

Effets du dépelliculage et de l'extrusion sur la valeur nutritionnelle de la graine de féverole chez le porc en croissance

Hauteclaire FURBEYRE (1), Mathieu GUILLEVIC (2), Guillaume CHESNEAU (2), Etienne LABUSSIÈRE (1)

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

(2) Valorex, 35210 Combourtillé, France

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

hauteclaire.furbeyre@inrae.fr

Avec la collaboration de Georges GUILLEMOIS (3), Jean-François ROUAUD (3), Alain CHAUVIN (3), Mickaël GENISSEL (3), Julien GEORGES (3), Francis LE-GOUEVEC (3), Marie-Hélène LOHAT (3), Vincent Piedvache (3), Colette MUSTIERE (1), Cécile PERRIER (1), Gwennola ROBIN (1)

Effet du dépelliculage et de l'extrusion sur la valeur nutritionnelle de la graine de féverole chez le porc en croissance

La graine de féverole constitue une matière première riche en protéines et est susceptible de remplacer partiellement ou totalement les sources traditionnelles de protéines dans l'alimentation du porc, telles que le tourteau de soja. La graine de féverole contient cependant des facteurs anti-nutritionnels connus pour réduire la digestibilité des protéines. L'application de traitements de dépelliculage et d'extrusion permettrait de réduire la concentration et/ou l'activité des facteurs anti-nutritionnels présents dans la graine de féverole. Dans deux premiers essais, la digestibilité fécale et iléale des composants de la ration et de l'énergie de deux formes de graines de féverole – graine entière (GE) ou dépelliculée (D) – sans extrusion (E0) ou soumises à une extrusion à 140°C (E1) ou 160°C (E2) ont été évaluées chez le porc en croissance. La digestibilité iléale standardisée des acides aminés était maximale pour les régimes contenant la féverole GE-E1 (91,5%) et la féverole D-E2 (92,1%). L'extrusion, quelle que soit la température, augmente la digestibilité iléale de l'énergie de la graine de féverole, entière (+2,6%) ou dépelliculée (+3,0%), et améliore la digestibilité fécale de l'énergie pour la féverole dépelliculée uniquement (+2,5%). Un troisième essai a été conduit afin de valider les valeurs nutritionnelles obtenues lors des mesures de digestibilité, pour les graines de féverole GE-E0, GE-E1, D-E0 et D-E2. Dans cet essai, les féveroles ont été incorporées comme source principale de protéines en remplacement du tourteau de soja au sein de quatre régimes formulés à teneurs équivalentes en énergie nette et acides aminés standardisés iléaux digestibles. Les performances de croissance et d'abattage ont été mesurées en respectant une stratégie individuelle d'alimentation multiphase à la semaine. Les porcs recevant les régimes comprenant les féveroles présentaient une consommation, une croissance et des performances à l'abattage similaires aux porcs recevant un régime à base de tourteau de soja. Les résultats obtenus valident les valeurs nutritionnelles calculées pour les féveroles GE-E0, GE-E1, D-E0 et D-E2.

Effect of dehulling and extrusion on nutritional values of faba bean in pigs

Faba bean is a protein-rich seed that could partially or completely replace traditional protein sources in pig feed such as soybean meal. However, faba beans contain secondary metabolites that restrict bioavailability of the beans' proteins. Technological processes such as dehulling and extrusion may reduce the concentration and/or biological activity of these antinutritional factors. In two first trials, apparent fecal and ileal digestibility of dietary components and energy from whole (W) or dehulled (D) faba bean, without (E0) or with extrusion at two temperatures (140°C (E1) or 160°C (E2)) were determined in growing pigs. Ileal digestibility of amino acids peaked for the W-E1 (91,5%) and D-E2 diets (92,1%). Extrusion increased ileal digestibility of gross energy of both W (+2,6%) and D (+3,0%) and fecal digestibility of gross energy of D (+2,5%). A third trial was performed to validate nutritional values obtained in trial 1 for diets W-E0, W-E1, D-E0 and D-E2. In this trial, faba bean was introduced as the main protein source in each of four diets formulated with same net energy and standardized ileal digestible amino acid contents. Growth and slaughter performances were measured in a multiphase feeding strategy with one diet per pig per week. Pigs fed the four faba-bean diets had feed intake, growth and body weight at slaughter that did not differ significantly from those of pigs receiving a diet with soybean meal. The results confirm the nutritional values calculated for the four faba-bean diets studied (W-E0, W-E1, D-E0 and D-E2).

INTRODUCTION

La graine de féverole contient une haute teneur en protéines (25% ; INRA-AFZ, 2002) et constitue donc un ingrédient d'intérêt pour l'alimentation du porc en Europe en tant qu'alternative aux sources de protéines traditionnelles, telles que le soja. Ses concentrations élevées en facteurs antinutritionnels, tels que les tannins, la vicine et la convicine, limitent considérablement la biodisponibilité des protéines présentes dans la graine (Jezierny *et al.*, 2010). L'activité et la concentration des facteurs antinutritionnels présents dans la graine de féverole pourraient être réduites par l'application de procédés technologiques tels que le dépelliculage et l'extrusion (Mariscal-Landin *et al.*, 2002). L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet de deux niveaux d'extrusion sur la valeur nutritionnelle de la graine de féverole, entière ou dépelliculée.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Digestibilité fécale et iléale des graines de féverole

La digestibilité fécale et iléale de la graine de féverole soumise à différents procédés technologiques a été évaluée au travers de deux essais. Six formes de graines de féverole de printemps, de variété Tiffany, ont été étudiées : la graine de féverole entière (GE) ou dépelliculée (D) était soit conservée dans sa forme brute (E0) ou soumise à une extrusion à 140°C avec des forces de pression et de cisaillement modérées (E1) ou à 160°C avec des forces de pression et de cisaillement fortes (E2). Les graines de féverole étaient présentées sous forme d'un mélange comprenant 90% de féverole et 10% de graine de soja comme additif technologique pour l'extrusion.

Dans le premier essai, trois répétitions de 15 porcs mâles castrés (n=45) d'un poids vif (PV) initial de $54,2 \pm 3,6$ kg ont été affectés soit à un régime « Contrôle » composé de 81% de blé et 15% de tourteau de soja (18% MAT) ou un régime supplémenté, constitué du régime « Contrôle » dont 35% étaient substitués par de la graine de féverole entière sans extrusion (GE-E0) ou extrudée à 140°C (GE-E1) ou extrudée à 160°C (GE-E2) ou par de la graine de féverole dépelliculée sans extrusion (D-E0) ou extrudée à 140°C (D-E1) ou extrudée à 160°C (D-E2). A l'issue d'une période de 2 semaines d'adaptation au régime expérimental, les porcs étaient logés en cages à digestibilité pendant 7 jours pour la mesure de l'ingéré et la collecte totale des fèces et des urines, séparément. Les régimes expérimentaux alloués étaient échantillonnés chaque jour et un repas fictif était réalisé en cumulant les échantillons d'aliment pour les 7 jours de distribution. A la fin de la période de collecte, les fèces étaient pesées et homogénéisées. La matière sèche (MS) des fèces et des repas fictifs était mesurée après séchage en étuve à 103°C, respectivement pendant 48 et 24 h. Les teneurs en énergie brute (EB), en matière organique (MO) et en matière azotée totale (MAT, Nx6,25) ont été déterminées dans les repas fictifs broyés à 1 mm et dans les fèces préalablement lyophilisées puis broyées à 1 mm. Les coefficients de digestibilité ont été calculés selon la méthode par différence.

Dans un second essai, huit porcs mâles castrés en croissance (PV initial de $39,8 \pm 2,1$ kg) ont subi une anastomose iléo-rectale d'après la procédure chirurgicale décrite par Laplace *et al.* (1985). A l'issue d'une période de récupération post-opératoire de 3 semaines, les porcs ont été placés en cages à digestibilité pour mesurer les quantités d'aliment ingérées et pour la

collecte des jus iléaux. L'essai comportait huit régimes expérimentaux : un régime « Contrôle » contenant 18% de protéine de pois et 67% d'amidon de maïs (17% MAT), six régimes supplémentés, constitués du régime « Contrôle » dont 30% étaient substitués par une des six graines de féverole testées (GE-E0, GE-E1, GE-E2, D-E0, D-E1 ou D-E2) et un régime pauvre en protéines (0,4% MAT). Les porcs ont été suivis pendant six périodes de 7 jours (4 jours d'adaptation au régime expérimental et 3 jours de collecte totale des jus iléaux). Chaque porc recevait successivement, selon un dispositif expérimental en carré de Youden, le régime « Contrôle », quatre régimes incluant les graines de féverole parmi les six modalités testées et le régime pauvre en protéines pour la détermination des sécrétions endogènes d'acides aminés. Les régimes expérimentaux alloués étaient échantillonnés chaque jour pendant la période de collecte et un repas fictif était réalisé en cumulant les échantillons d'aliment pour les 3 jours de distribution. Les jus iléaux étaient collectés quotidiennement dans des bacs en plastique contenant de l'acide sulfurique à 2% et cumulés pendant les 3 jours de mesure. La MS des jus iléaux et des repas fictifs était mesurée après séchage en étuve à 103°C, respectivement pendant 48 et 24 h. Les teneurs en EB, en MO et en MAT ont été déterminées dans les repas fictifs broyés à 1 mm et dans les jus iléaux préalablement lyophilisés puis broyés à 1 mm. Les profils en acides aminés (AA) ont été déterminés dans les repas fictifs et les jus iléaux. Les coefficients de digestibilité iléale apparente et iléale standardisée (IS) ont été calculés selon la méthode de Stein *et al.* (2007). Les valeurs des graines ont ensuite été calculées par différence entre les régimes supplémentés et le régime « Contrôle ».

1.2. Validation des valeurs nutritionnelles

A l'issue des études de digestibilité, 4 formes de féverole ont été sélectionnées parmi les 6 formes initialement testées afin de valider les valeurs nutritionnelles calculées. L'objectif principal de l'étude était de valider la valeur protéique des graines de féverole sélectionnées. Le dispositif expérimental a donc été construit afin de valider les teneurs en protéines et acides aminés digestibles des graines de féverole au travers d'une stratégie alimentaire dont l'apport protéique était le premier facteur limitant la croissance. Un essai a été conduit en deux répétitions de 60 porcs mâles entiers (respectivement, PV initial de $41,1 \pm 4,7$ et $38,6 \pm 4,1$ kg), logés individuellement jusqu'à l'abattage. Dans chaque répétition, cinq groupes de 10 porcs ont reçu cinq aliments expérimentaux, dont la source de protéines majoritaire était du tourteau de soja (groupe « Soja »), ou pour lesquels le tourteau de soja était partiellement ou totalement remplacé par les graines de féverole GE-E0, GE-E1, D-E0 ou D-E2 (Tableau 1). Les cinq groupes de porcs ont été conduits selon une stratégie alimentaire dont le ratio Lysine digestible (LysD ; digestibilité iléale standardisée) par unité d'énergie nette (EN) était fixé en deçà des besoins nutritionnels de l'animal moyen à PV égal (besoins de l'animal moyen déterminés sur la base de précédents essais ; Labussière *et al.*, 2014), afin d'assurer un apport protéique limitant pour la croissance. Deux niveaux d'apport ont été testés dans les deux répétitions, correspondant à 90 ou 95% des besoins de l'animal moyen. Afin de valider le caractère restrictif de la stratégie alimentaire appliquée aux groupes Soja et féveroles GE-E0, GE-E1, D-E0 et D-E2, un sixième groupe de 10 porcs dans chaque essai a été constitué et recevait l'aliment à base de tourteau de soja, selon une stratégie alimentaire dont l'apport protéique était fixé au-

Tableau 1 – Composition des aliments expérimentaux utilisés pour les essais de validation des valeurs nutritionnelles des graines de féverole

	Aliment 1	Aliment 2	Aliment 3	Aliment 4	Aliment 5	Aliment 6
	Soja		Féverole	Féverole	Amande de	Amande de
			GE	GE	féverole	féverole
			E0	E1	E0	E2
Source de protéines						
Traitement technologique						
Ingrédients, %						
Céréales (1/3 blé, 1/3 maïs, 1/3 orge)	69,6	64,2	56,7	63,2	45,9	54,3
Son de blé tendre	10,7	5,9	1,4	1,2	6,4	6,7
Coques de soja	6,4	3,5	0,8	0,7	3,9	4,0
Pulpe de betterave déshydratée	4,3	2,4	0,6	0,5	2,6	2,7
Tourteau de soja		15,4	0,4	2,7		
Féverole GE-E0			34,0			
Féverole GE-E1				26,7		
Féverole D-E0					33,1	
Féverole D-E1						26,0
Mélasses de canne	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Huile de tournesol	3,4	2,7			2,3	0,3
Complément vitamines et minéraux	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
L-Lysine HCl	0,25	0,34	0,18	0,18	0,08	0,15
L-Thréonine	0,07	0,13	0,14	0,11	0,11	0,12
L-Tryptophane	0,01	0,02	0,08	0,05	0,06	0,06
DL-Méthionine		0,08	0,17	0,14	0,17	0,16
L-Valine		0,08	0,04	0,03	0,05	0,03
Sel	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Carbonate de calcium	0,36	0,42	0,59	0,58	0,49	0,48
Phosphate bicalcique	1,13	1,04	0,97	0,99	0,96	0,98
Composition, % frais						
Matière azotée totale (N×6,25), %	9,7	15,3	15,9	15,4	16,4	15,6
Matière azotée digestible, %	7,1	12,4	12,7	12,8	13,2	13,1
Cellulose brute, %	6,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Matière grasse, %	5,6	4,8	3,2	2,7	5,0	3,1
NDF, %	19,2	16,0	13,3	13,2	14,9	14,8
ADF, %	7,3	6,1	5,8	5,6	5,8	5,9
ADL, %	1,2	1,0	0,8	0,6	0,7	0,8
Amidon, %	43,0	38,9	44,1	45,2	40,1	42,5
Energie nette, MJ/kg	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Lysine digestible/EN, g/MJ	0,47	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

dessus des besoins (110% des besoins de l'animal moyen ; groupe « Témoin haut ratio LysD / EN »). Les porcs ont été conduits selon une stratégie d'alimentation multiphase basée sur un apport en LysD / EN calculé individuellement et à la semaine, en fonction du poids vif individuel de chaque porc. Cinq aliments expérimentaux ont donc été constitués selon les conditions précédemment énoncées, avec un ratio LysD / EN fixé à 0,90 (Tableau 1). Les aliments 3 à 6 ont été formulés afin d'incorporer les 4 féveroles à tester en remplacement du tourteau de soja, en respectant un niveau équivalent en matière azotée digestible, en lysine digestible et en énergie nette ainsi qu'un profil équilibré en acides aminés digestibles standardisés dans tous les régimes. Par ailleurs, les formules tiennent compte des différences de concentration des féveroles en fibres insolubles. En parallèle, un sixième aliment expérimental a été formulé avec un bas ratio LysD / EN (ratio de 0,47 ; Tableau 1).

Chaque semaine, le ratio LysD / EN à distribuer était calculé individuellement en fonction du PV de chaque porc. Les rations individuelles quotidiennes étaient constituées d'un mélange entre l'aliment à bas ratio LysD / EN et l'aliment expérimental à haut ratio LysD / EN afin d'atteindre le ratio LysD / EN cible pour l'animal. La consommation d'aliment et la croissance hebdomadaires ont été mesurées individuellement jusqu'aux abattages réalisés à 156 ± 6 jours d'âge, à un PV moyen de

108 ± 10 kg. Le poids des carcasses a été déterminé au moment de l'abattage et 24 h après l'abattage. Les épaisseurs de muscle et de gras ont été mesurées à l'aide du capteur gras-maigre (CGM) afin de déterminer le taux de muscle des pièces (TMP).

1.3. Analyses statistiques

L'effet du traitement technologique de la féverole sur la digestibilité des nutriments dans le régime a été évalué en comparant les coefficients d'utilisation digestive des régimes expérimentaux par analyse de variance (procédure GLM ; SAS v9.4, SAS Inst. Inc., Carry, NC, USA). Dans l'essai de validation, deux et cinq porcs dans les répétitions 1 et 2 respectivement ont été exclus des analyses statistiques pour cause de problème de santé ayant affecté les performances de croissance. La consommation moyenne journalière (CMJ), le gain moyen quotidien (GMQ), l'indice de consommation (IC) et les performances à l'abattage (PV à l'abattage, rendement de carcasse, TMP) ont été soumis à une analyse de variance (procédure GLM de SAS version 9.4) considérant le lot expérimental, la répétition et l'interaction entre le lot et la répétition comme effets fixes. Le PV initial était pris en compte en covariable pour l'analyse des performances de croissance et le PV à l'abattage était utilisé comme covariable pour l'analyse du TMP.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

La variété de féverole utilisée dans nos essais possède des caractéristiques chimiques (Tableau 2) proches des caractéristiques des féveroles de printemps analysées dans des études similaires (Grosjean *et al.*, 2001). Le dépelliculage de la graine de féverole conduit à une diminution nette de la teneur en fibres insolubles et une élévation de la teneur en protéines dans le produit final. Les deux procédés d'extrusion testés n'ont pas affecté la composition générale des féveroles testées.

Tableau 2 – Composition des six matières premières testées

Teneur, % de la matière sèche	Graine de féverole entière			Graine de féverole dépelliculée		
	E0	E1	E2	E0	E1	E2
Matière minérale	4,4	4,4	4,3	4,6	4,5	4,6
MAT (N×6,25)	29,4	30,0	29,3	32,9	32,2	33,3
Matière grasse	4,1	3,8	3,8	4,0	4,2	4,1
Cellulose brute	9,3	7,3	7,8	2,6	2,5	2,8
NDF	14,2	12,4	12,3	8,9	5,6	4,1
ADF	10,1	8,9	9,3	2,8	2,7	3,1
ADL	0,3	0,5	0,6	0,2	0,4	0,4

2.1. Utilisation digestive des graines de féverole chez le porc en croissance

Les coefficients d'utilisation digestive de la matière sèche, la matière organique, l'énergie brute et les protéines des régimes expérimentaux sont présentés dans les tableaux 3 et 4. Les valeurs nutritionnelles calculées pour les six graines de féverole sont présentées dans le tableau 5.

Indépendamment des procédés d'extrusion, la féverole dépelliculée présente une digestibilité iléale et fécale de la matière organique et une digestibilité fécale de l'énergie supérieure à la graine entière. Cette amélioration de la digestibilité se traduit par une augmentation significative des coefficients d'utilisation digestive de ces paramètres pour le régime D-E0 en comparaison au régime GE-E0 ($P < 0,01$).

Le dépelliculage ne modifie cependant pas la digestibilité iléale des protéines et acides aminés du régime ($P > 0,10$). Les études précédemment menées montrent une digestibilité des acides aminés dans la féverole équivalente ou améliorée par le dépelliculage (Maillard *et al.*, 1990; Mariscal-Landin *et al.*, 2002). En accord avec ces auteurs, la réduction de la teneur en fibres par le dépelliculage a permis d'obtenir un produit plus concentré en éléments digestibles. L'analyse de différentes variétés de féverole selon les études peut expliquer un effet

positif plus ou moins prononcé du dépelliculage sur la digestibilité des acides aminés. En particulier, la teneur en tannins dans la pellicule des graines de féverole étudiées pourrait avoir une incidence sur l'amélioration de la digestibilité des acides aminés contenus dans la graine (Maillard *et al.*, 1990). Néanmoins, malgré une digestibilité similaire des acides aminés, l'amande de féverole demeure plus riche en acides aminés digestibles du fait de sa concentration en acides aminés plus élevée (Tableau 5). L'application de procédés d'extrusion sur les deux présentations de graines (entière ou dépelliculée) montre des effets contrastés sur la biodisponibilité des nutriments contenus dans la féverole. Pour la graine entière, la digestibilité fécale des protéines et la digestibilité iléale de la matière organique, de l'énergie, des protéines et des acides aminés étaient significativement supérieures pour le régime GE-E1 en comparaison au régime GE-E0 ($P < 0,001$; Tableaux 3 et 4). Néanmoins, l'élévation de la température d'extrusion à 160°C n'apporte pas de bénéfice sur la digestibilité des nutriments en comparaison à l'extrusion à 140°C. A l'inverse, la graine entière de féverole extrudée à 160°C possède une digestibilité iléale des protéines plus faible que la graine extrudée à 140°C ($P < 0,001$; Tableau 4).

L'extrusion est reconnue pour améliorer la digestibilité des protéines et des acides aminés contenus dans les légumineuses chez le porc (Jeziorny *et al.*, 2010). Elle induit une réduction et une inactivation des facteurs antinutritionnels tels que les inhibiteurs de protéase ou les tannins. Une variation de la digestibilité des protéines en réponse à l'extrusion a été soulevée par Kaysi et Melcion (1992) sur des essais menés chez le poulet. Les auteurs décrivent une amélioration de la digestibilité de l'azote et de l'énergie aux conditions d'extrusion les plus douces, et une réduction de la digestibilité de l'azote aux conditions les plus drastiques. La présence de fibres insolubles dans l'enveloppe de la graine de féverole pourrait interférer avec le procédé d'extrusion. L'élévation de la température d'extrusion sur la graine entière pourrait induire la formation de complexes sucres-protéines (van Der Poel *et al.*, 1992), avec pour conséquence une réduction de la biodisponibilité des protéines de la graine de féverole. Cette hypothèse est étayée par une modification du profil en acides aminés digestibles pour la graine de féverole entière extrudée à 160°C et une baisse ciblée de la biodisponibilité de certains acides aminés (arginine, isoleucine, méthionine et valine). Ces observations sont visibles au travers des teneurs en acides aminés digestibles présentées dans le tableau 5. Le dépelliculage de la graine de féverole augmente l'efficacité du procédé d'extrusion. L'extrusion à 140°C appliquée à l'amande

Tableau 3 – Digestibilité fécale de la matière sèche, de la matière organique, de l'énergie brute et des protéines des régimes

	Régimes expérimentaux ¹						ETR ²	P-value ²	
	Contrôle	Graine de féverole entière			Graine de féverole dépelliculée				
		E0	E1	E2	E0	E1			E2
Coefficient de digestibilité fécale, %									
Matière sèche	86,2 ^b	84,6 ^c	85,0 ^c	84,6 ^c	86,8 ^b	88,5 ^a	88,4 ^a	0,7	<0,001
Matière organique	88,3 ^b	86,3 ^c	86,9 ^c	86,5 ^c	88,8 ^b	90,6 ^a	90,4 ^a	0,7	<0,001
Energie brute	85,8 ^{bc}	84,2 ^d	85,1 ^{cd}	84,8 ^{cd}	86,3 ^b	88,8 ^a	88,7 ^a	0,8	<0,001
Protéines (N×6,25)	84,2 ^b	81,7 ^c	84,4 ^b	83,7 ^{bc}	83,8 ^{bc}	88,2 ^a	87,6 ^a	1,5	<0,001

¹ n = 5 porcs/régime ; les régimes GE-E0, GE-E1, GE-E2, D-E0, D-E1, D-E2 sont composés de 65% du régime Contrôle et 35% de féverole ; GE-E0 : féverole graine entière non-extrudée ; GE-E1 : féverole graine entière extrudée à 140°C ; GE-E2 : féverole graine entière extrudée à 140°C ; D-E0 : féverole dépelliculée non-extrudée ; D-E1 : féverole dépelliculée extrudée à 140°C ; D-E2 : féverole dépelliculée extrudée à 160°C.

² Analyse de variance réalisée avec la procédure GLM de SAS (SAS version 9.4) en prenant en compte l'effet du régime expérimental. Les moyennes suivies de lettres différentes diffèrent significativement entre elles ($P < 0,05$). ETR = écart-type résiduel.

Tableau 4 – Digestibilité iléale de la matière organique, l'énergie brute, les protéines et les acides aminés des régimes

	Régimes expérimentaux ¹							ETR ²	P-value ²
	Contrôle	Féverole graine entière			Féverole graine dépelliculée				
		E0	E1	E2	E0	E1	E2		
Coefficient de digestibilité iléale apparente, %									
Matière organique	91,6 ^a	82,5 ^e	85,0 ^{cd}	84,2 ^{de}	84,7 ^{cd}	86,5 ^{bc}	87,5 ^b	1,2	<0,001
Energie brute	92,6 ^a	82,9 ^d	85,6 ^c	85,5 ^c	85,0 ^{cd}	87,2 ^{bc}	88,8 ^b	1,4	<0,001
Coefficient de digestibilité iléale standardisée, %									
Protéines (N×6,25)	95,0 ^a	86,5 ^d	92,2 ^{ab}	88,5 ^{cd}	87,6 ^d	88,9 ^{bcd}	91,3 ^{bc}	2,1	<0,001
AA Totaux	95,6 ^a	87,4 ^d	91,5 ^b	90,2 ^{bc}	88,4 ^{cd}	90,0 ^{bc}	92,1 ^b	1,6	<0,001
AA essentiels	95,3 ^a	87,7 ^d	91,4 ^{bc}	90,4 ^{bc}	89,1 ^{cd}	90,1 ^{bcd}	92,3 ^b	1,6	<0,001
AA non essentiels	95,9 ^a	87,1 ^d	91,5 ^b	90,1 ^{bc}	87,9 ^{cd}	90,0 ^{bc}	92,0 ^b	1,8	<0,001

¹ n=4 valeurs/régime ; les régimes GE-E0, GE-E1, GE-E2, D-E0, D-E1, D-E2 sont composés de 70% du régime Contrôle et 30% de féverole ; GE-E0 : féverole graine entière non-extrudée ; GE-E1 : féverole graine entière extrudée à 140°C ; GE-E2 : féverole graine entière extrudée à 140°C ; D-E0 : féverole dépelliculée non-extrudée ; D-E1 : féverole dépelliculée extrudée à 140°C ; D-E2 : féverole dépelliculée extrudée à 160°C.

² Analyse de variance réalisée avec la procédure GLM de SAS (SAS version 9.4) en prenant en compte l'effet du régime expérimental. Les moyennes suivies de lettres différentes diffèrent significativement entre elles (P<0,05). ETR= écart-type résiduel.

Tableau 5 – Valeurs nutritionnelles des graines de féverole testées

Teneur (%MS) ¹	Féverole graine entière			Féverole graine dépelliculée		
	E0	E1	E2	E0	E1	E2
Matière azotée						
Totale (N×6,25)	29,0	29,4	28,5	32,1	31,5	32,1
Digestible IS (N×6,25) ²	22,0	26,0	22,7	25,3	25,7	28,1
Acides aminés (digestibles IS)	21,0	23,7	22,1	24,1	24,3	26,7
Essentiels	10,1	11,2	10,4	11,6	11,5	12,8
Arginine	2,16	2,35	2,17	2,50	2,44	2,64
Histidine	0,57	0,63	0,60	0,68	0,66	0,72
Isoleucine	0,94	1,00	0,93	1,04	1,06	1,22
Leucine	1,65	1,84	1,76	1,88	1,90	2,08
Lysine	1,58	1,77	1,66	1,85	1,84	2,01
Méthionine	0,23	0,23	0,22	0,24	0,23	0,26
Phénylalanine	0,98	1,09	1,04	1,11	1,12	1,24
Thréonine	0,74	0,89	0,81	0,87	0,85	0,96
Valine	1,05	1,13	1,04	1,17	1,19	1,37
Tryptophane	0,18	0,29	0,23	0,28	0,25	0,30
Non-essentiels	10,9	12,5	11,7	12,4	12,8	13,9

¹ Teneurs calculées à partir des concentrations analysées en éléments et des coefficients de digestibilité calculés précédemment.

² IS : digestibilité iléale standardisée.

de féverole améliore la digestibilité fécale de la MS, de la MO, de l'énergie et des protéines contenues dans le régime (P < 0,001 ; Tableau 3).

L'application d'un traitement d'extrusion plus intense (160°C) ne modifie pas significativement les coefficients de digestibilité fécale et iléale des nutriments en comparaison au traitement d'extrusion E1 (140°C).

Néanmoins, l'extrusion de l'amande de féverole à 160°C conduit à une augmentation significative de la digestibilité iléale de la MO, de l'énergie, des protéines et acides aminés en comparaison à l'amande non-extrudée (+3,7% sur la digestibilité iléale des AA totaux ; P < 0,001) tandis que les coefficients de digestibilité iléale mesurés pour l'amande D-E1 demeurent intermédiaires. La féverole dépelliculée et extrudée à 160°C présente les teneurs en acides aminés digestibles les plus hautes parmi les six féveroles testées (Tableau 5).

Ces résultats démontrent une différence d'action du procédé d'extrusion sur la biodisponibilité des nutriments, selon que le traitement est appliqué sur la graine entière ou sur la graine dépelliculée.

2.2. Effet de l'inclusion des graines de féverole dans l'alimentation sur les performances du porc en croissance

Les effets de l'inclusion des graines de féverole GE-E0, GE-E1, D-E0 et D-E2 sur les performances du porc en croissance ont été évalués en considérant les valeurs nutritionnelles précédemment calculées (Tableau 6). Comme attendu, l'application d'une stratégie nutritionnelle « restrictive » dans les groupes Soja, GE-E0, GE-E1, D-E0 et D-E2 a conduit à une croissance significativement inférieure par rapport aux porcs conduits selon une stratégie alimentaire à haut ratio LysD / EN (supérieur aux besoins nutritionnels de l'animal moyen). L'indice de consommation était également détérioré chez les porcs des groupes conduits avec un bas ratio LysD / EN en comparaison aux porcs alimentés avec un haut ratio LysD / EN. L'incorporation des graines de féverole dans les régimes des lots GE-E0, GE-E1, D-E0 et D-E2 n'a pas affecté la consommation moyenne journalière. Le GMQ était similaire pour l'ensemble des groupes recevant un régime alimentaire à bas ratio LysD/EN. En conséquence, le PV à l'abattage n'était affecté que par la stratégie alimentaire utilisée, mais ne différait pas entre

Tableau 6 – Performances zootechniques de porcs charcutiers selon la stratégie alimentaire et le type de régime

Item ¹	Lot expérimental ²						Répétition ³		ETR ⁴	P-value ⁴		
	Témoïn Haut ratio LysD/EN	Soja	GE-E0	GE-E1	D-E0	D-E2	1	2		Régime	Essai	Régime *essai
Nombre de porcs	20	18	19	19	18	19	58	55				
PV initial, kg	39,6	40,2	39,6	40,1	40,0	39,7	41,1	38,6	4,6	1,00	0,004	0,94
CMJ, g/j	2628	2567	2612	2609	2571	2624	2668	2536	173	0,82	<0,001	0,22
GMQ, g/j	1108 ^a	974 ^b	977 ^b	999 ^b	967 ^b	996 ^b	1008	999	99	<0,001	0,66	0,13
IC g/g	2,38 ^a	2,65 ^b	2,68 ^b	2,63 ^b	2,66 ^b	2,64 ^b	2,66	2,55	0,17	<0,001	<0,001	0,28
PV à l'abattage, kg	114,9 ^a	106,0 ^b	105,9 ^b	107,5 ^b	105,3 ^b	107,4 ^b	106,2	109,4	7,1	<0,001	0,02	0,15
Rendement de carcasse, %	76,0	76,4	76,7	76,6	75,9	76,4	77,7	74,9	2,5	0,96	0,001	0,97
TMP, %	61,3	60,3	60,5	60,1	60,6	60,0	60,2	60,7	1,5	0,39	0,19	0,04

¹ PV : poids vif ; CMJ : consommation moyenne journalière ; GMQ : gain moyen quotidien ; IC : indice de consommation ; TMP : taux de muscle des pièces.

² Essai conduit sur 120 porcs en croissance recevant une alimentation multiphase jusqu'à l'abattage. Témoïn haut ratio LysD/EN : porcs conduits selon un plan d'alimentation avec un ratio Lysine digestible / EN au-dessus du besoin de l'animal moyen. Lots Soja, GE-E0, GE-E1, D-E0, D-E2 : porcs conduits selon un plan d'alimentation avec un ratio Lysine digestible / EN en dessous du besoin de l'animal moyen. Lots Témoïn Haut et Témoïn Bas : apport protéique majoritairement apporté par du tourteau de soja. Lot GE-E0 : inclusion de féverole graine entière non-extrudée en remplacement du tourteau de soja ; Lot GE-E1 : inclusion de féverole graine entière extrudée à 140°C en remplacement du tourteau de soja ; Lot D-E0 : inclusion de féverole dépelliculée non-extrudée en remplacement du tourteau de soja ; Lot D-E2 : inclusion de féverole dépelliculée extrudée à 160°C en remplacement du tourteau de soja.

³ Répétition 1 : ratio Lysine digestible / EN répondant à 90% des besoins de l'animal moyen pour les lots Soja et GE-E0, GE-E1, D-E0, D-E2 ; Répétition 2 : ratio Lysine digestible / EN répondant à 95% des besoins de l'animal moyen pour les lots Soja et GE-E0, GE-E1, D-E0, D-E2

⁴ Analyse de variance réalisée avec la procédure GLM de SAS (SAS version 9.4) en prenant en compte l'effet du lot expérimental, de la répétition et de l'interaction entre lot et répétition. Les covariables suivantes ont une contribution significative ($P < 0,05$) à l'analyse des données : le PV initial a été pris en compte comme covariable pour l'analyse de la CMJ et du GMQ ; le PV à l'abattage a été pris en compte comme covariable pour l'analyse du TMP. ETR = écart-type résiduel.

le groupe Soja et les groupes incluant les graines de féverole. Les rendements à l'abattage étaient similaires entre les groupes recevant les féveroles et le groupe recevant du tourteau de soja. Ces résultats confirment les teneurs en matière azotée digestible, en acides aminés digestibles et en énergie digestible calculés précédemment.

CONCLUSION

Les valeurs nutritionnelles de graines de féverole entières ou dépelliculées, soumises ou non à deux niveaux d'extrusion, ont été calculées à partir de la digestibilité fécale et iléale de régimes incluant, respectivement, 35 et 30% de chaque matière première. Les essais ont montré que la présence de la pellicule riche en fibres insolubles pourrait interférer avec le procédé d'extrusion, avec des conséquences sur la capacité du procédé d'extrusion à améliorer la biodisponibilité des nutriments présents dans la féverole. Dans ce cas, l'extrusion à haute

température pourrait favoriser la formation de complexes protéines-sucre non disponibles pour l'animal. En revanche, après dépelliculage, l'amande de féverole extrudée à 160°C présente les plus hautes concentrations en éléments digestibles. Les valeurs nutritionnelles mesurées dans ce travail ont été validées au cours d'un essai conduit avec des porcs en engraissement. L'inclusion des graines de féverole en remplacement du tourteau de soja dans l'alimentation des porcs en croissance peut être effectuée sans impact sur l'ingestion, la croissance ou les rendements à l'abattage. Les teneurs élevées en matière azotée digestible dans les amandes de féverole permettent le remplacement total du tourteau de soja dans l'alimentation du porc en croissance.

REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le projet Proleval, financé par Bpi France.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Grosjean F., Cerneau P., Bourdillon A., Bastianelli D., Peyronnet C., Duc G., 2001. Valeur alimentaire, pour le porc, de féveroles presque isogéniques contenant ou non des tanins et à forte ou faible teneur en vicine et convicine. Journées Rech. Porcine, 33, 205-210.
- INRA, AFZ, 2002. Tables de composition et de valeurs nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage : porcs, volailles, bovins, ovins, caprins, lapins, chevaux, poissons. Sauvart D., Perez J.M., Tran G., Eds. INRA Editions, Versailles, 293 p.
- Jezierny D., Mosenthin R., Weiss E., 2010. The use of grain legumes as a protein source in pig nutrition: A review. Anim. Feed Sci. Technol, 157(3), 111-128.
- Kaysi Y., Melcion J.P., 1992. Traitements technologiques des protéagineux pour le monogastrique : exemples d'application à la graine de féverole. INRA Prod. Anim., 5(1), 3-17.
- Labussière E., Batorek Lukač N., Besnard J. C., Čandek-Potokar M., Noblet J., 2014. Effet de la teneur en énergie nette du régime sur la consommation volontaire et les performances de croissance des porcs mâles immunocastrés. Journées Rech. Porcine, 46, 101-106.
- Laplace J.P., Darcy-Vrillon B., Picard M., 1985. Evaluation de la disponibilité des acides aminés : choix raisonné d'une méthode. Journées Rech. Porcine, 17, 353-370.
- Maillard R., Kiener T., Bertrand S., 1990. Digestibilité "réelle" mesurée au niveau iléal, des acides aminés de la féverole et du lupin. Journées Rech. Porcine, 23, 211-216.
- Mariscal-Landín G., Lebreton Y., Sève B., 2002. Apparent and standardised true ileal digestibility of protein and amino acids from faba bean, lupin and pea, provided as whole seeds, dehulled or extruded in pig diets. Anim. Feed Sci. Technol. 97(3), 183-198.
- Stein H.H., Fuller M., Moughan P.J., Sève B., Mosenthin R., Jansman A.J.M., Fernandez J.A., De Lange C.F.M., 2007. Definition of apparent, true, and standardized ileal digestibility of amino acids in pigs. Livest. sci., 109(1-3), 282-285.