

Effet de la granulation des aliments sur l'utilisation de l'énergie chez le porc en croissance : conséquences sur les teneurs en énergie nette des régimes

Etienne LABUSSIÈRE (1), Sandy ROUCHOUSE (2), Didier GAUDRE (3)

(1) PEGASE, INRAE, Agrocampus Ouest, 35590 Saint-Gilles, France

(2) Tecaliman, 2 impasse Fontaine, 44300 Nantes, France

(3) IFIP-Institut du Porc, La Motte au Vicomte, 35650 Le Rheu, France

(4) UEPR, INRAE, 35590 Saint-Gilles, France

etienne.labussiere@inrae.fr

Avec la collaboration de Georges GUILLEMOIS (4), Jean-François ROUAUD (4), Vincent PIEDVACHE (4), Marie-Hélène LOHAT (4), Alain MARCHAIS (1) et Cécile PERRIER (1)

Effet de la granulation des aliments sur l'utilisation de l'énergie chez le porc en croissance : conséquences sur les teneurs en énergie nette des régimes

La granulation des aliments est un procédé fréquemment employé en alimentation porcine, même si les valeurs nutritionnelles sont le plus souvent estimées à partir d'aliments présentés sous forme de farine. L'objectif de l'expérimentation était de tester les effets induits par la granulation à deux températures différentes sur l'utilisation digestive et métabolique de l'azote et de l'énergie de deux aliments formulés à partir de matières premières se différenciant par leur comportement à la granulation, chez les porcs mâles castrés et femelles. Pour cela, les bilans azotés et énergétiques de 48 porcs (24 mâles castrés et 24 femelles) d'un poids vif moyen de 86 kg et recevant deux formules alimentaires sous forme de farine ou de granulés fabriqués à basse ou à haute température (température en sortie de malaxeur de 55 ou 78 °C) ont été mesurés en chambre respiratoire. La granulation a permis d'améliorer le coefficient d'utilisation digestive de l'azote (+4,0 points) et de l'énergie (+2,6 points) quelle que soit la formule alimentaire. L'augmentation par la granulation de la quantité d'énergie métabolisable ingérée (+165 kJ/kg PV^{0,60}/j) a permis d'augmenter la rétention énergétique (+150 kJ/kg PV^{0,60}/j), en particulier sous forme de lipides, à cause d'une meilleure efficacité d'utilisation de l'énergie et d'une baisse de la production de chaleur liée à l'activité physique. Les mâles castrés ont systématiquement présenté une meilleure réponse à la granulation des régimes par rapport aux femelles. La granulation à basse température a permis d'augmenter de 5% la teneur en énergie nette des régimes. Cette amélioration n'est que de 2,8% pour une température de granulation plus élevée.

Effect of pelleting on utilization of dietary energy by growing pigs: consequences on dietary net energy values

Although pelleting of diets is a common practice in the pig industry, nutritional values are estimated from values of feedstuffs that have often been measured for diets presented as meal. The objectives of the study were to determine effects of pelleting at a low or a high temperature (55 or 78°C at the end of the conditioner) on digestive and metabolic utilization of nitrogen and energy of diets formulated with feedstuffs differing in their response to pelleting. During the experiment, nitrogen and energy balances of 48 pigs (24 castrated males and 24 females; mean body weight: 86 kg) were measured in respiration chambers when fed two diets offered as meal or pellets produced at a low or a high temperature. Digestive utilization of nitrogen and energy was improved by pelleting (+4.0 and 2.6 points increase in digestibility coefficient, respectively), regardless of the composition of the diet. Pelleting also improved the intake of metabolizable energy (+165 kJ/kg BW^{0.60}/d) and energy retention (+150 kJ/kg BW^{0.60}/d), because of increased energy efficiency and decreased heat production associated with physical activity. Castrated males always exhibited even better reactions to pelleting than females. Pelleting at a low temperature increased dietary net energy content by 5%, while increasing pelleting temperature reduced this improvement to 2.8%.

INTRODUCTION

Les valeurs nutritionnelles des matières premières pour les porcs sont généralement estimées dans des aliments présentés sous forme de farine (Sauvant *et al.*, 2002). Pourtant, les aliments distribués aux animaux dans les élevages sont fréquemment présentés sous forme de granulés. Ces granulés sont obtenus dans les usines de fabrication d'aliment du bétail par injection de vapeur dans le malaxeur puis passage forcé de la farine dans les trous de la filière de la presse à granuler. L'injection de vapeur dans la farine puis les frottements de la farine lors de son passage dans la filière entraînent un échauffement qui s'accompagne d'une cuisson de la farine. Différents auteurs ont rapporté des effets bénéfiques de la granulation sur l'utilisation digestive des nutriments et de l'énergie de matières premières ou d'aliments complets (Skiba *et al.*, 2002 ; Noblet et Champion, 2003; Danel *et al.*, 2016). Il a également été montré une amélioration de 5 (chez les femelles) à 11 % (chez les mâles castrés) des performances de croissance des porcs recevant un aliment ayant subi un traitement de granulation, même si les effets semblent dépendants du sexe (Quiniou *et al.*, 2013). Cependant, ces études fournissent peu d'indication sur la température subie par le produit pendant le processus de granulation. Il est en effet assez difficile de caractériser précisément l'intensité du traitement thermique subi par la farine lors de son passage dans la presse à granuler car le lieu principal de l'échauffement (la filière) est une pièce en mouvement, ce qui limite les possibilités d'instrumentation des équipements. Le plus souvent, seules, la température de la farine à la sortie du malaxeur et avant son passage dans la filière ou la température des granulés à la sortie de la presse sont mesurables en usine.

Le programme de recherche DY+Pig est un programme financé par les régions Bretagne et Pays de la Loire et des industriels de l'alimentation porcine. Les phases initiales de ce projet ont montré que les températures mesurées de part et d'autre de la filière de la presse à granuler ne représentent pas fidèlement la température maximale subie par la farine. De plus, les matières premières répondent de manière différentielle à la granulation selon la température appliquée, car une cuisson excessive peut pénaliser l'absorption des nutriments par la formation de composés issus de réactions de Maillard (Cozannet *et al.*, 2009). L'objectif de l'essai est de déterminer les effets induits par la granulation à deux températures différentes sur l'utilisation digestive et métabolique de l'azote et de l'énergie de deux aliments formulés à partir de matières premières se différenciant par leur comportement à la granulation, chez les porcs mâles castrés et femelles.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Dispositif expérimental

Afin de tester deux compositions alimentaires se différenciant par leur comportement à la granulation, deux formules d'aliment ont été calculées (Gaudré *et al.*, 2020 ; Tableau 1). En accord avec Danel *et al.* (2016), les résultats préliminaires du projet DY+Pig ont montré une plus grande sensibilité à la granulation du blé que du maïs. De même, le pois est susceptible de présenter une plus forte sensibilité à la granulation que le tourteau de soja, matière première ayant déjà subi un procédé thermique lors de son obtention. Ainsi, la formule 2 a été élaborée à partir de matières premières présentant une plus grande sensibilité à la granulation que la

formule 1. Chaque formule a ensuite été proposée aux animaux sous forme de farine ou de granulés fabriqués à basse ou à haute température. Les granulés (diamètre 4,5 mm) ont été fabriqués sur une presse ayant un débit de 1,25 T/h équipée d'une filière d'une épaisseur de 10 cm. Pour la granulation à basse et haute température, la température de la farine à la sortie du malaxeur était en moyenne de $55 \pm 5^\circ\text{C}$ et $78 \pm 3^\circ\text{C}$ respectivement et la température des granulés en sortie de filière était de $66 \pm 4^\circ\text{C}$ et $74 \pm 1^\circ\text{C}$, respectivement.

Tableau 1 – Composition et caractéristiques nutritionnelles des formules expérimentales

	Formule 1	Formule 2
Ingrédients (%)		
Blé		62,3
Maïs	65,0	
Pois		20,0
Son de blé		5,0
Remoulage demi-blanc	15,7	
Tourteau de soja	16,4	
Tourteau de colza		9,9
Acides aminés, minéraux et vitamines	2,9	2,8
Composition analysée		
Matière sèche (MS), %	87,8	87,3
Matière organique, % MS	95,0	95,2
Matières azotées totales, N × 6,25, % MS	17,5	17,8
Energie brute, MJ/kg MS	18,41	18,04

L'expérimentation s'est déroulée en huit répétitions de 3 semaines chacune. Au cours de chaque répétition, trois porcs mâles castrés et trois porcs femelles croisés Piétrain × (Landrace × Large White) ayant le même père et d'un poids vif (PV) moyen de 86 kg ont été placés individuellement en chambre respiratoire de type circuit ouvert pendant 1 semaine (6 jours à l'état nourri et 1 jour à l'état de jeûne). Disposant de deux chambres respiratoires identiques d'un volume intérieur de 12 m³, deux animaux ont été étudiés chaque semaine. Ils ont été alimentés en une seule fois par jour à sec avec l'une des deux formules alimentaires, présentées sous forme de farine ou de granulés, réalisés à basse ou à haute température. L'apport alimentaire fixé était de 2,40 MJ EM/kg PV^{0,60}/j, sur la base de la teneur en énergie métabolisable (EM) des matières premières présentées dans les tables de composition (Sauvant *et al.*, 2002). Les animaux ont été adaptés aux régimes pendant 2 semaines avant le début des mesures. Pendant toute la durée de l'expérience, les porcs ont été hébergés dans des cages de 1,50 × 2,20 m sur caillebotis métallique et à une température ambiante de 22°C.

1.2. Mesures et prélèvements

Les porcs ont été pesés au début de la semaine de mesures, le matin de la journée de jeûne et à l'issue de celle-ci. Les quantités d'aliment offertes ont été pesées chaque jour et un échantillon représentatif de l'aliment distribué a été prélevé chaque semaine pour la détermination immédiate de sa teneur en matière sèche (MS) par passage à l'étuve à 103°C pendant 24 h. En fin d'expérimentation, les échantillons de chaque régime ont été mélangés pour les analyses de laboratoire. Les refus et gaspillages d'aliment ont été collectés à la fin des 6 jours à l'état nourri et leur teneur en MS a été déterminée par passage à l'étuve à 103°C pendant 48 h. Les fèces ont été collectées à l'issue des 6 jours de mesures à l'état nourri ; elles

ont été homogénéisées et leur teneur en MS a été déterminée par passage à l'étuve à 103°C pendant 48 h. Un échantillon représentatif a également été lyophilisé, puis broyé (grille de 1 mm) pour les analyses de laboratoire. Les urines ont été collectées chaque jour dans des seaux contenant 250 mL d'acide sulfurique à 10%. Elles ont été pesées et 2% du poids quotidien a été prélevé et cumulé pour chaque animal sur les 6 jours de mesures à l'état nourri. La volatilisation ammoniacale a également été mesurée au cours des 6 jours, par récupération des condensats issus du système de régulation climatique de la chambre respiratoire, et par mesure de la perte d'ammoniac dans l'air extrait des chambres.

Les cinétiques de consommation de dioxygène et de productions de dioxyde de carbone et de méthane ont été mesurées chaque jour au cours de la semaine en chambre respiratoire, selon les méthodes de calorimétrie indirecte (Gerrits et Labussière 2015). L'activité physique des animaux a été mesurée à l'aide de capteurs de force placés sous les pieds de la cage hébergeant les animaux.

1.3. Analyses de laboratoire

Les échantillons d'aliment et de fèces ont été analysés pour leur teneur en MS, matière organique (MO), azote et énergie. Les échantillons d'urines ont été analysés pour leur teneur en azote et énergie.

1.4. Calculs et analyses statistiques

La production de chaleur totale (PC) a été calculée à partir de la consommation de dioxygène, des productions de dioxyde de carbone et de méthane et de l'excrétion urinaire d'azote incluant la volatilisation ammoniacale (Brouwer, 1965). Les composantes des bilans en azote et en énergie ont été calculées à partir des quantités d'azote et d'énergie de l'aliment ingéré, des fèces, des urines, sous forme de méthane et de PC afin de déterminer les quantités d'azote (NR) et d'énergie (ER) retenues. Le dépôt protéique (DP) a été calculé à partir de NR ($NR \times 6,25$) et le dépôt lipidique (DL) a été calculé en considérant que ER n'était constituée que de DP (23,6 kJ/g DP) et de DL (39,7 kJ/g DL).

Les cinétiques de consommation de dioxygène, de production de dioxyde de carbone et d'activité physique ont été étudiées afin de décomposer la PC en sa composante basale (Fasting Heat Production, FHP), en PC liée au repas à court et long terme (Thermic Effect of Feeding, TEF) et en PC liée à l'activité

physique (Activity related Heat Production AHP) (van Milgen *et al.*, 1997 ; van Klinken *et al.*, 2012). L'énergie nette (EN) a été calculée comme la somme de ER et de FHP. Toutes les composantes du bilan énergétique ont été calculées en fonction du poids métabolique ($PV^{0,60}$).

Deux animaux présentant des erreurs dans les collectes ont été exclus du dispositif et les données ($n = 46$) ont été analysées pour tester les effets de la formule alimentaire ($n = 2$), de la granulation ($n = 3$: sans, à basse ou à haute température), du sexe ($n = 2$) et de leurs interactions dans une procédure GLM (SAS, 2004). Les effets de la répétition, de la semaine de mesures et de la chambre ont également été inclus dans le modèle, mais ne sont pas rapportés dans les tableaux. Les moyennes ajustées ont été calculées à l'aide de l'option LSMEANS et elles ont été comparées entre elles par un test de Tukey.

2. RESULTATS

2.1. Performances de croissance et utilisation digestive des nutriments et de l'énergie

Les performances de croissance pendant la semaine de mesures en chambre respiratoire sont présentées dans le tableau 2. Les porcs ont significativement diminué leur niveau d'ingestion lorsque l'aliment était présenté sous forme de farine et quelle que soit la formule alimentaire. En moyenne, les porcs femelles ont présenté une croissance significativement supérieure à celle des mâles castrés. De plus, les mâles castrés ont présenté une croissance plus élevée, lorsque l'aliment était granulé, quelle que soit la formule alimentaire (1,13 vs 0,86 kg/j). A l'inverse, les femelles ont présenté une croissance réduite lorsque la formule 1 était proposée sous forme de granulés (1,15 vs 1,37 kg/j), alors que leur croissance n'a pas été affectée par la granulation de la formule 2 (1,12 kg/j). Les coefficients d'utilisation digestive (CUD) des nutriments et de l'énergie n'ont pas été significativement différents entre les formules alimentaires et le sexe des animaux.

En revanche, la granulation, quelle que soit sa température ou la composition de l'aliment, a amélioré les CUD de l'azote et de l'énergie. Le rapport entre l'EM et l'énergie digestible (ED) traduit de manière indirecte les pertes énergétiques sous forme de méthane et dans les urines. Celles-ci sont significativement plus élevées chez les mâles castrés que les femelles, notamment avec la formule 1.

Tableau 2 – Effet de la granulation, de la composition de l'aliment et du type sexuel sur les performances de croissance et la digestibilité des nutriments et de l'énergie chez les porcs en croissance

	Granulation			Formule		Sexe			Statistiques ²
	Sans	Basse T	Haute T	1	2	F ¹	MC ¹	ETR ¹	
Poids vif moyen, kg	85,5	87,3	87,9	87,1	86,6	87,1	86,6	5,4	
Aliment ingéré, g MS/j	2251 ^a	2355 ^b	2426 ^b	2323	2365	2328	2360	115	G**
GMQ ¹ , kg/j	1,05	1,17	1,13	1,11	1,12	1,19	1,04	0,17	S*, S×G ^T , S×F×G ^T
CUD ¹ , %									
MS ¹	84,3	86,1	85,3	85,0	85,5	85,7	84,8	2,5	
MO ¹	86,1	87,9	87,1	86,8	87,3	87,5	86,7	2,2	
N	77,5 ^a	81,5 ^b	80,3 ^b	80,5	79,0	80,5	79,0	4,0	G*
Energie	83,6 ^a	86,2 ^b	85,2 ^b	85,0	85,1	85,5	84,5	2,6	G*
EM/ED ¹ , %	97,3	97,4	97,2	97,4	97,2	97,5	97,1	0,5	S*, S×F ^T

¹T, température ; GMQ, gain moyen quotidien ; CUD, coefficient d'utilisation digestive ; MS, matière sèche ; MO, matière organique ; EM/ED : ratio entre l'énergie métabolisable et l'énergie digestible ; F, femelle ; MC, mâle castré.

²Les données ont été soumises à une analyse de variance pour tester les effets de la granulation (G), de la formule (F), du sexe (S), de leurs interactions, de la répétition, de la semaine de mesure et de la chambre ; ^TP < 0,10, *P < 0,05, **P < 0,01. Les lettres (a, b) différentes au sein d'une même ligne indiquent des valeurs significativement différentes entre elles.

2.2. Bilans azotés et énergétiques

Les composantes des bilans azotés et énergétiques sont présentées dans le tableau 3. La quantité d'azote digestible ingérée a été significativement plus élevée lorsque les aliments étaient présentés sous forme de granulés. Cependant, en combinant les effets de la granulation au niveau des quantités d'aliment ingéré et de l'utilisation digestive de l'azote, il apparaît que la quantité d'azote digestible est significativement augmentée, uniquement lors de la granulation à haute température avec la formule 1, mais dès la granulation à basse température avec la formule 2. La rétention d'azote a été légèrement augmentée par la granulation à haute température, et a été significativement plus élevée pour les femelles que les mâles castrés, qui expriment également une réduction du coefficient de rétention de l'azote. Conformément aux quantités d'aliment ingérées et à l'utilisation digestive de l'énergie, la granulation a permis une augmentation significative de l'EM ingérée. La PC totale a été significativement plus élevée lorsque l'aliment était présenté sous forme de granulés, notamment pour les femelles. Ceci s'explique principalement par l'augmentation du TEF à court terme avec la granulation, alors que l'AHP a été significativement plus faible

lorsque l'aliment était présenté sous forme de granulés fabriqués à basse température. Les porcs mâles ont également présenté un TEF plus élevé que les femelles et la formule 2 a également généré un TEF plus élevé. La rétention totale d'énergie ou sous forme de protéines ou de lipides ont toutes été significativement plus élevées lorsque l'aliment était présenté sous forme de granulés, notamment pour les mâles castrés. Finalement, la quantité d'EN a été significativement plus élevée lorsque l'aliment était présenté sous forme de granulés. L'étude des ratios énergétiques par rapport à l'EM ingérée fournit des indications sur l'utilisation métabolique de l'énergie par l'animal. Le TEF est une composante de l'extra-chauffeur qui a varié en fonction de la nature des nutriments et de l'utilisation métabolique de ceux-ci, mais sans être modifiée par la forme de présentation de l'aliment. La part d'EM perdue sous forme d'AHP a été significativement plus faible lorsque l'aliment était granulé à basse température, que lorsqu'il était granulé à haute température. Finalement, le ratio entre l'EN ou l'ER et l'EM a été significativement plus élevé lorsque l'aliment était présenté sous forme de granulés. Les femelles ont également présenté un ratio EN/ER plus élevé que les mâles castrés, du fait de l'augmentation de la FHP.

Tableau 3 - Effet de la granulation, de la composition de l'aliment et du type sexuel sur les bilans azotés et énergétiques et le dépôt de nutriments chez les porcs en croissance.

	Granulation			Formule		Sexe		ETR ¹	Statistiques ²
	Sans	Basse T	Haute T	1	2	F ¹	MC ¹		
Bilan azoté									
Azote digestible, g/j	48,9 ^a	53,8 ^b	55,7 ^b	52,4	53,2	52,9	52,7	2,9	G**, F×G*
Azote retenu, g/j	33,3	34,7	37,0	34,6	35,3	36,4	33,6	4,5	G ^T , S*
Coefficient de rétention de l'azote, %	68,2	64,5	66,6	66,2	66,6	69,0	63,8	7,5	S*
Bilan énergétique, kJ/kg PV^{0,60}/j									
EM ¹	2310 ^a	2475 ^b	2496 ^b	2428	2426	2426	2428	70	G**
Production de chaleur									
FHP ¹	790	798	814	811	790	827	774	48	S**
TEF¹									
Court terme	266 ^a	285 ^{ab}	297 ^b	267	298	263	303	34	F**, G*, S**
Long terme	181	181	162	172	177	178	172	48	
Total	447	466	460	439	476	440	475	36	F**, S**
AHP ¹	171 ^{ab}	159 ^a	192 ^b	173	176	173	175	2	G*
Totale	1408 ^a	1424 ^{ab}	1465 ^b	1423	1441	1441	1424	41	G**, S×G ^T
Energie retenue									
Sous forme de protéines	340 ^a	351 ^{ab}	373 ^b	351	359	369	340	41	G ^T , S*
Sous forme de lipides	562 ^a	700 ^b	658 ^b	665	626	616	664	75	G**, S*, S×G*
Totale	902 ^a	1051 ^b	1031 ^b	1005	984	985	1005	77	G**, S×G**
EN ¹	1691 ^a	1850 ^b	1845 ^b	1817	1774	1812	1779	76	F ^T , G**
Ratios énergétiques, % EM¹									
TEF ¹	19,4	18,8	18,4	18,1	19,6	18,2	19,6	1,6	F**, S**
AHP ¹	7,4 ^{ab}	6,5 ^a	7,7 ^b	7,1	7,2	7,1	7,2	1,1	G*
EN ¹	73,2 ^a	74,7 ^b	73,9 ^{ab}	74,8	73,1	74,7	73,2	1,5	F**, G*, S**
ER ¹	39,0 ^a	42,6 ^b	41,4 ^b	41,3	40,5	40,5	41,3	2,3	G**, S×G*
Dépôts, g/j									
Protéines	208	217	230	217	221	228	210	28	G ^T , S*
Lipides	204 ^a	257 ^b	243 ^b	245	228	226	243	28	G**, S ^T , S×G*

¹ T: température ; NR/ND, ratio entre l'azote retenu et l'azote digestible ; EM, énergie métabolisable ; EN, énergie nette ; ER, énergie retenue ; FHP, fasting heat production ; TEF, thermic effect of feeding ; AHP, activity heat production ; F, femelle ; MC, mâle castré. ² Les données ont été soumises à une analyse de variance pour tester les effets de la granulation (G), de la formule (F), du sexe (S), de leurs interactions, de la répétition, de la semaine de mesure et de la chambre ; ^TP < 0,10, *P < 0,05, **P < 0,01. Les lettres (a, b) différentes au sein d'une même ligne indiquent des valeurs significativement différentes entre elles.

2.3. Valeurs énergétiques des aliments

Les teneurs mesurées en ED, EM et EN des aliments utilisés pendant l'expérimentation sont présentées dans le tableau 4. La formule 1 a présenté des teneurs énergétiques plus élevées

que la formule 2. Quelle que soit la formule, la granulation a amélioré les teneurs en ED, EM et EN des aliments, en particulier lors de la granulation à basse température. Enfin, les teneurs en EM et EN mesurées avec les femelles ont été plus élevées que celles mesurées avec les mâles castrés.

Tableau 4 – Effet de la granulation, de la composition de l'aliment et du type sexuel sur les teneurs énergétiques des aliments pour les porcs en croissance (MJ/kg MS)

	Granulation			Formule		Sexe		ETR ¹	Statistiques ²
	Sans	Basse T	Haute T	1	2	F ¹	MC ¹		
Energie digestible	15,21 ^a	15,75 ^b	15,52 ^{ab}	15,65	15,34	15,59	15,40	0,47	F*, G*
Energie métabolisable	14,80 ^a	15,34 ^b	15,09 ^{ab}	15,24	14,92	15,20	14,95	0,44	F*, G*, S [†]
Energie nette	10,85 ^a	11,46 ^b	11,15 ^{ab}	11,40	10,91	11,36	10,95	0,46	F**, G**, S**

¹T, température ; F, femelle ; MC, mâle castré.

²Les données ont été soumises à une analyse de variance pour tester les effets de la granulation (G), de la formule (F), du sexe (S), de leurs interactions, de la répétition, de la semaine de mesure et de la chambre ; [†]P < 0,10, *P < 0,05, **P < 0,01. Les lettres différentes (a, b) au sein d'une même ligne indiquent des valeurs significativement différentes entre elles.

3. DISCUSSION

Les premières étapes du projet DY+Pig ont permis de montrer que les matières premières répondaient de manière différenciée au traitement de granulation. En accord avec Danel *et al.* (2016), la formule 2, composée de blé et de pois devrait présenter une plus forte sensibilité à la granulation que la formule 1 composée de maïs et de tourteau de soja. Cette différence se retrouve notamment au niveau de la quantité d'azote digestible, qui est augmentée par la granulation dès la basse température pour la formule 2, mais seulement avec la haute température pour la formule 1 (Tableau 3).

Les autres CUD ou nutriments digestibles ingérés n'ont pas présenté de différence significative dans les réponses des formules au traitement de granulation. L'étude du métabolisme énergétique des animaux nécessite de les isoler dans des chambres respiratoires, où il n'est pas possible de les alimenter par voie liquide. Dans ce contexte, la distribution des aliments sous forme de farine a entraîné un gaspillage alimentaire légèrement plus important que lorsque l'aliment était proposé sous forme de granulés. Ainsi, les quantités de MS ingérée ont été diminuées de 5 à 7% lors de la distribution de l'aliment sous forme de farine. Les effets de la granulation sur la digestibilité des régimes pour les porcs ont précédemment été rapportés pour différentes matières premières ou aliments (Wondra *et al.*, 1995 ; Skiba *et al.*, 2002 ; Noblet et Champion, 2003 ; Ball *et al.*, 2015 ; Danel *et al.*, 2016). Les améliorations mesurées dans cet essai pour l'azote et l'énergie sont cohérentes avec les effets précédemment rapportés (amélioration de 1 à 5 points de l'utilisation digestive), même si l'utilisation de grandes cages n'a pas permis de mesurer précisément ces paramètres car les collectes totales de fèces sont particulièrement imprécises. Ceci suggère donc que l'effet de la granulation sur l'utilisation digestive des régimes est robuste et observable pour des compositions variées en matières premières de l'aliment. L'application du traitement de granulation à basse ou haute température aux aliments s'est accompagnée d'une augmentation de la quantité d'EM ingérée. Cette variation est en partie imputable aux variations de quantités d'aliment ingérées, mais également à l'amélioration des teneurs en ED et en EM des régimes (Tableau 4). L'augmentation de l'EM ingérée (+165 kJ/kg PV^{0,60}/j) n'a pas affecté la PC mais a entraîné une augmentation de l'ER (+150 kJ/kg PV^{0,60}/j), ce qui signifie que presque l'intégralité de l'EM supplémentaire a été retenue dans les tissus corporels. D'après les efficacités d'utilisation de l'énergie pour les dépôts sous forme de protéines ou de lipides chez le porc (Noblet *et al.*, 1999) et en considérant les proportions respectives de protéines et de lipides dans le gain de poids, l'augmentation de l'EM ingérée n'aurait dû s'accompagner que d'une augmentation de l'ER de 125 kJ/kg PV^{0,60}/j. Nos résultats suggèrent donc que la

granulation a également modifié l'utilisation métabolique de l'EM. Ainsi, le ratio entre l'EN et l'EM a été significativement augmenté de 1,5 point lors de la granulation à basse température. Cette variation a notamment été permise par la forte diminution de la part d'EM perdue sous forme d'AHP, ce qui suggère que l'activité physique des porcs a été diminuée par le traitement de granulation, même s'il n'y a pas eu de modification significative du nombre de prises alimentaires. Dans une moindre mesure, la part d'EM perdue sous forme de TEF a été numériquement diminuée lors de l'application du traitement de granulation.

Les précédents essais du projet DY+Pig ont montré que la granulation entraînait un report de l'absorption des nutriments et de l'énergie depuis les compartiments fermentaires du caecum et du colon vers l'intestin grêle, lieu principal de la digestibilité enzymatique. Cela s'accompagne également d'une modification du profil des nutriments absorbés, avec une augmentation de l'absorption de l'énergie sous forme de glucose et une diminution de l'absorption de l'énergie sous forme d'acides gras volatils qui peut représenter jusqu'à 20% de la satisfaction des besoins énergétiques (Kennelly *et al.*, 1981). L'efficacité énergétique de la production d'ATP à partir de glucose est plus élevée que lorsque les acides gras volatils sont utilisés comme substrat énergétique (Armstrong, 1969), ce qui est en accord avec les variations numériques de la part d'EM perdue sous forme de TEF. Nos résultats suggèrent donc que le traitement de granulation modifie l'utilisation métabolique de l'énergie, en plus de modifications directes liées à l'amélioration de la digestibilité. La prise en compte de cet effet spécifique de la granulation dans la détermination de la valeur EN des régimes et des matières premières est donc à considérer.

La granulation à haute température a permis de confirmer en partie ces résultats, même si le ratio entre l'EN et l'EM présente une valeur intermédiaire entre celui mesuré avec la farine et celui mesuré avec la granulation à basse température. En particulier, l'amélioration de l'utilisation digestive de l'azote et de l'énergie a été moindre lors de l'augmentation de la température de granulation, ce qui suggère que ce critère de fabrication doit être contrôlé avec attention dans les usines de fabrication d'aliment. De plus, l'effet bénéfique de la granulation sur la PC liée à l'activité physique observé pour la granulation à basse température n'est pas observé pour une granulation à haute température. Ces résultats suggèrent donc que les conséquences comportementales des aliments sont susceptibles d'affecter la valeur nutritionnelle des aliments. En accord avec de précédents travaux (Quiniou *et al.*, 2013), les effets bénéfiques de la granulation sur les performances de croissance et le métabolisme des porcs ont été plus importants avec les mâles castrés que les femelles. En particulier, les mâles castrés ont présenté une plus forte augmentation de l'ER que les femelles, principalement parce que leurs dépôts de tissus corporels sont plus orientés vers le dépôt de lipides, qui a une efficacité énergétique supérieure.

CONCLUSION

L'application d'un traitement de granulation lors de la fabrication des aliments des porcs permet d'augmenter l'utilisation digestive et métabolique des nutriments et de l'énergie. L'amélioration de l'utilisation digestive a entraîné une augmentation des dépôts de protéines et de lipides.

Au final, une amélioration de plus de 5% de la teneur en EN des régimes a été observée avec la granulation à basse température, dont 3,6% sont dus à une amélioration de l'utilisation digestive. Les modifications induites par la granulation ont également été différentes selon le sexe des animaux utilisés. Ces résultats suggèrent que l'application d'un traitement de granulation doit être prise en compte dans

l'établissement des valeurs nutritionnelles des matières premières. La caractérisation de la réponse de chaque matière première à la température de granulation, et l'intégration de ces réponses dans les tables de valeurs nutritionnelles est une étape ultérieure pour rationaliser l'application de la granulation et ses conséquences sur l'utilisation de l'aliment par les porcs.

REMERCIEMENTS

Cette étude a fait partie du programme DY+Pig, financé par les Régions Bretagne et Pays de la Loire (FEADER Union Européenne), CCPA, Cooperl Arc Atlantique, Mixscience, Néovia et Provimi Cargill France, et animé par Valorial.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Armstrong D., 1969. Cell bioenergetics and energy metabolism. In: W. Lenkeit, K. Breirem & E. Crasemann (Eds), *Handbuch der Tierernährung*, 385-414. Verlag P. Parey, Hamburg, GE.
- Ball M.E.E., Magowan E., McCracken K.J., Beattie V.E., Bradford R., Thompson A., Gordon F.J., 2015. An investigation into the effect of dietary particle size and pelleting of diets for finishing pigs. *Livest. Sci.*, 173, 48-54.
- Brouwer E., 1965. Report of sub-committee on constants and factors. In: K.L. Blaxter (Ed), *Proceedings of the 3rd Symposium on Energy Metabolism*, 441-443, Academic Press, London, UK.
- Cozannet P., Primot Y., Métayer J.-P., Gady C., Lessire M., Geraert P.-A., Le Tutour L., Skiba F., Noblet J., 2009. L'utilisation des drêches de blé en alimentation porcine. *INRA Prod. Anim.*, 22, 11-16.
- Danel J., Callu P., Vilarino M., 2016. Effet de la granulation sur la valeur alimentaire d'aliments complets à base de céréales (blé, orge et maïs) chez le porcelet sevré et chez le porc en croissance. *Journées Rech. Porcine*, 48, 73-78.
- Gaudré D., Quiniou N., Guillou D., Mener T., Le Gall M., Hamard A., Samson A., Rouchouse S., Putier F., Rouverand S., 2020. Effets des conditions de granulation des aliments sur les performances des porcs en engraissement. *Journées Rech. Porcine* 52, 99 -104.
- Gerrits W., Labussière E., 2015. Indirect calorimetry. *Techniques, computations and applications*.
- Kennelly J.J., Aherne F.X., Sauer W.C., 1981. Volatile fatty acid production in the hindgut of swine. *Can. J. Anim. Sci.* 61, 349-361.
- Noblet J., Champion M., 2003. Effect of pelleting and body weight on digestibility of energy and fat of two corns in pigs. *J. Anim. Sci.*, 81, 140.
- Noblet J., Karege C., Dubois S., van Milgen J., 1999. Metabolic utilization of energy and maintenance requirements in growing pigs: effects of sex and genotype. *J. Anim. Sci.*, 77, 1208-1216.
- Quiniou N., Mener T., Montagnon F., 2013. Effet de l'incorporation de l'aliment sous forme de farine ou de miette dans la soupe sur les performances du porc en croissance et ses caractéristiques de carcasse. *Journées Rech. Porcine*, 45, 205-206.
- SAS, 2004. *SAS/STAT® 9.1 User's Guide*.
- Sauvart D., Perez J., Tran G., 2002. Tables de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage. 301 p.
- Skiba F., Noblet J., Callu P., Evrard J., Melcion J.P., 2002. Influence du type de broyage et de la granulation sur la valeur énergétique de la graine de colza chez le porc en croissance. *Journées Rech Porcine*, 34, 67-73.
- van Klinken J., van den Berg S., Havekes L., Willems Van Dijk K., 2012. Estimation of activity related energy expenditure and resting metabolic rate in freely moving mice from indirect calorimetry data. *PLoS ONE*, 7, e36162.
- van Milgen J., Noblet J., Dubois S., Bernier J., 1997. Dynamic aspects of oxygen consumption and carbon dioxide production in swine. *Br. J. Nutr.*, 78, 397-410.
- Wondra K.J., Hancock J.D., Behnke K.C., Hines R.H., Stark C.R., 1995. Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *J. Anim. Sci.*, 73, 757-763.