,842 ^{ab}	1,640 ^c	1,894 ^a	0,220	<0,001
Gain de poids, kg/j	0,705 ^a	0,622 ^{bc}	0,654 ^{ab}		0,595 ^c	0,676 ^{ab}	0,578 ^c	0,667 ^{ab}	0,068	<0,001
Indice de consommation	2,69 ^a	2,81 ^{ab}	2,75 ^{ab}		2,87 ^{ab}	2,76 ^{ab}	2,92 ^{ab}	2,87 ^b	0,32	0,003

¹ Les données sont soumises à une analyse de variance avec en effets fixes le traitement (n = 7), le sexe (n = 2), le bloc (n = 14) et les interactions. Le poids des animaux en fin de période pré expérimentale (Jour 14) a été utilisé comme covariable. ER = écart type résiduelle. Les moyennes présentant des lettres différentes diffèrent significativement (P < 0,05). ² Enzyme incorporée (+) ou non (-).

Tableau 3 – Résultats des contrastes orthogonaux réalisés pour comparer les performances zootechniques durant la durée totale de l'essai selon le type d'aliment

Contrastes ¹	TP	TN-	P-value ²	TN-	TN+	P-value ²	TP	TN+	P-value ²
Poids vif, kg									
Jour 14	12,5	12,5	0,808	12,5	12,4	0,850	12,5	12,4	0,911
Abattage (jour 130)	124,5	83,4	<0,001	83,4	113,1	<0,001	124,5	113,1	<0,001
Consommation, kg/j	1,868	1,680	<0,001	1,680	1,836	<0,001	1,868	1,836	0,180
Gain de poids, kg/j	0,705	0,598	<0,001	0,598	0,666	<0,001	0,705	0,666	<0,001
Indice de consommation	2,69	2,87	0,001	2,87	2,79	0,026	2,69	2,79	0,082

¹ Des contrastes orthogonaux ont été utilisés pour évaluer l'effet reformulation (régimes TP vs. TN), enzyme (TN vs TN+) et restauration (TP vs TN+).

² Voir Tableau 2 pour le modèle statistique complet.

2. RESULTATS

2.1. Analyse des régimes

La composition des régimes est présentée dans le Tableau 1. Les valeurs mesurées sont en accord avec les valeurs prédites à partir des tables INRA-AFZ (Sauvant *et al.*, 2004). Le rapport entre l'activité enzymatique mesurée dans les régimes et l'activité attendue est de 1,33 (de 1,13 à 1,58) et de 0,95 (de 0,70 à 1,13), respectivement pour la xylanase et la phytase. Ces valeurs sont acceptables relativement à l'imprécision analytique et aux erreurs inhérentes à l'application de ces produits.

2.2. Performances des animaux

L'effet des différents traitements sur les performances est rapporté dans le tableau 2. Tous les animaux demeurent en bonne santé tout au long de l'essai. Par rapport au TP, l'effet des déplétions énergétique, azotée et minérale est non linéaire entre les phases alimentaires. Ainsi, l'effet est négligeable pour les stades physiologiques précoces ($P = 0,75$ entre 14 et 35 jours) et devient de plus en plus important à mesure que l'animal vieillit ($P < 0,001$). Comme attendu, les différences les plus importantes sont observées entre les traitements TP et TN3- ($P < 0,001$) pour la période totale

tandis que des performances intermédiaires ont été constatées pour TN1 et TN2 ($P > 0,05$). Les résultats suggèrent un effet plus important de la reformulation minérale comparée à la reformulation énergétique et azotée. Les coefficients de corrélation entre performances globales et teneurs en Pdig estimées à partir des témoins positifs et négatifs sont supérieurs ou égaux à 0,92.

L'absence d'interaction significative entre enzyme et traitement suggère un effet équivalent quelle que soit la stratégie de reformulation (Tableau 3). L'ingestion semble être le facteur principal conduisant à la réduction des performances des animaux dans le cas des régimes TN-. L'inclusion du complexe carbohydrases et phytase permet de restaurer l'ingestion volontaire des animaux à des niveaux équivalents à celui obtenu avec le lot TP et significativement supérieurs aux lots TN-. Le gain de poids des animaux est également positivement influencé par l'ajout d'enzyme ($P < 0,001$), sans pour autant rattraper le GMQ des animaux TP. Les poids à 112 jours et à l'abattage des animaux demeurent cependant inférieurs au TP pour les régimes TN supplémentés ($P < 0,05$). Malgré tout, la supplémentation enzymatique améliore significativement l'efficacité alimentaire par rapport au TN- ($P < 0,001$) qui tend à restaurer l'efficacité à des niveaux semblables au TP ($P = 0,082$).

Tableau 4 – Minéralisation osseuse (moyennes ajustées ; n=56 observations par stade)

Formule Enzyme ²	TP		TN1		TN2		TN3		Statistique ¹	
	-	-	+	-	+	-	+	ER	P-value	
Métacarpe matière sèche, g MS/kg										
Jour 35	717	665	729	740	709	704	710	17	0,390	
Jour 77	706 ^a	658 ^b	700 ^a	679 ^{ab}	702 ^a	614 ^c	679 ^{ab}	11	<0,001	
Jour 112	708	688	703	675	707	662	687	11	0,660	
Abattage (Jour 130)	758 ^a	676 ^b	758 ^a	668 ^b	770 ^a	656 ^b	770 ^a	10	<0,001	
Teneur en calcium des cendres, g/kg										
Jour 35	469	495	482	460	478	521	476	12	0,090	
Jour 77	405	438	412	440	424	478	411	10	0,070	
Jour 112	401	401	385	405	384	436	415	23	0,960	
Abattage (Jour 130)	322	393	397	371	367	427	371	17	0,420	
Teneur en phosphore des cendres, g/kg										
Jour 35	204 ^{ab}	199 ^{ab}	215 ^a	190 ^b	204 ^{ab}	204 ^{ab}	190 ^b	7	<0,05	
Jour 77	202	205	191	202	213	234	213	14	0,820	
Jour 112	204	178	175	186	194	192	205	13	0,780	
Abattage (Jour 130)	178	181	196	179	175	187	183	10	0,810	
Densité du métacarpe III³, g/cm²										
Jour 35	0,255	0,24	0,259	0,249	0,244	0,227	0,235	0,006	0,060	
Jour 77	0,303	0,231	0,287	0,292	0,259	0,302	0,284	0,023	0,380	
Jour 112	0,422 ^a	0,280 ^c	0,391 ^{ab}	0,309 ^c	0,413 ^a	0,268 ^c	0,357 ^b	0,014	<0,01	
Abattage (Jour 130)	0,471 ^a	0,345 ^{bc}	0,455 ^a	0,375 ^b	0,466 ^a	0,304 ^c	0,436 ^a	0,018	<0,01	

¹ Les données sont soumises à une analyse de variance avec en effets fixes le traitement ($n = 7$), le sexe ($n = 2$), le bloc ($n = 14$) et les interactions. Le poids au moment de l'abattage a été utilisé comme covariable. ER = erreur résiduelle. Les moyennes présentant des lettres différentes diffèrent significativement ($P < 0,05$).

² Enzyme incorporée (+) ou non (-).

³ Densité est mesurée en évaluant l'absorption de rayons X issus d'un appareil Hologic QDR 4500.

Tableau 5 – Effets principaux minéralisation osseuse le jour de l'abattage jour 130
(moyennes ajustées ; n=56 observations par stade)

Contrastes ¹	TP	TN-	P-value ²	TN-	TN+	P-value ²	TP	TN+	P-value ²
Métacarpe matière sèche, g MS /kg	758	667	0,002	667	766	<0,001	758	766	0,753
Teneur en Ca des cendres, g/kg	322	397	0,913	397	378	0,210	322	378	0,266
Teneur en P des cendres, g/kg	178	182	0,265	182	185	0,074	178	185	0,898
Métacarpe III densité, g/cm ²	0,471	0,341	<0,001	0,341	0,452	<0,001	0,471	0,452	0,263

¹ Des contrastes orthogonaux ont été utilisés pour évaluer l'effet reformulation (régimes TP vs TN-), enzyme (TN- vs TN+) et restauration (TP vs TN+).

² Les données sont soumises à analyse de variance avec en effets fixes le traitement (n = 7), le sexe (n = 2), le bloc (n = 14) et les interactions.

2.3. Minéralisation osseuse

Les critères de minéralisation osseuse sont présentés dans le tableau 4. En relation avec les données de croissance, aucun effet significatif de la reformulation énergétique, azotée et minérale n'est visible avant 77 jours d'essai. Les premiers critères affectés sont la teneur en matière sèche du métacarpe et la teneur en Ca des cendres. A l'inverse, les critères comme la densité du métacarpe sont affectés plus tardivement (Jour 112) ou non affectés comme la teneur en phosphore des cendres. La teneur en Ca et la densité du métacarpe décroissent avec les réductions du niveau de phosphore digestible et calcium apportés par les régimes (R > 0,91 ; P < 0,05).

L'addition d'enzymes restaure l'ensemble des critères à des niveaux équivalents au TP comme le suggère l'absence de significativité du contraste réalisé pour tester l'effet de la reformulation, quel que soit le critère. La réduction minérale maximale appliquée pour TN3 est suffisante pour constater des carences importantes. L'inclusion d'enzymes a permis de revenir à des niveaux identiques à ceux observés chez les animaux nourris au besoin. Cependant, Il est dommage qu'un régime avec un niveau de carence supérieur n'ait pas été testé pour évaluer le potentiel complet des enzymes étudiées.

3. DISCUSSION

L'effet majeur d'une carence en phosphore sur l'ingestion est également rapporté par différentes autres sources. (Harper *et al.*, 1997 ; Braña *et al.*, 2006). Dans notre essai, la teneur des régimes en EN est corrélée positivement à l'ingestion des animaux dans notre essai. Cette observation est contraire à celles de Quiniou et Noblet (2012) effectuée au dessus de 50 kg de poids vif. Nos observations tendent à faire penser que le facteur le plus influant sur l'ingestion dans cet essai est la teneur en Pdig des régimes. La latence de 21 (14-35) jours pour l'observation de l'effet d'une carence en Phosphore digestible sur la CMJ est conforme aux observations de Kim *et al.* (2005). Ces auteurs n'observent cependant aucun d'effet sur l'efficacité alimentaire des animaux. Cet effet est vraisemblablement lié à la reformulation conjointe en minéral, en acides aminés et en EN qui a accentué la réduction de l'ingestion totale d'aliment. Il en résulte par conséquent des carences en nutriments pour la croissance.

De nombreux critères de minéralisation osseuse sont étudiés dans cet essai afin de définir celui qui est le plus précis et le plus sensible à la situation de carences en minéraux. L'étude suggère que les mesures de la teneur en matière sèche du métacarpe et de la densité osseuse seraient des critères pertinents permettant de caractériser ce type de carence. La corrélation positive entre ces critères et la teneur des

régimes en minéraux est en accord avec des résultats obtenus en nutrition humaine (Fehily *et al.*, 1992 ; Metz *et al.*, 1993). Le dosage du Ca et du phosphore dans les cendres donne des résultats plus complexes à interpréter, ce qui peut suggérer une faible sensibilité et spécificité de ces mesures. La stratégie de reformulation minérale basée sur une réduction du Ca et du Pdig selon des ratios différents permet d'expliquer des différences de minéralisation osseuse entre les régimes TP, TN1-, TN2- et TN3-. On constate ainsi pour l'ensemble des critères une classification avec TP supérieur au TN1- et TN2- supérieur au TN3-. La modification des ratios Ca:Pdig et l'interaction avec la teneur en EN et en acides aminés digestibles dans les aliments peut également impacter les résultats en influençant l'ingestion des animaux et leur croissance. Le dispositif expérimental mis en place ne permet pas de prendre en compte ces effets. Il est remarquable de constater la résilience osseuse des animaux alimentés avec des aliments à teneur décroissante en Pdig. De nombreux auteurs rapportent un développement précoce des os (Greene *et al.*, 2005 ; Rizzoli *et al.*, 2009) qui semble contradictoire avec les observations effectuées où les carences sont décelables après 77 jours d'essai. Ces données suggèrent par conséquent l'existence de réserves en minéraux capables de faire face à des carences temporaires.

La supplémentation des régimes TN avec un cocktail enzymatique améliore les performances de croissance et l'efficacité alimentaire. Un grand nombre de publications existe pour décrire l'effet des phytases et carbohydrases seules ou en combinaison dans différents types de régimes chez le poulet, le porc sevré ou en engraissement. Une méta-analyse réalisée sur ces essais suggère un effet plus important des combinaisons relativement à chacune des enzymes prises individuellement (Lindberg *et al.*, 2007 ; Moehn *et al.*, 2007 ; Nortey *et al.*, 2007 ; Woyengo *et al.*, 2008 ; Atakora *et al.*, 2011 ; Yanez *et al.*, 2011). L'augmentation de la digestibilité du phosphore sous l'effet des phytases conduit à une augmentation de l'ingestion volontaire des animaux. Ces résultats sont en accord avec les résultats de Harper *et al.* (1997). L'efficacité des phytases a également pu être démontrée au travers de l'amélioration des paramètres osseux. Les données rapportées sur le métacarpe sont en accord avec celles de O'Quinn *et al.* (1997). L'incorporation de phytases dans les régimes peut également contribuer à de meilleurs dépôts musculaires grâce à une augmentation de la digestibilité de l'azote. Une étude précédente (Kornegay et Qian, 1996) suggère ainsi un effet bénéfique des phytases sur la digestibilité du phosphore, du Ca et de l'azote, respectivement de 11,9, 8,1 et 1,5 points. Cette augmentation de la digestibilité de l'azote est liée à une diminution des pertes endogènes et à une rupture des complexes phytatesprotéines, augmentant la digestibilité de ces dernières.

Les carbohydrases participent également à l'amélioration de l'efficacité alimentaire (Cromwell *et al.*, 1991). Les mécanismes invoqués sont liés à l'hydrolyse des parois végétales, rendant les nutriments plus accessibles à l'action des enzymes endogènes (Barrera *et al.*, 2004).

CONCLUSION

Les animaux recevant un aliment à teneur réduite en énergie nette, acides aminés digestibles, phosphore digestible et calcium ont des performances diminuées par rapport aux animaux nourris selon les recommandations du NRC (1998).

La supplémentation de ces régimes avec une combinaison de carbohydrases et d'une phytase permet de rattraper cette différence dans le contexte de cet essai. L'incorporation d'un complexe enzymatique permet un gain substantiel pour le producteur en termes de coûts alimentaire et environnemental. Cependant, si la reformulation minérale dans l'étude présentée est maîtrisée, quelques travaux supplémentaires sont nécessaires quant à la reformulation en acides aminés digestibles et en énergie. La réduction de la teneur en acides aminés digestibles et en énergie appliquée dans cet essai n'a pas permis de restaurer les performances à des niveaux équivalents au témoin positif.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atakora J.K.A., Moehn S., Sands J.S., Ball R.O., 2011. Effects of dietary crude protein and phytase-xylanase supplementation of wheat grain based diets on energy metabolism and enteric methane in growing finishing pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 166, 422-429.
- Barrera M., Cervantes M., Sauer W.C., Araiza A. B. Torrentera N., 2004. Ileal amino acid digestibility and performance of growing pigs fed wheat-based diets supplemented with xylanase. *J. Anim. Sci.*, 82, 1997-2003.
- Braña D.V., Ellis M., Castaneda E.O., Sands J.S., Baker D.H., 2006. Effect of a novel phytase on growth performance, bone ash, and mineral digestibility in nursery and grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.*, 84, 1839-1849.
- Cromwell G.L., Stahly T.S., Randolph J.H., 1991. Effects of phytase on the utilization of phosphorus in corn-soybean meal diets by growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.*, 69, 358 (Abstr. 1.).
- Fehily A.M., Coles R.J., Evans, W.D., Elwood P.C., 1992. Factor affecting bone density in young adults. *Am. J. Clin. Nut.*, 56, 579-586.
- Greene D.A., Naughton G.A., Briody J.N., Kemp A., Woodhead H., Corrigan L., 2005. Bone strength index in adolescent girls: does physical activity make a difference? *Br. J. Sp. Med.*, 39, 622-627.
- Harper A.F., Kornegay E.T., Schell T.C., 1997. Phytase supplementation of low-phosphorus growing-finishing pig diets improves performance, phosphorus digestibility, and bone mineralization and reduces phosphorus excretion. *J. Anim. Sci.*, 75, 3174-3186.
- Kim J.C., Simmins P.H., Mullan B.P., Pluske J.R., 2005. The effect of wheat phosphorus content and supplemental enzymes on digestibility and growth performance of weaner pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 118, 139-152.
- Kornegay E.T., Qian H., 1996. Replacement of inorganic phosphorus by microbial phytase for young pigs fed on a maize-soybean-meal diet. *Br. J. Nut.*, 76, 563-578.
- Lindberg J.E., Lyberg K., Sands J., 2007. Influence of phytase and xylanase supplementation of a wheat-based diet on ileal and total tract digestibility in growing pigs. *Livest. Sci.*, 109, 268-270.
- Metz, J.A., Anderson, J.J.B., and Gallagher, P.N. Jr., 1993. Intakes of calcium, phosphorus, and protein and physical activity level are related to radial bone mass in young adult women. *Am. J. Clin. Nut.* 58: 537-542.
- Moehn S., Atakora J.K.A., Sands J., Ball R.O., 2007. Effect of phytase-xylanase supplementation to wheat-based diets on energy metabolism in growing-finishing pigs fed ad libitum. *Livest. Sci.*, 109, 271-274.
- Nortey T.N., Patience J.F., Simmins P.H., Trotter N.L., Zijlstra R.T., 2007. Effects of individual or combined xylanase and phytase supplementation on energy, amino acid, and phosphorus digestibility and growth performance of grower pigs fed wheat-based diets containing wheat millrun. *J. Anim. Sci.*, 85, 1432-1443.
- NRC, National. Research. Council. 1998. Nutrient Requirements of Swine. Washington, DC., Academy Press. 212 pages
- O'Quinn P.R., Knabe D.A., Gregg E.J., 1997. Efficacy of Natuphos in sorghum-based diets of finishing swine. *J. Anim. Sci.*, 75, 1299-1307.
- Quiniou N., Noblet J., 2012. Effect of the dietary net energy concentration on feed intake and performance of growing-finishing pig housed individually. *J. Anim. Sci.*, 90, 4362-4372.
- SAS 1997. Statistical Analysis Systems. Cary NC, Statistical Analysis Systems Institute.
- Sauber T.E., Owens F.N., 2001. Cereal grains and byproducts for swine. *Swine Nutrition*. A. J. Lewis and L. L. Southern (ed), New York, CRC Press, 785-802.
- Sauvart D., Perez J.M., Tran G., 2004. Tables of composition and nutritive value of feed materials Pigs, poultry, cattle, sheep, goats, rabbits, horses, fish. INRA Editions, Versailles, France
- Shaw D.T., Rozeboom D.W., Hil, G.M., Orth M.W., Rosenstein D.S., Link J.E., 2006. Impact of supplement withdrawal and wheat middling inclusion on bone metabolism, bone strength, and the incidence of bone fractures occurring at slaughter in pigs. *J. Anim. Sci.*, 84, 1138-1146.
- O'Quinn P.R., Knabe D.A., Gregg E.J., 1997. Efficacy of Natuphos in sorghum-based diets of finishing swine. *J. Anim. Sci.*, 75, 1299-1307.
- Rizzoli R., Bianchi M.L., Garabédian M., McKay H.A., Moreno L.A., 2009. Maximizing bone mineral mass gain during growth for the prevention of fractures in the adolescents and the elderly. doi:10.1016/j.bone.2009.10.005. *Bone*.
- Rosen G., 2002. Microbial phytase in broiler nutrition. In: Recent advances in animal nutrition. p 105-117 (Ed) P.C. Garnsworthy and J. Wiseman, Nottingham Univ. Press, Nottingham, UK.
- Woyengo T.A., Sands J.S., Guenter W., Nyachoti C.M., 2008. Nutrient digestibility and performance responses of growing pigs fed phytase and xylanase-supplemented wheat-based diets. *J. Anim. Sci.*, 86, 848-857.
- Yáñez J.L., Beltranena E., Cervantes M., Zijlstra R.T., 2011. Effect of phytase and xylanase supplementation or particle size on nutrient digestibility of diets containing distillers dried grains with solubles cofermented from wheat and corn in ileal-cannulated grower pigs. *J. Anim. Sci.*, 89, 113-123.